

Автоматизированный расчёт густоты растений по фотографиям с беспилотного летательного аппарата

А. А. Златопольский¹, С. А. Яровой²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: aazlat@gmail.com*

² *ООО «Центрально-Черноземная агропромышленная компания»
Воронеж, 394016, Россия
E-mail: serg.yarovoy@mail.ru*

Статья посвящена автоматизации определения густоты сельскохозяйственных растений. Знание густоты всходов необходимо для оценки качества проведённых работ, прогнозирования объёма уборки и для того, чтобы избежать излишних затрат при плохих всходах. В настоящее время в производстве подсчёт густоты растений проводится вручную. Нами рассмотрена возможность автоматического выявления на фотографии поля отдельных растений и подсчёта их числа. Для этого участки поля сахарной свёклы вскоре после появления всходов были сфотографированы с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В статье приведено описание алгоритма анализа изображения, включающего анализ цвета, пространственную фильтрацию и морфологический анализ. Этот алгоритм позволил получить оценку числа растений с хорошей точностью. Показано, каким образом устанавливаются параметры процедур и насколько их выбор критичен. Приводятся результаты тестирования предложенного алгоритма на снимках поля сахарной свёклы, сделанных с БПЛА на высоте около 30 м. Реальное разрешение снимка оценивается исходя из известного расстояния между рядами, которое при использовании для сева современной техники выдерживается очень точно. Описана технология определения густоты растений, которая может быть построена на основе предложенного алгоритма.

Ключевые слова: густота растений, сахарная свёкла, фотография с БПЛА, анализ цвета, пространственная фильтрация, морфологический анализ, связность

Одобрена к печати: 09.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-155-163

Введение

Одна из основных качественных характеристик любого поля как сельскохозяйственного объекта — густота растений. Густота отражает площадь питания растений. Если она чрезмерно высокая, то растения вынуждены тратить много ресурсов на конкуренцию между собой: на поиск влаги в нижних горизонтах, борьбу за солнце. Слишком низкая густота приводит к тому, что растения «жируют», вырастая до размеров, которые оказываются нетехнологичными и сложными в уборке, наблюдается полегание растений и т. д., из-за этого значительно возрастают потери, часть урожая остаётся в поле неубранной. Также при низкой густоте совсем по-другому ведёт себя сорная растительность. При отсутствии конкуренции и избытке питательных веществ борьба с ней становится сложной, требуются дополнительные затраты на механическую обработку или повышенные дозировки средств защиты растений.

С точки зрения производства определение степени густоты после сева необходимо для достижения нескольких целей. Одна из них — это оценка качества проведённых работ и, соответственно, выявление случаев нарушения технологии сева. Кроме того, зная густоту растений, можно с высокой вероятностью спрогнозировать объём уборки, а соответственно, потребность в комбайнах и транспорте для вывозки, эффективно планировать логистику. Также немаловажный аспект — ещё не понесённые затраты на производство. Помимо обязательных до сева культуры операций, имеются такие, которые проводятся после всходов. К ним относятся различные подкормки и внесение удобрений, обработка средствами защиты растений, междурядная обработка и т. д. Если густота растений не позволяет получить приемлемый

урожай, то нести затраты на эти операции становится нецелесообразным, так как собранный урожай их не покрывает.

В настоящий момент в производстве подсчёт густоты проводится вручную. Для сахарной свёклы это происходит следующим образом. После появления всходов агроном приезжает на поле, оценивает его визуально и выбирает от 3 до 7 случайных мест для подсчёта густоты. Рассчитывается число растений на 10 м^2 — два соседних рядка на расстоянии 11,1 м либо в одном рядке на расстоянии 22,2 м. И это число пересчитывается в тысячи растений на гектар. Среднее из всех измерений и считается средней густотой на поле. Данный метод хотя и прост, но трудоёмок, и главное — он не позволяет достоверно определить среднюю густоту всего поля, так как средняя густота растений на поле рассчитывается на основании подсчёта на площади около 0,005 га, а к примеру, для поля размером 100 га это менее 0,005 % площади.

Кроме того, зачастую не ко всем частям поля можно подъехать без передвижения по полю и повреждения посевов, а обход пешком затруднителен и занимает длительное время. Соответственно, очевидно, что лучшим решением будет использование летающей техники, которую дёшево эксплуатировать и можно быстро заменять при поломках. Такими возможностями на сегодняшний день обладают беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Для фотографирования полей использовали широкодоступные в настоящий момент БПЛА с качественной оптикой в своей ценовой категории — модель Mavic 2 Pro компании DJI (объектив 28 мм (эквивалент формата 35 мм), FOV 77° ; диафрагма f/2,8–f/11; разрешение 5472×3648 (20 МРх)) (<https://www.dji.com/ru/mavic-2/info#specs>). Модель выбрали как распространённую и при необходимости доступную для приобретения в филиалах компании.

Фотографирование происходило штатной камерой в надир (вертикально вниз) с высоты 30 м. БПЛА облетал поле, совершал 15–20 остановок в случайных местах и проводил съёмку (пример показан на *рис. 1*).



Рис. 1. Участок поля сахарной свёклы с высоты 30 м

Высоту съёмки контролировали с помощью встроенного альтиметра. Необходимо отметить особенность контроля высоты полёта в используемых DJI Mavic 2 Pro. Эти БПЛА оснащены альтиметрами, работающими на принципе измерения изменения давления воздуха (глубина погружения в атмосферу), а значит, показания высоты не учитывают особенности рельефа поля. При уклоне поля, к примеру, на максимально допустимые для выращива-

ния сахарной свёклы 3° и при протяжённости поля в 1 км по одной стороне перепад высот может достигать более 50 м. Такая неточность в оценке высоты приводит к существенной ошибке в определении разрешения снимка и, соответственно, в измерениях на нём. Чтобы избежать дооборудования БПЛА дальномерами, было решено уточнять разрешение снимка по расстоянию между рядками культуры (междурядью), которое при использовании для сева современной техники выдерживается очень точно. К примеру, в тестовых наборах снимков были сделаны фотографии поля сахарной свёклы, сев которой производился 24-рядной сеялкой с междурядьем 45 см (отклонение от заданной ширины возможно только на стыковках междурядья).

Густоту растений на снимках можно определять вручную (аналогично описанной выше технологии). Однако мы предположили, что наличие цифровых фотографий позволит автоматизировать процесс и измерить густоту быстро и на значительно больших участках. В настоящей статье приводятся результаты исследования этой возможности.

Алгоритм расчёта

Принят следующий план разработки программного обеспечения. Начинаем с создания программ, автоматизирующих самые трудоёмкие процедуры, а затем дорабатываем комплекс, постепенно исключая остающиеся ручные операции. По той же логике в начале работы будем ориентироваться на наиболее массовые ситуации, вводя ограничение на возможное разнообразие условий, а затем шаг за шагом обеспечивать работу комплекса и в более редких случаях.

Описывать разработку будем в таком же порядке. Начнём с ключевой и самой трудоёмкой для оператора операции — с подсчёта числа растений на снимке. Операция состоит из двух шагов. Первый — выявление всех растений таким образом, чтобы каждое из них отображалось одной связной группой пикселей (каждый пиксель такой группы связан (соединён) с любым другим). Дальше такую группу пикселей будем называть пятном. Второй шаг — подсчёт числа полученных пятен, и это уже несложная техническая процедура. В поиске пятен есть тонкость. Необходимо сделать выбор, считаем ли мы связными только те соседние пиксели, которые «соприкасаются» стороной (называется 4-связность, так как у пикселя 4 таких соседа), или же включим в соседние и те пиксели, которые касаются только углами (8-связность, 8 таких соседей). Практически это означает выбор приоритета. Если важнее не допустить ложного слияния соседних пятен, при котором недосчитаемся растений, то используем 4-связность, а если важнее не допустить распада пятна, при котором одно растение будет учтено несколько раз, то выбираем 8-связность. По ходу тестирования лучше себя показал вариант 8-связности.

Рассмотрим основной шаг — выявление растений (*рис. 2а*), когда от каждого растения необходимо получить пятно на растре, причём только одно. Чем характеризуется область растения на растре (пятно), как его можно обнаружить на снимках, которыми мы располагаем? Очевидны два параметра. Основной — это цвет, зелёное растение контрастно по цвету к окружающему грунту. Второй параметр — размер. Не учитываем слишком маленькие зелёные объекты, чтобы не добавлять к числу растений их «визуально отделившиеся» фрагменты или мелкие сорняки. Есть и другие параметры пятен, которые мы пока не рассматриваем. Например, расположение зелёного объекта относительно рядков. Так, можно исключить пятна в междурядья, которые, скорее всего, относятся к сорнякам. Пока этой фильтрации нет, работаем с полями, в которых практически нет сорняков.

Ключевой вопрос создания алгоритма — научиться выявлять пиксели, которые по цвету относятся к растению (зелёные). Входное изображение содержит данные в трёх диапазонах, и каждый пиксель характеризуется тремя значениями: R (красный), G (зелёный) и B (синий). Понятно, что у пикселя, относящегося к растению, $G > R$ и $G > B$, но нужно найти конкретный алгоритм, который позволит не пропустить «зелёные» точки и не будет выделять лишние. Довольно хорошо работает условие $G - R > T$, где T — пороговое значение. Однако

по этому правилу выявляется довольно много лишних пикселей там, где на поверхности земли есть тень от микрорельефа или мокрые участки. Если вместо разности использовать отношение G/R или $(G - R)/(G + R)$, то результат в районе тени только ухудшается, так как абсолютные значения там малы и поэтому очень сильно сказываются небольшие вариации яркости. Довольно хорошо удалось устранить теневые точки по простому дополнительному условию $R - B > Tb$, где Tb — это ещё один порог.

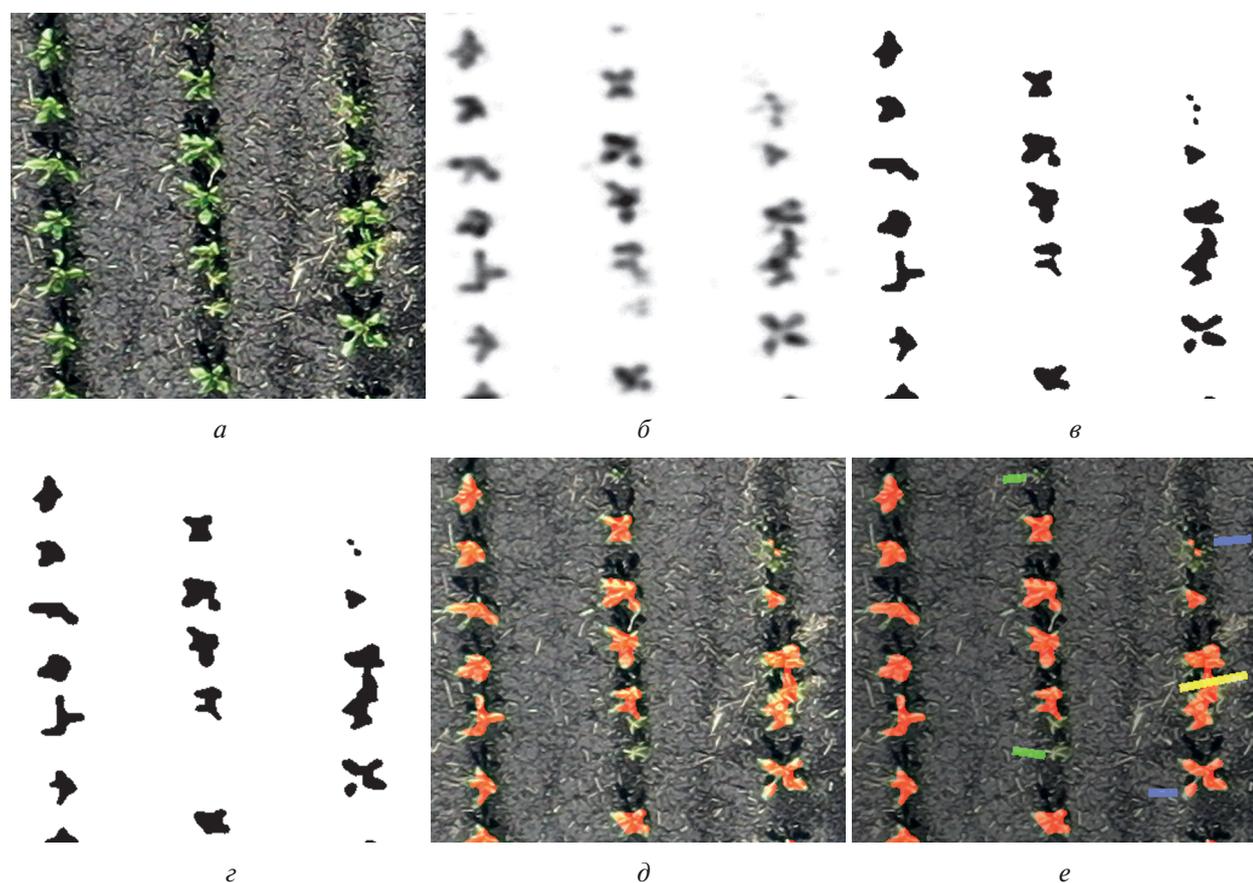


Рис. 2. Демонстрация процесса обработки изображения рис. 1 (показан небольшой фрагмент поля): *a* — исходное изображение; *б* — «индекс зелёного» после пространственной фильтрации (темнее — большее значение); *в* — пятна после пороговой операции; *г* — пятна после морфологической операции (см. второе пятно во втором столбце и два больших пятна в третьем) и удаления мелких пятен (одно из трёх в третьем столбце); *д* — найденные пятна наложены как красные на исходное изображение; *е* — цветными полосками отмечены пропущенные растения (зелёный цвет), лишние пятна (синий) и слившиеся пятна (жёлтый)

Следующий принципиальный момент — учёт того, что точки растения формируют на растре компактную, связную область. Чтобы это учесть и отбросить мелкие зелёные пятна, используем пространственную фильтрацию, усредняя значения $(G - R)$ в небольшом круглом окне (с диаметром d пикселей, в данном случае $d = 9$) (рис. 2б). Упомянутый выше порог T будет применяться к усреднённым значениям (рис. 2в). Такой способ поиска компактных групп точек позволяет учитывать, насколько точки зелёные и насколько их много в небольшой окрестности. Результат выше порога могут дать как заполняющие всё окно «достаточно зелёные» точки, так и меньшее число точек, но «очень зелёных».

Как отмечалось выше, для определения числа растений подсчитываются пятна — связные области зелёных пикселей. Поэтому важно исключить или минимизировать случаи, когда одно растение порождает несколько пятен, например из-за того, что отдельные пятна создают листья одного растения, когда плохо видны связывающие их стебли. Эту задачу частично

решает предыдущий шаг пространственной фильтрации, но мы дополним его чисто «геометрической» операцией, которая позволяет слить пятна, расположенные слишком близко. Воспользуемся двумя морфологическими операциями (Serra, 1982): эрозией (сжатие пятен) и дилатацией (раздувание пятен). Если представить, что пятна — это острова, то после дилатации на определённую величину (r пикселей), а потом эрозии на ту же величину исчезнут («закроются») узкие «озёра», «фьорды» и, что важно для нас, «проливы» между «островами», т. е. сольются пятна, расстояние между которыми меньше чем $2r + 1$ пиксель.

На последнем шаге отфильтруем пятна по размеру, удаляя мелкие пятна (с площадью меньше порога T_s) (рис. 2г, д).

Тестирование

Прежде чем рассмотреть, как описанный алгоритм работает на изображении поля, приведённого на рис. 1, опишем, какие ошибки можно ожидать в результате.

Пропуск. По тем или иным причинам после работы алгоритма растение может остаться без соответствующего пятна.

Склейка. Возможна ситуация, когда листья соседних растений перекрываются и пятна нескольких растений сливаются в одно. При подсчёте густоты это будет равносильно пропуску всей группы слившихся растений, кроме одного.

Ложное растение. Пятно возникло там, где растения нет, скажем, на затенённом участке.

Распадение. Одно растение порождает несколько пятен, т. е. возникают лишние пятна.

В результате при подсчёте числа растений возникают ошибки двух типов: пропущенные растения и излишние. Обозначим общее число растений, пропущенных за счёт пропусков и склейки, как E^- и общее число излишних пятен, получившихся за счёт ложных растений и распадения, как E^+ . Важно иметь в виду следующее обстоятельство. Число ошибочных решений, принятых алгоритмом, — это $Er = (E^+) + (E^-)$, а вот ошибка в определении числа растений — это $E = (E^+) - (E^-)$. Причём E может оказаться существенно меньше, чем Er . Настраивая алгоритм, нужно ориентироваться на величину E , которая определяет фактическую точность результата. Однако не будем упускать из вида и величину Er .

Оценка качества работы алгоритма происходила следующим образом. На тестовом снимке (см. рис. 1) программа выделила пятна и подсчитала их число Na . Специалист проанализировал полученные пятна и отметил ошибки: пропущенные, склеенные, ложно отмеченные и распавшиеся пятна (рис. 2е). Таким образом, была получена профессиональная оценка числа растений на снимке $N = 2423$ растения.

Результат настройки алгоритма следующий. Найдено пятен $Na = 2370$, пропущено $Np = 103$, склеенных $Ns = 29$, ложно отмеченных $Ne = 0$ и ложных пятен от распадения $Nr = 79$, а значит $(E^-) = Np + Ns = 132$, $(E^+) = Ne + Nr = 79$, $E = -53$, $Er = 211$. Таким образом, относительная погрешность алгоритма $e = E/(Na - E) = 2,2\%$ вполне мала. Причём и общее число ошибочных решений также относительно невелико: $Er/(Na - E) = 8,7\%$. Напомним, что алгоритм рассчитан на работу в полях без сорняков, т. е. сорняки он не бракует. По мнению специалиста, на этом снимке за культуру было принято 8 сорняков, что практически не влияет на результат. Разрешение снимка оказалось 3,75 мм/пиксель, площадь — 280,72 м² (почти в 30 раз больше стандартного участка определения густоты) и густота растений — 84,43 тыс. на гектар. Эти результаты приведены в таблице.

Результаты тестирования по двум снимкам

№	Всего пятен N	Пропущенных пятен Np	Склеенных пятен Ns	Ложно отмеченных пятен Ne	Ложных пятен от распадения Nr	Ошибка в определении числа растений E	Ошибочные решения Er	Густота, тыс./га
1	2423	103	29	0	79	-53 (2,2 %)	211 (8,7 %)	84,43
2	2772	102	45	0	86	-61 (2,2 %)	233 (8,4 %)	106

Параметры алгоритма, как обычно, выбирались на основе баланса между ошибками пропуска и ложного обнаружения (у нас это $E+$ и $E-$). В нашем случае особенно важно, чтобы эти значения были близки. Необходимо знать, насколько критичен выбор параметров, т. е. понять следующее: представленный результат получается только в узком диапазоне значений параметров, подобранных для этого снимка, а при небольшом их изменении точность резко падает или же ситуация иная.

Наиболее принципиальным оказался выбор способа определения зелёных пикселей, а вот выбор конкретных значений порогов не требовал большой точности. Конечно, меняя порог «по цвету» T (было использовано $T=14$), можно существенно изменить результат, но для этого нужно далеко уйти от оптимального значения. На *рис. 3* показано, как меняется число найденных пятен N_a при изменении T . Видим, что и при приведённом на графике существенном изменении порога результат ухудшается только на 10%. Изменение других параметров около их оптимальных значений сказывается на результате ещё меньше.

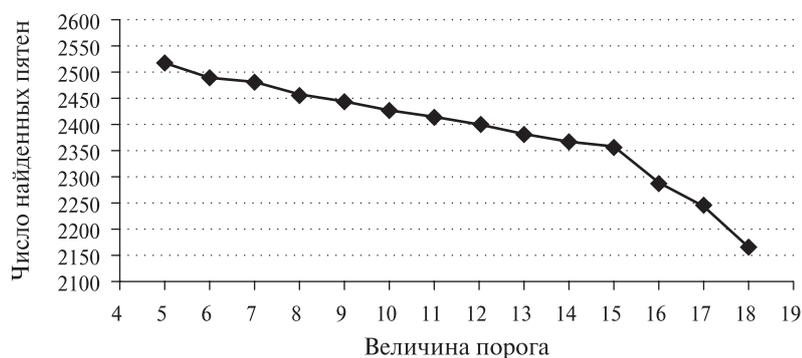


Рис. 3. Зависимость числа найденных пятен от порога по цвету



Рис. 4. Второй пример фотографии участка поля сахарной свёклы с высоты 30 м

Значения d и Ts выбираются исходя из минимального размера растения, которое нужно принимать в расчёт. А радиус морфологических операций r должен быть достаточно большим, чтобы слить части одного растения и не сливать соседние растения.

Рассмотрим, каков размер (в плане) растений, которые мы собираемся искать. Поскольку расстояние между растениями в рядке составляет 19 см, больший диаметр их кроны должен быть меньше примерно 18 см, чтобы растения не перекрывались, не сливались на изображении.

С другой стороны, растения, отставшие в развитии, не могут быть слишком маленькими. Эксперт предположил, что их ширина (меньший диаметр) больше 3 см. Учитывая, что разрешение снимка составляет около 3,5 мм/пиксель, ищем растения шириной больше 8 пикселей и диаметром меньше 50 пикселей.

При обработке с теми же параметрами снимка другого участка того же поля (рис. 4 (см. с. 160), на этом изображении 9 сорняков) получен очень похожий результат (см. таблицу). Разрешение этого снимка оказалось 3,58 мм/пикселей, площадь — 255,84 м² и густота растений получилась 106 тыс. на гектар, т. е. на 25,5 % больше, чем на первом снимке.

Таким образом, разработанный алгоритм на имеющихся снимках демонстрирует хорошую точность и устойчивость.

Технология

Опишем работу комплекса программ (рабочее место оператора), который можно создать, опираясь на реализованный алгоритм подсчёта растений. Определение густоты растений может осуществляться с помощью следующей технологической цепочки:

1. Оператор просматривает на экране снимки поля и выбирает изображение, адекватное по критериям:
 - снимок должен быть снят в надир и иметь разрешение примерно 3,5 мм/пиксель (для использованной съёмочной камеры это около 30 горизонтальных рядков или 40 вертикальных). Точно определять разрешение оператору не нужно — важно отбраковать заведомо непригодные снимки;
 - на снимке должен быть «рабочий» участок поля, т. е. участок засеянный и не заросший сорняками. Если понадобится, оператор сможет маскировать «нерабочие» участки снимка, чтобы работать с изображениями, на которых такие участки есть.
2. Оператор проводит на экране небольшие линии вдоль 3–4 соседних рядков, как показано на рис. 5 (левый верхний фрагмент поля с рис. 1). Это позволяет, зная реальное расстояние между рядками, рассчитать разрешение снимка для определения площади и адаптации геометрических параметров расчёта.
3. Оператор отправляет снимок на поиск и подсчёт растений.
4. Оператор получает результат и может произвести следующие операции:
 - оценить в целом результат поиска растений (на экране отмечены все учтённые растения) и отбраковать непригодный результат;
 - сохранить результат в базе данных (характеристики снимка, число растений, площадь участка с учётом маскированных частей);
 - сделать пояснительные заметки.

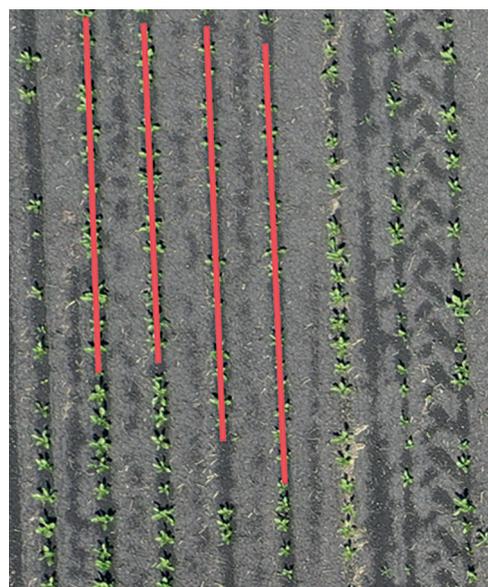


Рис. 5. Пример проведения оператором линий вдоль рядков

Заключение

Представляется разумным для рассматриваемой задачи разрабатывать алгоритмы анализа изображения с БПЛА, пока спутниковые данные не обеспечивают разрешения в несколько миллиметров на пиксель. На представленных снимках разработанный алгоритм демонстрирует хорошую точность и устойчивость, но это только начало его проверки. Теперь очень важно подготовить новые данные, чтобы «прогнать» алгоритм на снимках других полей, при других погодных условиях. Может оказаться, что мокрые растения бликуют на солнце и выглядят не зелёными. Или могут быть почвы, по отношению к которым растения недостаточно контрастны по цвету.

Возможны и следующие шаги развития данной технологии. Не исчерпаны возможности устранения «склеившихся» и «распавшихся» растений. Если оператору нужно будет отобрать снимки, покрывающие большое поле, и если эти снимки географически привязаны, то система может предлагать оператору очередные снимки на ещё не «оценённые» участки поля. Если большой объём работ потребует ускорения и дальнейшей автоматизации технологии, то можно будет сократить число линий, которые оператор проводит по рядкам, а возможно, удастся и совсем от них отказаться.

Относительно отбраковки сорняков. Если сорняков, которые не уступают в размере основным растениям, мало (3–4 шт. на 1000 растений, как в приведённых случаях, или даже на порядок больше), то учёт их как нужных растений незначительно скажется на результате. А если их окажется на два порядка больше, то проблема будет не в том, чтобы их отбраковать. Скорее всего, они будут «склеиваться» с остальными растениями и не позволят их выявить.

Работа выполнена при поддержке Российской академии наук (тема «Мониторинг», государственная регистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. *Serra J.* Image analysis and mathematical morphology. Orlando, USA: Academic Press Inc., 1982. 621 p.

Automated calculation of plant density based on unmanned aerial vehicle photos

A. A. Zlatopolsky¹, S. A. Yarovoy²

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: aazlat@gmail.com*

² *OOO Central Black Earth Agro-Industrial Company, Voronezh 394016, Russia
E-mail: serg.yarovoy@mail.ru*

This paper concerns the automatic determination of the agricultural plants density. Knowledge of the seedling density is necessary to estimate the quality of work performed, to predict the amount of harvesting, and to avoid unnecessary costs in case of poor seedlings. Currently, in production, the density of plants is calculated manually. We have considered the possibility of automatically identifying individual plants and counting their number in the field photo. To do this, sections of the sugar beet field were photographed from an unmanned aerial vehicle shortly after the emergence of seedlings. The paper describes the image analysis algorithm that includes color analysis, spatial filtering, and morphological analysis. This algorithm allowed us to get an estimate of the number of plants with good accuracy. It shows how algorithm parameters are set and how critical their choice is. The results of testing the proposed algorithm on images of a sugar beet field taken from an unmanned aerial vehicle at an

altitude of about 30 meters are presented. The actual resolution of the image is estimated based on the known distance between rows, which is maintained very accurately when using modern sowing equipment. The technology for determining the density of plants, which can be built on the basis of the proposed algorithm, is described.

Keywords: plant density, sugar beet, UAV photography, color analysis, spatial filtering, morphological analysis, connectivity

Accepted: 09.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-155-163

References

1. Serra J., *Image analysis and mathematical morphology*, Orlando, USA: Academic Press Inc., 1982, 621 p.