

УДК 7.061

Определение авторства произведений изобразительного искусства на основе частотного анализа цветов и энтропии цифровых отпечатков

А. А. Климов¹, Е. В. Овчинникова², А. П. Шкарапута³

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

¹klimovalexander@hotmail.com²ek.ovchinnikova94@yandex.ru³shkaraputa@psu.ru

Проведено исследование зависимости между частотами цветов, используемых художником для создания произведений изобразительного искусства и энтропии этих картин от авторства и эпохи написания. Также в тексте приведен краткий обзор методов исследования произведений изобразительного искусства в современных отделах научной экспертизы и доказательства. На основе минусов данных методик предложен менее затратный метод определения и доказательства авторства произведений изобразительного искусства, основанный на выделении диапазонов цветовых распределений в совокупности с выявлением энтропии цифровых отпечатков картин. Для проверки гипотезы о целесообразности данного метода использовались произведения изобразительного искусства, написанные русскими и зарубежными художниками XVII–XX вв. Для каждого художника были определены диапазон значений энтропии его произведений и усредненные частоты цветов, используемых в его картинах. У всех авторов было получено нормальное распределение энтропий картин, а также исследованы зависимости энтропии от времени создания и от качества цифрового отпечатка. В результате исследования были получены значения, доказывающие предпочтительность художниками определенных цветов, зависящих от эпохи написания картин. Факты, полученные в результате исследования, дают возможность проводить анализ принадлежности произведений изобразительного искусства кисти конкретного художника. В работе была рассмотрена картина Яна Вермеера "Девушка, читающая письмо у открытого окна" с последующим определением принадлежности данной картины кисти именно этого художника с помощью данных энтропии.

Ключевые слова: энтропия; частотный анализ; BMP; RGB.

DOI: 10.17072/1993-0550-2016-4-43-52

Введение

В настоящее время проблема экспертизы произведений искусства и определения авторства картин все еще актуальна, несмотря на то, что большинство полотен прошлых веков уже изучено. Однако все используемые методы исследования картин требуют существенных трудовых и временных затрат: экспертиза может длиться от одной недели до месяца и требовать участия большого количества техников и экспертов.

В связи с этим возникает необходимость разработки нового метода исследования живописных произведений. В условиях бурного развития информационных технологий в последние годы наиболее рациональным методом решения поставленной задачи можно считать компьютерную обработку цифровых копий картин, сделанных с помощью фотографирования или сканирования оригиналов.

В данной статье рассматривается метод экспертизы, основанный на анализе используемых в картине цветов и ее энтропии, а также возможность его использования для

определения принадлежности картины кисти определенного художника.

1. Методы исследования произведений изобразительного искусства в отделах научной экспертизы

В настоящее время наиболее распространенным и точным методом доказательства подлинности и авторства произведений изобразительного искусства является научно-технический метод, основанный на использовании различных приборов и установок [1]. Чаще всего он используется в сочетании с искусствоведческим методом исследования: эксперты определяют, насколько технологические и художественные приемы на картине соответствуют манере того или иного художника, а также определяют приблизительную дату создания произведения искусства.

Для большинства методов экспертизы (главным образом, для искусствоведческого) требуются некоторые эталонные данные, в соответствии с которыми можно определить авторство картины, принадлежность ее какой-либо эпохе, школе живописи и др. В настоящее время банк этих данных включает в себя:

1. Образцы холстов и бумаги;
2. Макрофотографии фактуры живописи;
3. Микропробы грунтов и красочных слоев;
4. Фотодокументы в видимом, ИК-, УФ- и рентгеновском диапазонах излучения;
5. Описания результатов иконографического и стилистического анализа, а также визуальных и микроскопических наблюдений технико-технологических особенностей произведений.

Совокупность вышеперечисленных данных, а также увеличение их количества позволяют определить искомые характеристики картины с большой точностью, однако, сбор этих данных и их хранение, несомненно, требует больших временных и технических затрат.

Технологическая экспертиза картины включает в себя несколько различных способов исследования самой картины и использованных для ее создания материалов (основы, красок, грунта и т.д.).

1.1. Задачи научной экспертизы произведений живописи

К основным задачам экспертизы относятся:

- решение вопроса об авторстве;
- датировка произведения;
- определение школы живописи;
- определение иконографии произведения;
- решение вопроса об оригинальности или вторичности работы;
- разграничение по типу вторичности (копия, авторское или соавторское повторение, принадлежность к мастерской, кругу, школе либо последователю мастера, имитация, подделка, стилизация);
- определение состояния сохранности;
- определение художественного уровня произведения.

1.2. Методы технологической экспертизы картин

Для окончательного решения научной экспертизы необходима технологическая аргументация.

Основные технико-технологические исследования включают в себя:

- 1) микроскопический анализ;
- 2) исследование в УФ-диапазоне излучения;
- 3) исследование в ИК-диапазоне излучения;
- 4) рентгенографический анализ;
- 5) анализ фактуры живописной поверхности;
- 6) анализ химического состава живописных материалов.

1.2.1. Микроскопический анализ

Экспертиза картины с помощью микроскопов (бинокулярных, поляризационных и др.) позволяет "заглянуть внутрь" полотна, изучить частицы краски и холста. В частности, с помощью данного метода можно определить степень реставрационного вмешательства, сделать вывод о способе нанесения подписи, предположить ориентировочную дату создания картины, а также определить, является ли оригиналом исследуемое произведение.

Кроме того, для доказательства авторства можно использовать полученные данные о грунте, составе и соотношении пигментов, последовательности построения изобразительных деталей (например, последовательность завершения элементов лица, одежды

или аксессуаров и т.п.), особенностях построения красочных слоев. Микроскопическое исследование этих характеристик картины дает возможность выявить определенные технические и стилистические особенности конкретного художника, что, в свою очередь, позволяет его однозначно идентифицировать.

Немаловажно, что микроскопическое исследование является экспресс-методом экспертизы картин и в совокупности со стилистическим исследованием часто позволяет решить вопрос о времени создания, школе живописи и подлинности произведения. В случае затруднений с определением даты или необходимости установления авторства микроскопическое исследование помогает наметить дальнейшую перспективу исследований.

1.2.2. Исследование в УФ-диапазоне излучения

Исследование с помощью ультрафиолетовых лучей позволяет увидеть либо интегральное свечение лака, красочного слоя и грунта, либо этих частей в отдельности на открытых участках грунта и красочного слоя. Это, в свою очередь, дает исследователям возможность определить некоторую информацию о полотне:

1. Степень реставрационного вмешательства.
2. Скрытые, угасшие надписи и подписи, сделанные железогалловыми чернилами, ртуть- и железосодержащими пигментами.
3. Ориентировочная дата создания картины на основе выявления некоторых датирующих пигментов (например, свинцовых белил, использовавшихся до XIX в.).
4. Информация о глубине залегания подписи (под лаком, между лаковыми слоями, поверх лака).

Большая часть полученных данных свидетельствует о возможности написания картины каким-либо художником. В совокупности с микроскопическим исследованием можно определить с большей точностью авторство данного произведения живописи.

В частности, для определения подлинности картины используются полученные данные о подписи: обычно художники расписываются на полусыром, "свежем" лаке, поэтому подпись может быть "утоплена". В случае подделки краска, использовавшаяся для

подписи, затекает в трещины лака или лежит поверх него.

1.2.3. Исследование в ИК-диапазоне излучения

Данное исследование проводится для уточнения результатов предыдущих этапов.

Использование инфракрасного диапазона излучения для исследования произведений живописи дает информацию, связанную с тем, что многие вещества и материалы не являются преградой для прохождения через них инфракрасного излучения. К их числу относятся лаки, загрязнения, тонкие слои записей и обновлений красочного слоя. Проходя эти слои, инфракрасные лучи меняют оптические характеристики вещества и способствуют более четкому восприятию рисунка изображения, надписей и других, скрытых от невооруженного глаза деталей, под непрозрачными слоями живописи.

Для проведения этого исследования необходимо направить на исследуемое произведение поток инфракрасного излучения, а затем с помощью электронно-оптических преобразователей трансформировать инфракрасное изображение в видимое.

С помощью инфракрасного изображения можно увидеть нижележащие слои живописи, которые позволяют определить оригинальность или вторичность полотна. Например, на основе анализа подготовительного рисунка можно сделать вывод о подлинности произведения: если рисунок свободный, без четких линий и с композиционными изменениями, то, скорее всего, работа является оригинальной. Если же подготовительный рисунок состоит из жестких линий, тщательно прорисованных границ светотени и контуров, то можно говорить о вторичности данного полотна.

1.2.4. Рентгенографический анализ

Данный этап исследования чаще всего проводится на начальных этапах экспертизы для получения предварительных данных о подлинности и авторстве произведения живописи.

Полученная в процессе рентгенографического исследования рентгенограмма содержит наглядные объективные данные о строении и степени сохранности художественного произведения.

Рентгенограмма содержит большой объем информации, который может в значительной мере помочь при вынесении экспертного заключения на предмет подлинности. Кроме того, рентгенограмма позволяет выявить послойную структуру произведения, начиная от основы, проклейки, нанесения грунта, последовательности нанесения живописных слоев, правок в процессе живописи. Например, на рентгенограмме хорошо виден нижележащий красочный слой, а также свинцовые и цинковые белила. Эта информация также помогает в определении авторства и датировке полотна.

Помимо этого на рентгенограмме отчетливо видна фактура произведения, ее особенности, позволяющие судить о подлинности произведения. Рентгенография выявит разницу в живописном почерке работ предполагаемого автора и почерка, которым написана исследуемая картина. Особенно важны тональные характеристики рентгенограмм, которые помогают точнее разобраться в соответствии исследуемого произведения с эталоном.

Безусловно, выводы на основании рентгенографических исследований возможны лишь при наличии базы эталонных данных (рентгенограмм других произведений предполагаемого автора).

1.2.5. Анализ фактуры изображения

На этапе анализа фактуры живописного произведения в качестве источников информации выступают главным образом макрофотографии отдельных частей полотна, а также его рентгенограммы. Исследуя эти источники, эксперт на основе их сравнения с банком эталонных данных может сделать вывод о принадлежности картины тому или иному автору.

Важными качественными показателями при анализе фактуры поверхности являются соотношение основы, грунта, красочных и лаковых слоев, технические приемы построения живописи, консистенция красок, конфигурация мазков, тип кракелюра, особенности художественных материалов и пр.

В результате анализа фактуры исследователи получают данные об индивидуальных почерковых особенностях художника, об использовании им конкретных художественных материалов и техники живописи. Полученные данные играют важную роль в экспертизе и определении авторства картины.

1.2.6. Анализ химического состава живописных материалов

Результаты проведения микрохимического анализа материалов, использовавшихся для написания картины (грунта, основных пигментов, связующего для красок), несут информацию как о времени создания произведения, так и об индивидуальных технических приемах конкретного художника и используемых им материалах.

Данные, полученные в процессе микрохимического анализа, следует рассматривать в комплексе с данными, полученными на предыдущих этапах экспертизы. Также для определения авторства картины необходимо сравнение всей полученной информации с банком эталонных данных.

2. Метод экспертизы произведений живописи с помощью частотного анализа и энтропии

Для определения авторства произведений изобразительного искусства и эпохи ее написания необходимо ее цифровое изображение. По данному изображению картины необходимо провести частотный анализ, т.е. получить ее разложение по цветовым диапазонам, а затем по полученным частотам вычислить значение энтропии.

Для исследования произведений изобразительного искусства необходимы цифровые изображения полотен картин в формате BMP. Этот формат был выбран из-за простоты в выделении цветовых пикселей в коде изображении, а также из-за отсутствия сжатия и потерь информации.

2.1. Структура BMP на примере 24-разрядного изображения

В качестве цифрового представления картин был выбран 24-разрядный формат BMP, поддерживающий 2^{24} различных оттенков. Такое количество цветов приблизительно соответствует количеству оттенков, которые может различать человеческий глаз.

В выбранном формате каждый пиксель кодируется тремя байтами, отвечающими за его цвет. Оттенок пикселя формируется в результате слияния трех цветов: красного (Red), голубого (Blue) и зеленого (Green), каждый из которых занимает один байт. Структура 24-

разрядного BMP-файла представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура BMP файла

Из рисунка видно, что файл формата BMP содержит следующие части:

1. Заголовок файла, включающий в себя информацию о формате файла (буквы BM), размер файла в байтах, а также смещение, с которого начинается собственно графическая информация.

2. Заголовок изображения, содержащий количество бит на пиксель, разрешение и размеры изображения, количество цветов и тип сжатия (для исследования нужно выбирать изображения без сжатия).

3. Палитра (в 24-разрядном BMP данное поле отсутствует).

4. Растр, состоящий из трехбайтовых кодов символов.

2.2. Получение частот цветов изображения

Чтобы провести частотный анализ изображения, необходимо определить, с какой частотой определен оттенок появляется на картине. Очевидно, что рассмотрение каждого из 2^{24} (16777216) цветов потребует существенных затрат ресурсов (времени и памяти компьютера). Исходя из этого, весь диапазон цветов (от 0_{16} до $FFFFFF_{16}$) следует разделить на отдельные группы цветов, опираясь на их подобие друг другу.

Наиболее показательным способом разделения на группы является деление диапазонов отдельных компонент цвета. Каждая компонента (Red, Green, Blue) с диапазоном от 0 до 255 делится на определенное число отрезков (k). Пересечение получившихся отрезков дает k^3 диапазонов, в каждом из которых

$$\frac{2^{24}}{k^3}$$

оттенков.

Наглядное изображение выбранного разделения с $k=4$ схематично представлено на рис. 2.

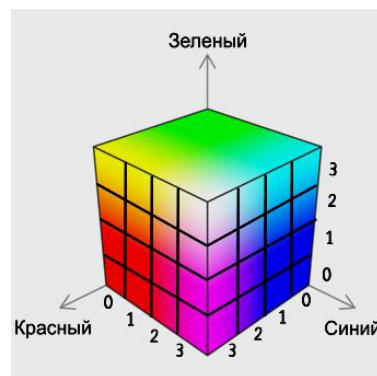


Рис. 2. Диапазоны цветов

Каждый диапазон компоненты нумеруется от 0 до $k-1$. В результате получаются "квадраты", номера которых получаются следующим образом: сначала записывается номер участка из диапазона красного, затем – зеленого, и в конце – синего. Например, номером участка, содержащего белый цвет ($FFFFFF_{16}$), является 333, а номер участка, соответствующего ярко-розовому цвету, – 303.

Для выбора необходимого количества диапазонов в каждой компоненте (k), были проанализированы результаты подсчета энтропий для нескольких художников при $k=8$ и $k=16$. В данном случае предпочтение отдавалось тому k , при котором наблюдалось наименьшее перекрытие диапазонов энтропии у двух различных авторов, т. е., при котором индивидуальные особенности авторов были более заметны.

На основании этого принципа было выбрано количество диапазонов, равное 16, однако при таком значении необходимо обрабатывать большой объем числовых данных. В частности, при $k=16$ результатом частотного анализа одной картины является 4096 чисел, безусловно, затрудняющих дальнейшую экспертизу.

Таким образом, диапазон каждой компоненты был разделен на 8 участков, пронумерованных от 0 до 7.

Для получения частот каждой из 256 групп цветов (от 000 до 777) необходимо для каждого пикселя определить, к какой группе он принадлежит, а затем подсчитать количество пикселей, относящихся к каждой группе. На основании полученных чисел можно по-

строить графическое представление распределения картины по цветам.

Пример проведенного частотного анализа отдельной картины (И.К. Айвазовский "Девятый вал") приведен на рис. 3.



Рис. 3. Частотный анализ картины

2.3. Вычисление энтропии Цифрового изображения

В качестве комплексного показателя индивидуальности художника предлагается использовать энтропию его картин. Для ее вычисления необходимы числовые данные предыдущего этапа – частотного анализа.

На основании количества цветов в каждом диапазоне вычисляется вероятность попадания пикселя в этот диапазон по формуле

$$p_i = \frac{n_i}{N}. \quad (1)$$

Затем по формуле Шеннона (2) вычисляется энтропия анализируемого изображения, показывающая, насколько упорядочены цвета на нем:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i. \quad (2)$$

Таким образом, небольшой показатель энтропии свидетельствует об использовании художником одного преобладающего цвета или диапазона цветов. При увеличении энтропии увеличивается и количество оттенков, предпочитаемых автором в данной картине. На основании этого и проявляются различия между художниками: каждый автор, как правило, использует определенные "любимые" цвета для создания картин, и их количество анализируется с помощью энтропии.

2.4. Определение авторства картины с помощью данных частотного анализа цветов и показателей энтропии

Как и в большинстве традиционных методов экспертизы произведений живописи, для работы предлагаемого метода необходимы определенные эталонные данные о художниках. Другими словами, необходимо провести частотный анализ нескольких картин каждого художника, а также вычислить их энтропии. В результате для каждого автора получатся определенные усредненные значения частот цветов, а также определенные уникальные диапазоны энтропии.

Полученные таким образом данные используются в дальнейшем для определения авторства произведения живописи: частоты цветов и энтропия картины неизвестного художника сравниваются последовательно с частотами и диапазонами энтропии различных авторов. На основании схожих распределений цветов и/или попадания значения энтропии в диапазон конкретного автора можно сделать вывод о принадлежности картины кисти того или иного художника.

3. Исследование показателей энтропии и частотный анализ картин художников XVII–XX вв.

3.1. Диапазоны энтропии

В ходе исследования были проанализированы работы семнадцати художников, живших и творивших в различные эпохи (с XVII в. до XX). Для каждого из них было выбрано двенадцать картин, наиболее ярко отражающих индивидуальность автора. В результате получились диапазоны энтропий, представленные на рис. 4.

Как можно видеть по показателям энтропии, для некоторых авторов и веков максимальный и минимальный показатель сильно разрознены, что может свидетельствовать о погрешности в вычислениях и небольшом наборе данных. Так, при увеличении количества данных разрозненность сокращается примерно на 1–3 %, что дает более точный результат при дальнейшем определении авторства и эпохи написания картины.

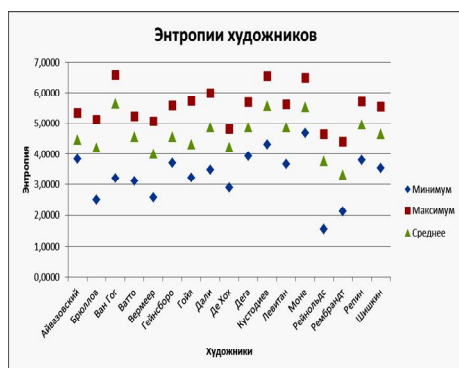


Рис. 4. Диапазоны энтропии различных художников

Определение авторства с помощью этих данных основывается на том, что значения энтропии имеют нормальный закон распределения. Для проверки этого факта были рассмотрены картины двух художников: И.К. Айвазовского и К.П. Брюллова. Для каждого из них было выбрано 50 картин и построено распределение энтропий по отрезкам.

На рис. 5 и 6 представлены результаты этого исследования: по ним видно, что можно считать распределение энтропии нормальным у каждого автора. Отклонения от нормального распределения (в частности, у Брюллова) в данном случае обусловлены включением в рассмотрение нетипичных для художника картин, например, с преобладанием темных цветов.

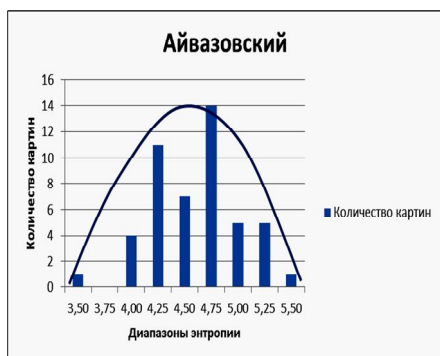


Рис. 5. Нормальное распределение (Айвазовский И.К.)

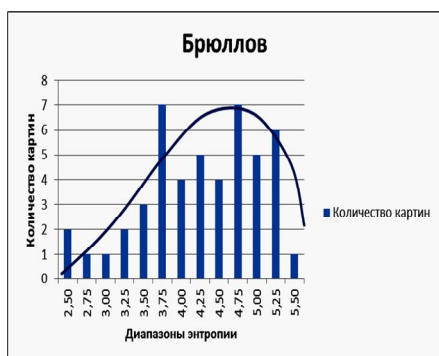


Рис. 6. Нормальное распределение (Брюллов К.П.)

С помощью нормального распределения картин можно определить, какому художнику принадлежит исследуемая картина с большей вероятностью. Для этого необходимо определить, в какой из диапазонов попадает ее энтропия, а затем — к какому пику распределения этот диапазон ближе. В примере, представленном на рис. 7, средние значения энтропий двух художников (пики) достаточно близки друг к другу, что затрудняет идентификацию автора. Однако для уточнения результатов анализа энтропии можно использовать результаты частотного анализа, рассмотренного ниже.

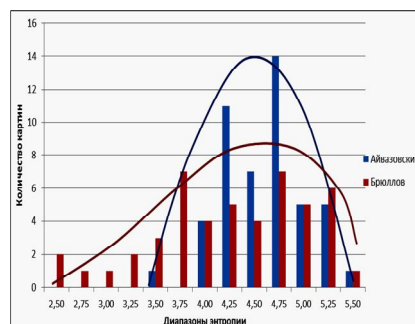


Рис. 7. Сравнение распределений энтропий художников

3.2. Изменение энтропии картин со временем

Важным вопросом в экспертизе картин является определение приблизительной даты создания живописного произведения. В связи с этим целесообразно определить, как меняется энтропия картин со временем.

Для этого были проанализированы энтропии картин различных годов создания. В результате было выявлено, что в среднем энтропия с течением времени линейно растет с коэффициентом 0,005 (см. рис. 8). Это главным образом связано с изменением преобладающего стиля в живописи: если в XVII в. это стиль барокко, затем сменившийся классицизмом, то XIX–XX в. характеризуются изобилием стилей (импрессионизм, неоимпрессионизм, кубизм, сюрреализм), и, как следствие, изобилием используемых красок и цветов.

С помощью этих данных в отдельных случаях можно приблизительно определить период написания произведения с точностью до века. Более точное определение невозможно в связи с тем, что коэффициент роста незначителен, а также много значений энтропии сильно отклоняется от построенной прямой.



Рис. 8. Изменение энтропии со временем

3.3. Изменение энтропии с изменением объема выборки

В энтропии, как и в частотном анализе, важную роль играет количество картин, хранящихся в базе. Сравним энтропии для художников Алексева и Бегрова с разным количеством данных.

Как и в частотном анализе, с увеличением количества выборки уменьшается диапазон энтропии картин, принадлежащих кисти одного художника, что свидетельствует о более точном определении истинного автора того или иного произведения изобразительного искусства.

На рис. 9 представлена энтропия для 3 картин художников, а на рис. 10 представлена энтропия для 10 картин художников.

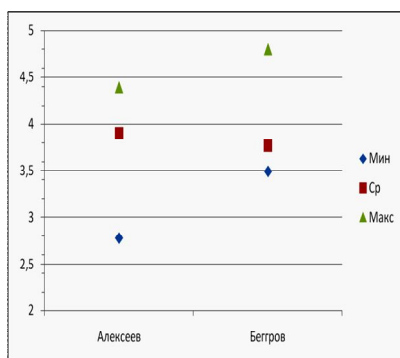


Рис. 9. Энтропия для 3 картин

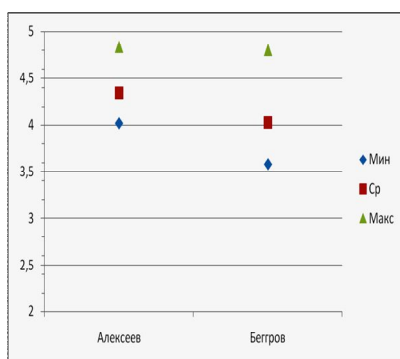


Рис. 10. Энтропия для 10 картин

3.4. Изменение энтропии с изменением качества цифрового отпечатка

Существенным вопросом в компьютерной обработке изображений является их качество. Несмотря на то, что выбранный формат BMP не предусматривает потерь качества, от его разрешения (количества пикселей по горизонтали и по вертикали) зависит общее количество пикселей в изображении, а значит, и точность исследования.

Для анализа влияния качества растрового изображения на его энтропию были рассмотрены картины четырех художников (Моне, Дали, Дега и Ван Гога), представленные в пяти разрешениях (в процентах от исходного). В результате было обнаружено, что с изменением качества изображения средние значения энтропий меняются незначительно (от 0,28 до 0,84). В таблице представлены изменения средних энтропий картин художников с изменением качества.

Зависимость энтропии от качества

Автор	Исходное	90%	80%	70%	60%	Разность
Моне	5,528	5,510	5,498	5,483	5,462	0,066
Дали	4,873	4,868	4,863	4,856	4,845	0,028
Дега	4,868	4,862	4,856	4,850	4,840	0,028
Ван Гог	5,647	5,626	5,611	5,591	5,563	0,084

Таким образом, с уменьшением разрешения изображения среднее значение энтропии картин уменьшается не более чем на 0,1 (менее 1 %).

3.5. Частотный анализ

В комплексе с анализом энтропии картины необходимо использовать данные частотного анализа, чтобы уточнить результаты предыдущих этапов.

Для иллюстрации различий между авторами в используемых красках были построены распределения цветов для всех рассмотренных художников. На рис. 11–13 представлены распределения цветов в картинах трех художников: Клода Моне, Исаака Левитана и Рембрандта соответственно.

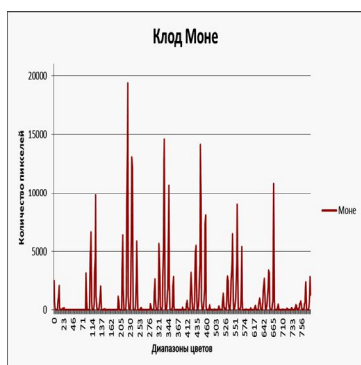


Рис. 11. Частотный анализ картин Клода Моне

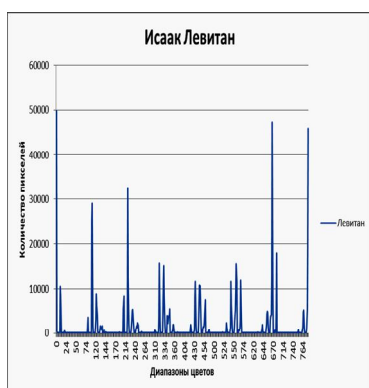


Рис. 12. Частотный анализ картин Исаака Левитана

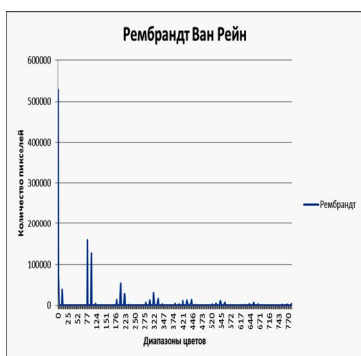


Рис. 13. Частотный анализ картин Рембрандта

Сравнивая приведенные диаграммы, нетрудно убедиться, что у каждого из этих художников есть свои "любимые" цвета, которые они используют в своих картинах. Таким образом, с помощью данных частотного анализа на основе сходства и различия использованных цветов можно делать вывод о принадлежности картины тому или иному художнику.

3.6. Применение метода определения авторства на примере картины Яна Вермеера "Девушка, читающая письмо у открытого окна"

Для проверки работы предлагаемого метода целесообразно рассмотреть картину, ко-

торая приписывалась нескольким авторам. С учетом рассмотренных в исследовании авторов была выбрана картина голландского художника Яна Вермеера "Девушка, читающая письмо у открытого окна" (см. рис. 14), написанная в 1657 г. В разное время данное произведение приписывалось другим авторам: Рембрандту и Питеру де Хоу, но окончательно принадлежность полотна Вермееру была установлена в 1862 г.

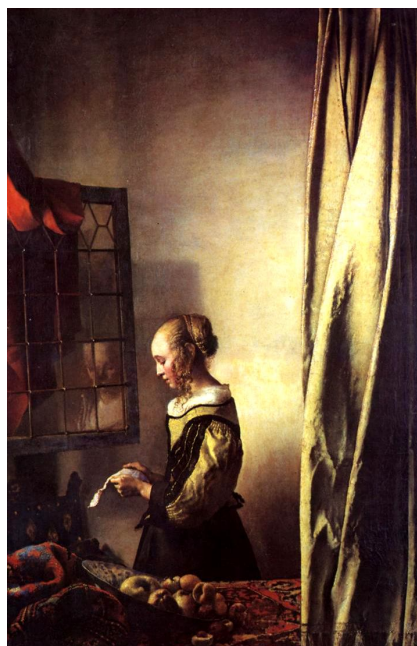


Рис. 14. Вермеер "Девушка, читающая письмо у открытого окна"

Как уже было сказано выше, чтобы определить, какому художнику принадлежит картина, сначала необходимо сравнить ее "спектр" с распределением цветов вышеупомянутых мастеров. Последовательное сравнение представлено на рис. 15, 16 и 17.



Рис. 15. Сравнение цветов картины с усредненными частотами для Вермеера

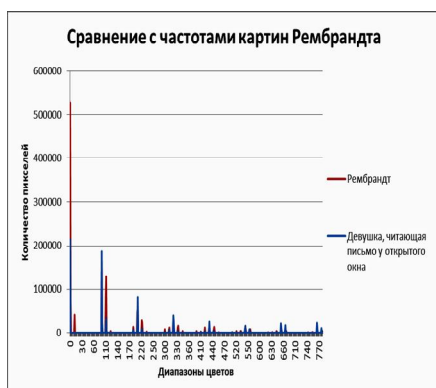


Рис. 16. Сравнение цветов картины с усредненными частотами для Рембрандта

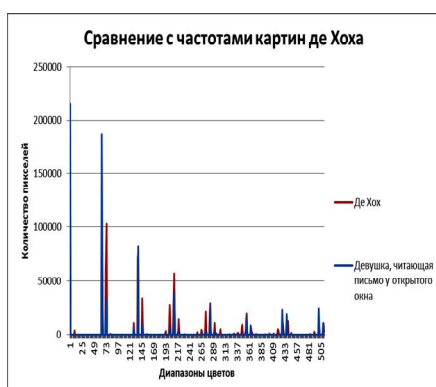


Рис. 17. Сравнение цветов картины с усредненными частотами для де Хоха

Как видно из диаграмм, в данном случае анализ частот встречаемости цветов не дает существенных результатов, так как все перечисленные художники в основном использовали одни и те же оттенки в своих картинах. Если визуально оценить произведения великих голландских мастеров XVII в., можно убедиться, что в большинстве полотен преобладают темные и коричневые оттенки, поэтому частотный анализ в случае сравнения этих художников существенно затруднен.

В связи с этим необходимо сравнить показатели энтропии картины и трех перечисленных художников. Данное сравнение представлено на рис. 18.

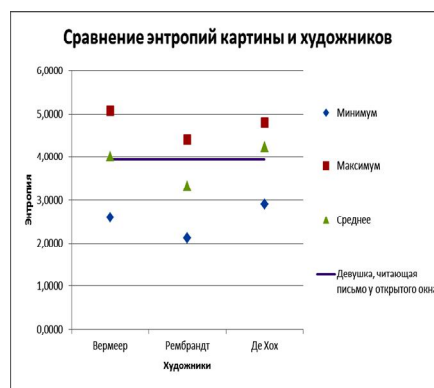


Рис. 18. Энтропия картины, наложенная на диапазоны энтропии художников

Из рис. 18 видно, что энтропия рассматриваемой картины ближе всего к среднему значению энтропии картин Яна Вермеера, поэтому, учитывая нормальное распределение энтропии, можно утверждать, что данная картина принадлежит кисти Вермеера.

Таким образом, в данном случае результаты исследования показателей энтропии совпадают с результатами экспертизы, проведенной с помощью технических и искусствоведческих методов.

Заключение

В результате проведенного исследования был разработан эффективный метод экспертизы произведений живописи, основанный на анализе используемых цветов и энтропии.

Несмотря на то, что данный метод имеет относительно большую вероятность ошибки, его можно использовать для первичного анализа произведений живописи, так как примерно в 73 % случаев он дает результат, соответствующий действительности. Кроме того, при увеличении числа рассмотренных картин величина возможной ошибки будет уменьшаться, что обеспечит перспективу развития предложенного метода.

Список литературы

1. Социальный специализированный интернет-ресурс содействия в сфере сохранения, консервации и реставрации материальных памятников культуры. URL: <http://art-con.ru/node/1755> (дата обращения: 3.10.2016).
2. Иоханнес Иттен. Искусство цвета. М.: Издат. Д. Аронов, 2010. 96 с.

3. Скотт Келби, Цифровая фотография. Т.1. М.: Издат. Вильямс, 2010. 256 с.
4. Стратонович Р.Л. Теория информации. М.: Издат. группа "Сов. Радио", 1975. 424 с.

Art pieces attribution based on the color frequency analysis and digital prints entropy

A. A. Klimov, E. V. Ovchinnikova, A. P. Shkaraputa

Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

klimovalexander@hotmail.com

shkaraputa@psu.ru

ek.ovchinnikova94@yandex.ru

The article is focused on studying the correlation between the frequency of colors used by an artist to create works of art and entropy of these works, on the one hand, and their authorship and the period of creation, on the other hand. An overview of methods used to examine artworks in modern expertise centers is given. A less expensive method of art attribution and proof, based on identifying color distribution ranges along with entropy of an artwork's digital prints, is proposed with the consideration of disadvantages of the existing techniques. The hypothesis is tested on art pieces created by Russian and foreign artists in the 17th – 20th centuries. The range of entropy values for artworks and average color frequency in paintings are found for each artist under study. The research shows normal distribution of the paintings' entropy. The dependence of the entropy on the creation period and digital print quality are analyzed as well. The values received show that certain artists used certain color patterns depending on the period of creation. It allows for performing attribution analysis and checking attribution of a particular painting to a particular artist. By the example of *Girl Reading a Letter at an Open Window* by Johannes Vermeer, it is shown how entropy data enables one to attribute a painting to an artist.

Keywords: range; BMP; entropy; RGB; frequency analysis.