

## Исследование зависимости вероятности распознавания от величины линейного разрешения на местности для объектов сельскохозяйственной техники системами дистанционного зондирования Земли

### Investigation of the dependence of the recognition probability on the magnitude of the linear resolution on the terrain for agricultural machinery objects by remote sensing systems of the Earth

#### Молчанов / Molchanov A.

Андрей Сергеевич

(andryoe@yandex.ru)

доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Академии военных наук.

Государственный летно-испытательный центр

им. В. П. Чкалова,

начальник отдела.

г. Ахтубинск

#### Коломоец / Kolomoets V.

Вадим Андреевич

(kolomw@yandex.ru)

Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова,

инженер-испытатель.

г. Ахтубинск

**Ключевые слова:** система дистанционного зондирования Земли – Earth remote sensing systems; линейное разрешение – linear resolution; экспериментальное исследование – experimental research.

В статье представлены результаты исследования зависимости вероятности распознавания от величины линейного разрешения на местности для объектов сельскохозяйственной техники цифровыми оптико-электронными системами дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены вероятностные характеристики распознавания для восьми положений пространственной ориентации объектов сельскохозяйственной техники системами дистанционного зондирования земли по результатам наземных испытаний. Экспериментальным путем установлена зависимость между вероятностью распознавания объектов сельскохозяйственной техники и величиной линейного разрешения на местности.

The article presents the results of a study of the dependence of the recognition probability on the magnitude of the linear resolution on the terrain for agricultural machinery objects by digital optical-electronic systems of remote sensing of the Earth. Probabilistic characteristics of recognition for eight positions of spatial orientation of objects of agricultural machinery by remote sensing systems of the earth based on the results of ground tests are considered. Experimentally, the relationship between the probability of recognizing objects of agricultural machinery and the magnitude of linear resolution on the ground has been established.

Для сравнительного анализа цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), определения потенциальных характеристик разрешения и повышения достоверности их испытаний необходимо установление экспериментальным путем зависимости между вероятностью распознавания объекта ВЗР и величиной линейного разрешения на местности (ЛРМ).

Распознавание простого объекта – это процесс получения информации об обнаруженном объекте, позволяющий определить его принадлежность к определенному виду, классу, подклассу, типу объектов. Каждая из этих категорий содержит определенное понятие и степень подробности информации об объекте. При этом каждой из категорий соответствует изображение объекта, полученное ЦОЭС ДЗЗ с различными в техническом отношении характеристиками.

Определение технического качества ЦОЭС ДЗЗ осуществляется в ходе их испытаний (экспериментальных исследований), цель которых в соответствии с нормативно-техническими документами системы общих технических требований – подтверждение заданных в тактико-техническом задании характеристик и выдача рекомендаций о принятии образца на вооружение (снабжение), и постановка на серийное производство.

В проведении испытаний важную роль играет метод проведения эксперимента. Под методом прове-

дения эксперимента понимается совокупность приемов, операций, способов достижения поставленных экспериментом целей. Методы проведения эксперимента реализуются в методиках эксперимента, которые отражают совокупность мыслительных и физических операций, размещённых в определённой последовательности, в соответствии с которой достигается цель исследования.

Перед каждым экспериментом разрабатывается методика, которая включает: цель и задачи эксперимента; выбор варьируемых факторов; обоснование объема эксперимента, числа опытов; порядок реализации опытов, определение последовательности изменения факторов; выбор шага изменения факторов, задание интервалов экспериментальных точек; обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента [1, 2, 3].

В интересах исследования потенциальных характеристик разрешения и повышения достоверности летных испытаний специалистами Государственного летно-испытательного центра Министерства обороны Российской Федерации разработан испытательно-моделирующий полигон (ИМП-32). ИМП-32 предназначен для моделирования воздушного фотографирования, определения технических характеристик, выявления и исследования влияния отдельных и взаимосвязанных факторов при формировании изображения ЦОЭС ДЗЗ.

В первом приближении можно считать, что при наземном фотографировании моделей объектов изображение может иметь такую же информативность, как и при воздушном фотографировании, при условиях отсутствия влияния дестабилизирующих факторов полета.

Исследование зависимости вероятности распознавания (ВР) от ЛРМ было выполнено путем моделирования воздушного фотографирования на ИМП-32. Метод проведения исследования основывался на масштабном натурном моделировании с экспертной оценкой полученных результатов. Моделирование заключалось в фотографировании масштабных моделей сельскохозяйственной техники К-744Р1 «Кировец», МТЗ-92П «Беларус», КамАЗ-45143 под разными ракурсами при изменении угла линии визирования ЦОЭС ДЗЗ (перспективное фотографирование в реальных условиях).

При проведении эксперимента влияние атмосферной дымки на информативность изображения, которая приводит к уменьшению фотографического контраста изображения, имитировалось тем, что одни и те же модели объектов фотографировались на фонах с различной яркостью. Модели имеют полное геометрическое подобие реальному объекту и высокую степень детализации (вариант б рис. 1).

Фотографирование осуществлялось ЦОЭС ДЗЗ с характеристиками, представленными в таблице 1.

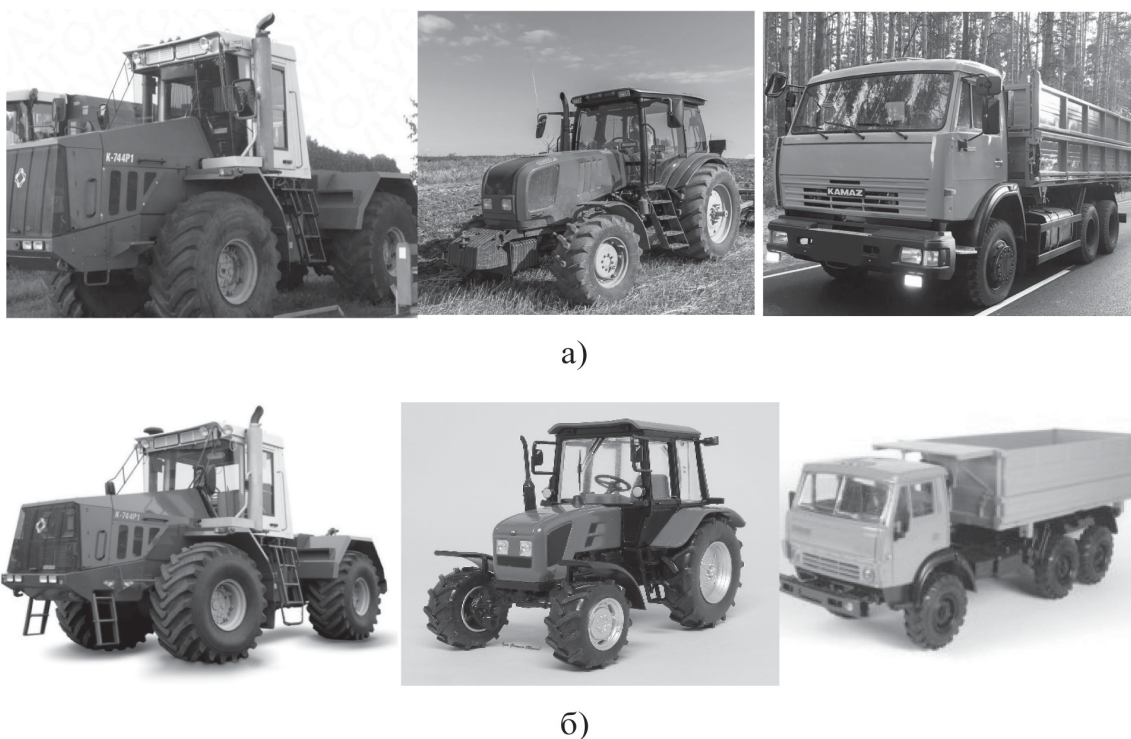


Рис. 1. а) реальные объекты сельскохозяйственной техники; б) масштабные модели, используемые в эксперименте

Таблица 1

**Характеристики ЦС ДЗЗ, используемых в исследовании**

Матрица: структура, физический размер	КМОП, 6,4x4,8 мм
Фокусное расстояние $f$	3 мм
Разрешение фотоснимка	3000x4000 (12М)
Физический размер пикселя $A$	1,6 мкм

Для количественной оценки качества изображения одновременно с моделями фотографировались тест-объекты абсолютного контраста из состава тест-мишенной обстановки (ТМО) ИМП-32 (рис. 2).

Для выявления условий распознавания объектов в случае перспективного фотографирования при освещении прямыми лучами солнца модели фотографировались с углами линии визирования ЦОЭС ДЗЗ, равными 60, 70, 80, 85 градусов в восьми положениях пространственной ориентации на разной дальности. Контраст объекта относительно фона и тени и определялся [4, 5, 8]:

$$K_{об/фон} = \frac{L_{об} - L_{фон}}{L_{об}}, \tag{1}$$

$$K_{об/тень} = \frac{L_{об} - L_{тень}}{L_{об}}, \tag{2}$$

где  $L_{об}$  – яркость объекта,  $L_{фон}$  – яркость фона,  $L_{тень}$  – яркость тени объекта.

Контраст изменялся в пределах от 0,41 до 0,64. Оценивание ЛРМ осуществлялось путем дешифиро-

вания изображений ТМО из состава ИМП-32 группой из 7 операторов-дешифровщиков. Каждому оператору-дешифровщику были представлены 5 изображений, для каждого пространственного положения, дальности и угла визирования. Значение достоверной вероятности при статистической оценке результатов 0,95.

Дешифрирование выполнялось на автоматизированном рабочем месте, обеспечивающим визуализацию изображений. Устанавливалась предельно разрешаемая группа штрихов, в которой все штрихи различаются отдельно по всей их длине (имеется визуальное восприятие разницы в уровне серого тона на экране между каждой светлой полосой и соседней с ней темной полосой по всей их длине) в порядке уменьшения ширины штриха мира [5–9].

В первую очередь дешифрированию подвергались снимки с наиболее низкой информативностью изображения (с мелким масштабом и малым фотографическим контрастом), полученные при перспективном фотографировании с наибольшим углом визирования. В последнюю очередь дешифровались снимки с высокой информативностью изображения.

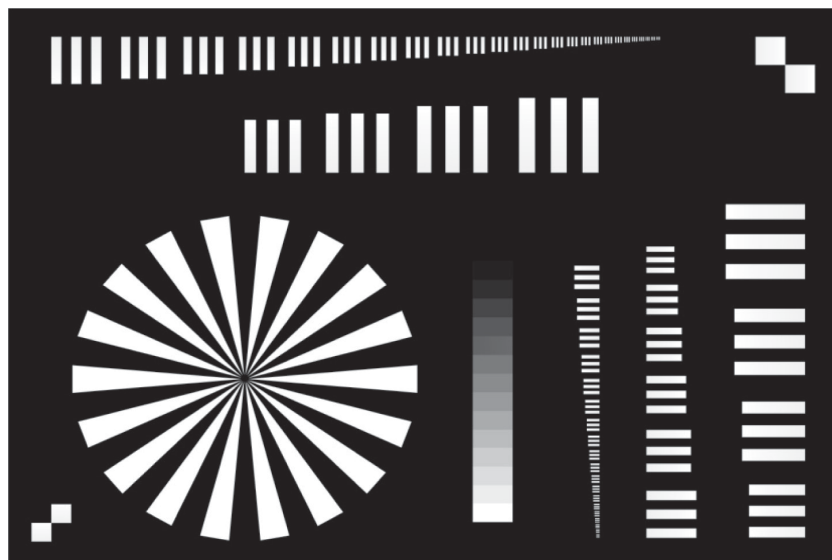


Рис. 2. ТМО из состава ИМП-32 для определения разрешения на местности

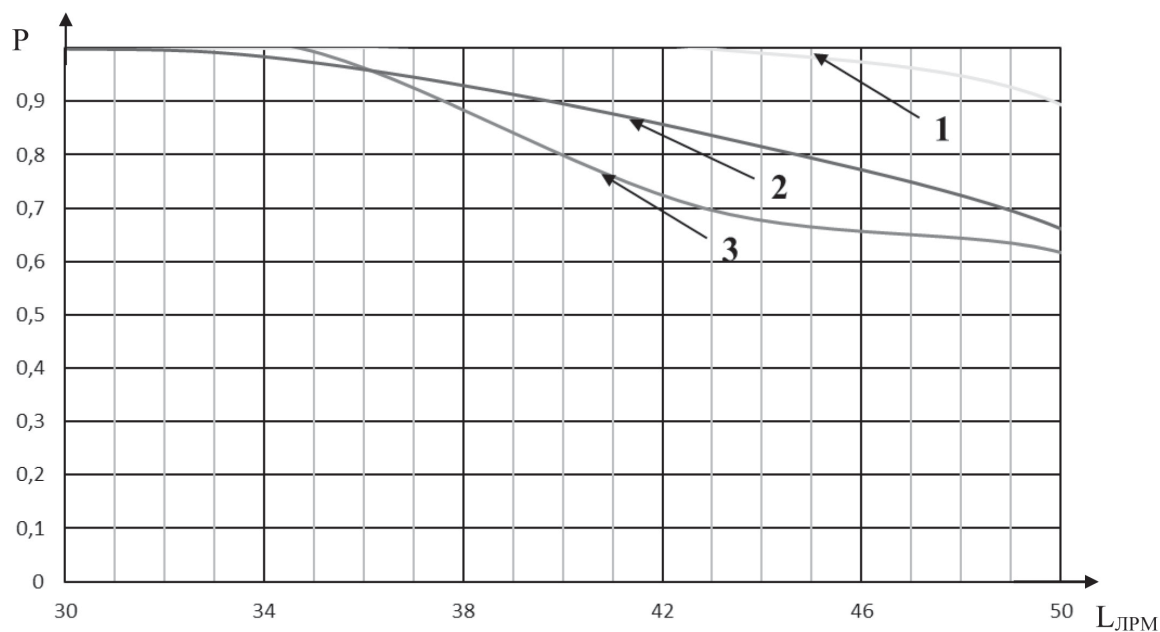


Рис. 3. Вероятностные характеристики обнаружения:  
 1 – К-744Р1 «Кировец», 2 – КамАЗ-45143, 3 – МТЗ-92П «Беларус»

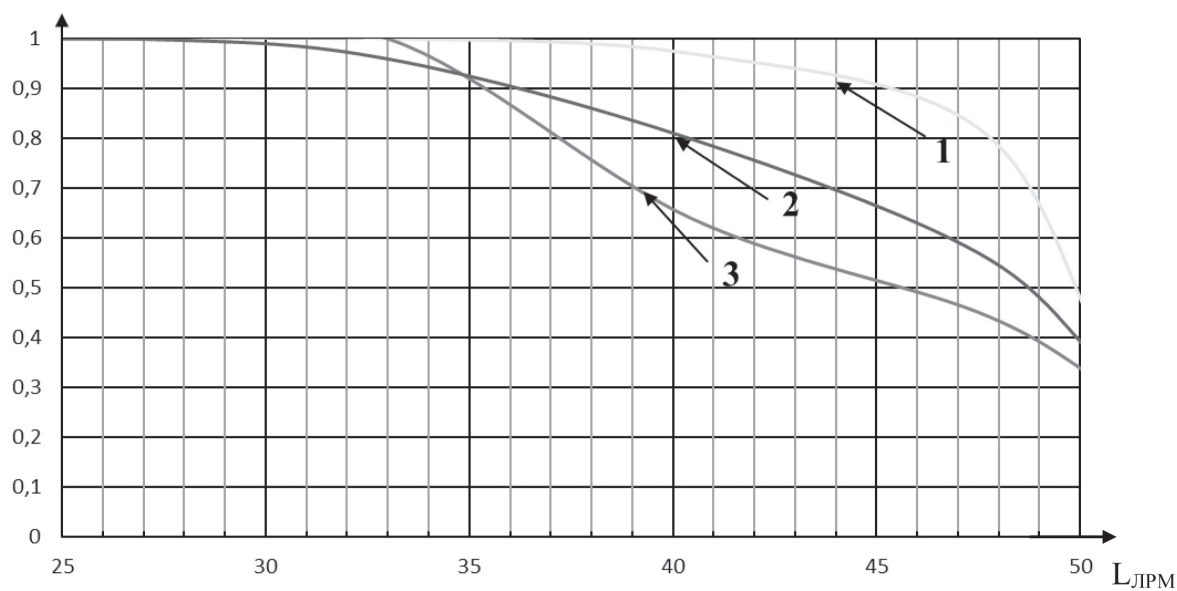


Рис. 4. Вероятностные характеристики распознавания объектов до вида:  
 1 – К-744Р1 «Кировец», 2 – КамАЗ-45143, 3 – МТЗ-92П «Беларус»

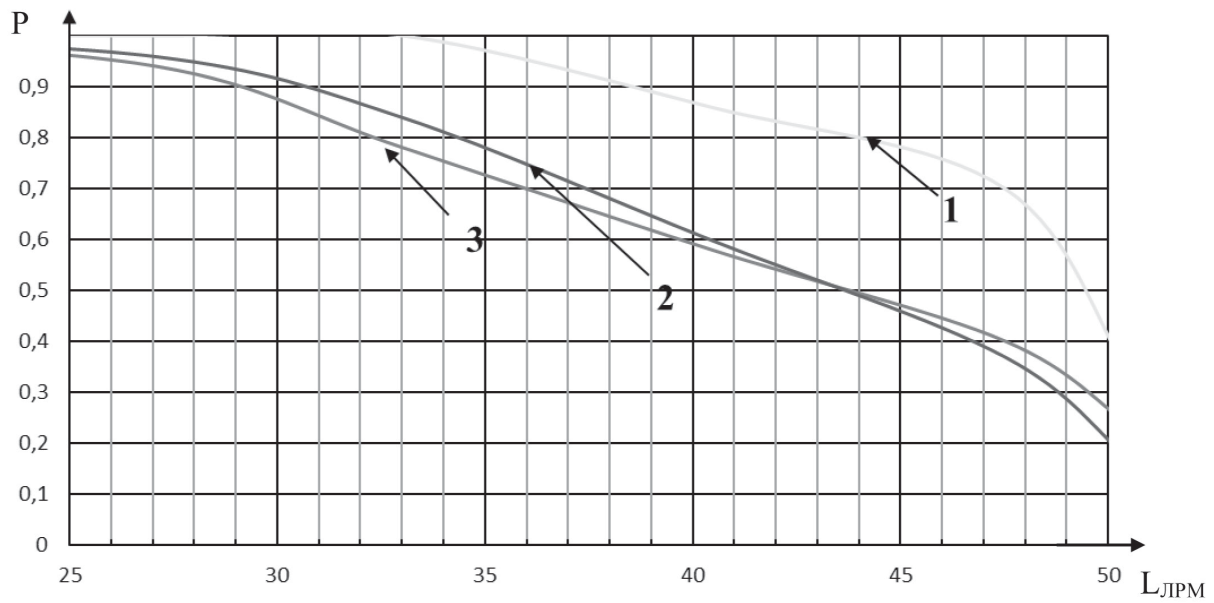


Рис. 5. Вероятностные характеристики распознавания объектов до класса:  
1 – К-744Р1 «Кировец», 2 – КамАЗ-45143, 3 – МТЗ-92П «Беларус»

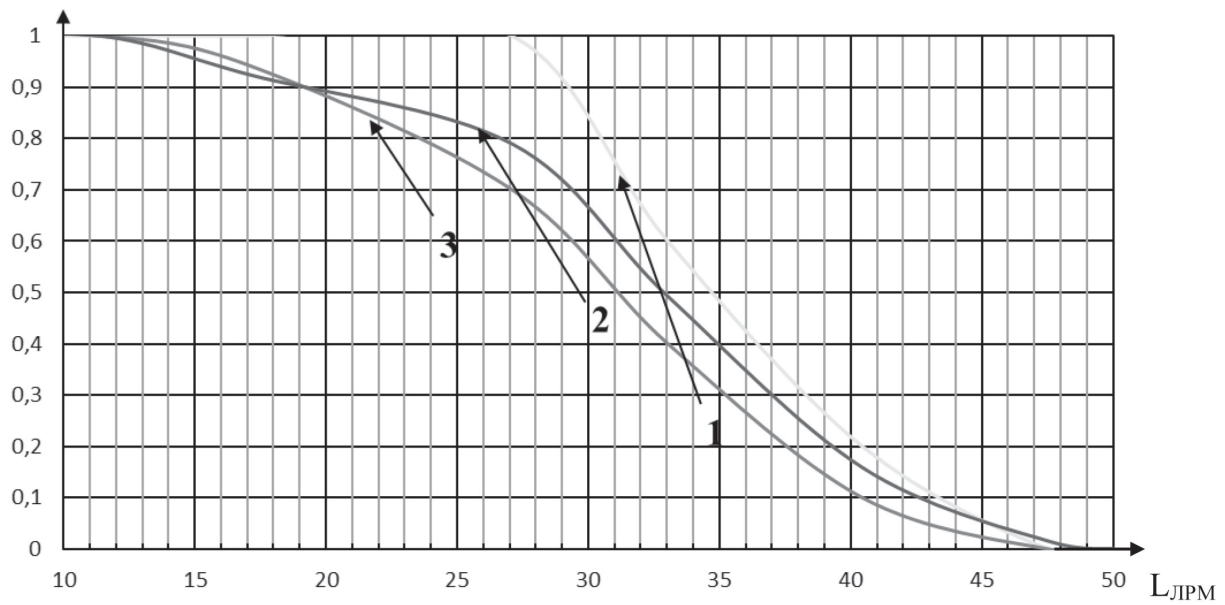


Рис. 6. Вероятностные характеристики распознавания объектов до подкласса:  
1 – К-744Р1 «Кировец», 2 – КамАЗ-45143, 3 – МТЗ-92П «Беларус»

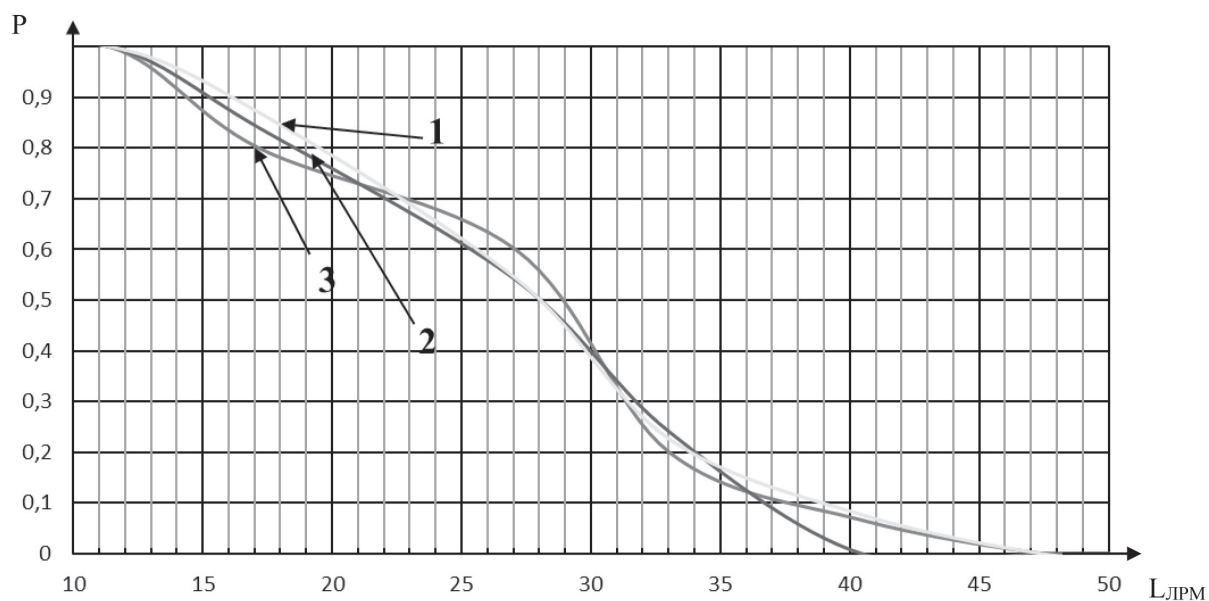


Рис. 7. Вероятностные характеристики распознавания объектов до типа:  
1 – К-744Р1 «Кировец», 2 – КамАЗ-45143, 3 – МТЗ-92П «Беларус»



Рис. 8. Пространственная ориентация объектов, используемых при проведении исследования

Вероятность обнаружения (ВО) и распознавания до соответствующей степени подробности определялось в соответствии с выражением:

$$P_{СПИ_i} = \frac{1}{p_i \cdot q} \sum_{p_i, q} N_{СПИ_i}, \quad (3)$$

где  $p_i$  – количество изображений, представленных каждому оператору-дешифровщику на каждом шаге дальности, пространственном положении и угле визирования,  $q$  – количество операторов-дешифровщиков,  $P_{СПИ_i}$  – вероятность соответствующей степени подробности, для апостериорной выборки соответствующей шагу изменения дальности, пространственного положения и угла визирования (далее апостериорная выборка), СПИ – степень подробности типового объекта ЦОЭС ДЗЗ до категории «обнаружение» и распознавание до «вида», «класса», «подкласса», «типа»,  $N_{СПИ_i}$  – количество распознаваний типовых объектов до соответствующей степени подробности, для апостериорной выборки.

Величина ЛРМ ЦОЭС ДЗЗ рассчитывалась в соответствии со следующими выражениями:

$$L_{ср_i} = \frac{1}{p_i \cdot q} \sum_{p_i, q} L_{опр_i}, \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (L_{опр_i} - L_{ср_i})^2}{p_i \cdot q - 1}}. \quad (5)$$

За окончательную величину ЛРМ, полученного в результате исследования, принято:

$$L_{ЛРМ_i} = L_{ср_i} + 2\sigma_i. \quad (6)$$

Величина вероятности обнаружения и распознавания рассчитывалась в соответствии с выражениями:

$$P_{срСПИ_i} = \frac{1}{p_i \cdot q} \sum_{p_i, q} P_{СПИ_i}, \quad (7)$$

$$\sigma_{P_{срСПИ_i}} = \sqrt{\frac{\sum (P_{СПИ_i} - P_{срСПИ_i})^2}{p_i \cdot q - 1}}. \quad (8)$$

За окончательную величину ВО и ВР, полученного в результате исследования, принято:

$$P_{СПИ_{конечная}} = P_{срСПИ_i} - 2\sigma_{P_{срСПИ_i}}. \quad (9)$$

где  $L_{опр_i}$  – среднеарифметическое значение линейного разрешения на местности, измеренное каждым дешифровщиком по всем отобранным изображениям для апостериорной выборки,  $P_{срСПИ_i}$  – среднее значение вероятности обнаружения и распознавания типового объекта до соответствующей степени подробности по всем дешифровщикам,  $L_{ср_i}$  – среднее значение линейного разрешения на местности по всем дешифровщикам для апостериорной выборки,  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение измеренного значения линейного разрешения на местности от среднего значения, для апостериорной выборки,  $\sigma_{P_{срСПИ_i}}$  – среднеквадратическое отклонение измеренного значения вероятности обнаружения и распознавания типового объекта до соответствующей степени подробности для апостериорной выборки.

Результаты получены при расположении объекта на открытой равнинной местности, на зеленом растительном фоне, модели объектов имеют ярко выраженные желтую и красную раскраски.

На рис. 3 приведены усредненные по апостериорной выборке зависимости вероятности обнаружения от ЛРМ ЦОЭС ДЗЗ для моделей сельскохозяйственной техники К-744Р1 «Кировец», МТЗ-92П «Беларус», КамАЗ-45143.

Таблица 2

**ЛРМ распознавания объектов сельскохозяйственной техники**

Объект	до типа	до подкласса	до класса	до вида	обнаружение
	Для вероятности 0,9				
К-744Р1 «Кировец»	0,16	0,295	0,385	0,455	0,5
КамАЗ-45143	0,153	0,196	0,31	0,365	0,4
МТЗ-92П «Беларус»	0,144	0,194	0,29	0,355	0,375
Для вероятности 0,8					
К-744Р1 «Кировец»	0,195	0,305	0,44	0,48	–
КамАЗ-45143	0,185	0,268	0,343	0,405	0,445
МТЗ-92П «Беларус»	0,17	0,245	0,325	0,372	0,4

На рис. 4–7 приведены усредненные по апостериорной выборке зависимости ВР от ЛРМ ЦОЭС ДЗЗ объектов К-744Р1 «Кировец», КамАЗ-45143, МТЗ-92П «Беларус».

Пространственная ориентация объекта определялась в соответствии с рис. 8.

В результате наземного эксперимента установлена количественная связь между вероятностью распознавания и усредненным линейным разрешением на местности для объектов сельскохозяйственной техники, представленная в таблице 2.

Из рис. 3–5 видно, что вероятность обнаружения и распознавания объектов до вида и класса в условиях перспективного фотографирования в большей степени зависит от положения пространственной ориентации объекта. Это обусловлено влиянием информативности снимка, зависящей от проекции объекта на фотоприемную матрицу ЦОЭС ДЗЗ, когда небольшое увеличение информативности снимка с учетом визуального восприятия дешифровщика позволяет определить форму объекта, его основные (наибольшие) детали и их взаимное расположение.

Из рис. 6, 7 следует, что на распознавание объекта до подкласса и типа влияние пространственного положения несущественно, так как при дешифрировании крупные и средние детали объекта видны отчетливо, большую роль оказывает взаимное расположение мелких деталей объекта.

Увеличение угла линии визирования приводит к уменьшению ВР объектов, при этом ВО и ВР до вида и класса для объекта К-744Р1 «Кировец» уменьшается незначительно за счет больших габаритных размеров в сравнении с КамАЗ-45143 и МТЗ-92П «Беларус».

Таким образом, в результате исследования:

1. Выявлено, что ИМП-32 позволяет более строго, чем в летных экспериментах, определить роль отдельных факторов, влияющих на формирование изображения.

2. Представлены расчетные соотношения, позволяющие установить связь между ЛРМ и вероятностями обнаружения и распознавания.

3. Определены вероятностные характеристики обнаружения и распознавания объектов сельскохозяйственной техники и их зависимости от качественных показателей ЦОЭС ДЗЗ.

Полученные результаты позволяют:

– обеспечить распознавание объектов с заданной вероятностью с минимальным количеством требуемых летных экспериментов на основе полученных величин ЛРМ;

– смоделировать в определенных условиях ведения ДЗЗ оптимальные параметры летных экспериментов для выполнения задачи распознавания наземных объектов с требуемым результатом;

– выработать общую методику проведения наземных экспериментов на ИМП-32.

## Литература

1. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков [и др.]. – Ленинград : Энергия, 1978. – 192 с.
2. Молчанов, А. С. Теория построения иконических систем воздушной разведки / А.С. Молчанов. – Волгоград : Панорама, 2017. – 224 с.
3. Ребрин, Ю. К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов / Ю.К. Ребрин. – Киев : КВВАИУ, 1988. – 450 с.
4. Чаусов, Е. В. Программно-методический комплекс обработки изображений при проведении летных испытаний иконических оптико-электронных систем / Е.В. Чаусов, А.С. Молчанов // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, № 1. – С.26–33.
5. Молчанов, А. С. Теория и практика распознавания объектов бронетанковой техники при дешифрировании аэроснимков / А.С. Молчанов, Е.В. Чаусов. – Москва : Перо, 2021. – 246 с.
6. Свиридов, К. Н. Разрешающая способность и линейное разрешение для оценки качества и проектирования аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли / К.Н. Свиридов, А.Е. Тюлин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 9–29.
7. Молчанов, А. С. Методика оценивания линейного разрешения авиационных цифровых оптико-электронных систем в процессе летных испытаний / А.С. Молчанов, Е.В. Чаусов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 140–150.
8. Чаусов, Е. В. Математическая модель атмосферы как звена процесса формирования изображений иконических оптико-электронных систем воздушной разведки / Е.В. Чаусов, А.С. Молчанов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 203–209.
9. Тюлин, А. Е. Критерий РКС оценки линейного инструментального разрешения КА ДЗЗ на местности для совершенного проектирования оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) КА ДЗЗ / А.Е. Тюлин, К.Н. Свиридов // Информатика и Космос. – 2020. – № 2. – С. 140–147.