



УДК 519.876.5

DOI: 10.15393/j2.art.2014.2841

Статья

Разработка метода оптического анализа изображения поверхности образца древесно-цементного композита

Владимир Б. Ефлов^{1,*}, Владимир С. Копарев¹ и Сергей Б. Васильев¹

¹ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, 185910 Петрозаводск, Россия; E-Mails: veflov@psu.karelia.ru (В.Б.Е.); vladimir_volk@inbox.ru (В.С.К.); servas@psu.karelia.ru (С.Б.В.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: veflov@psu.karelia.ru
Тел.: +7(814-2) 571939; Fax: +7(814-2) 711000

Получена: 05 ноября 2014 / Принята: 10 ноября 2014 / Опубликовано: 10 ноября 2014

Аннотация: Отходы окорки сырья на целлюлозно-бумажном комбинате можно использовать для изготовления строительных материалов. В работе приводятся принципы построения методики оценки свойств древесно-цементных композитов на основе анализа изображений их поверхности. Установлено, что изображения боковых граней образцов древесно-цементного композита, полученные при определенных параметрах освещения, характеризуются анизотропией оптической плотности. Анализ фрактальных размерностей изображений поверхностей верхней, нижней, а также боковых граней показывает, что их структура зависит от способа формования образцов древесно-цементного композита. Полученные результаты позволяют надеяться на то, что в дальнейшем удастся разработать методику неразрушающего контроля прочности образцов данного класса.

Ключевые слова: композиты древесно-цементные, изображение поверхности, анализ изображений, оптическая плотность, фрактальная размерность

DOI: 10.15393/j2.art.2014.2841

Article

Development of technique of wood-cement composite surface optical image data analysis

Vladimir B. Eflov^{1*}, Vladimir S. Koparev¹ and Sergey B. Vasilyev¹

¹ Petrozavodsk State University, Lenin av., 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; E-Mails: veflov@psu.karelia.ru (V.B.E.); vladimir_volk@inbox.ru (V.S.K.); servas@psu.karelia.ru (S.B.V.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: veflov@psu.karelia.ru
Тел.: +7(814-2) 571939; Fax: +7(814-2) 711000

Received: 05 November 2014 / Accepted: 10 November 2014 / Published: 10 November 2014

Abstract: Barking waste at a pulp and paper mill can be used for construction materials fabrication. The paper presents principles of an estimation technique based on image analysis of the surface for assessing wood-cement composites properties. Images of side faces of wood-cement composites samples obtained under certain lighting parameters are characterized by optical density anisotropy. Analysis of fractal dimensions of images of top, bottom, and side faces surfaces shows that their structure depends on the molding process of a wood-cement composite. The results obtained allow us to hope that a method of nondestructive testing the sample strength of such materials could be developed in future.

Keywords: wood-cement composite, image data of surface, optical analysis, optical density, fractal dimension

1. Постановка проблемы

В работе [52] отмечалось, что задачи рационального природопользования требуют изучения вопросов уменьшения количества отходов на стадии древесно-подготовительного цикла (далее в тексте ДПЦ) целлюлозно-бумажных комбинатов (далее в тексте ЦБК), а также экономически эффективного использования этих отходов.

Сырье поступает на ЦБК в виде бревен длиной от 3 до 6 м. Это обусловлено видом транспорта, с помощью которого оно доставляется на предприятие. Технология групповой окорки, используемая на ЦБК, предусматривает подачу в корообдирочный барабан мерных отрезков – балансов, длина которых колеблется от 1,2 до 1,5 м в зависимости от требований производства. Таким образом, перед подачей в ДПЦ бревна должны быть распилены на балансы. При раскряжевке бревен образуются отходы в виде опилок – до 0,85 % от объема распиливаемых бревен [34].

Очистка древесины от коры на ЦБК осуществляется с помощью корообдирочных барабанов. По результатам исследований этот процесс, в случае использования елового сырья, сопровождается образованием отходов в количестве до 20 % от общего объема сырья [53]. В состав отходов входят кора, сколы, лом. Считается, что в общем объеме отходов доля коры составляет от 83 до 69 % в зависимости от качества, поступающего в барабан сырья. Большое влияние на количество отходов окорки оказывают: качество перерабатываемого сырья, конструктивные особенности барабана и технологические характеристики процесса [14, 19, 26, 36]. Качество сырья, поступающего на ЦБК, неуклонно снижается [22, 44]. В переработку все больше вовлекается тонкомерная древесина. Ее окорка в барабанах приводит к росту отходов в виде сколов и лома [38, 42, 43, 47, 48]. Желание повысить эффективность процесса привело к созданию барабанов, внутренняя поверхность которых оснащена «интенсификаторами». Однако их использование повышает жесткость корпуса барабана и неизбежно ведет к росту потерь в виде сколов и лома древесины [23, 37].

В настоящее время на всех ЦБК Северо-западного региона России осуществляется сухая окорка древесины. Однако даже при этом способе окорки удельный расход воды составляет до 0,5 м³ на плотный кубометр сырья. При обработке мерзлой древесины расход воды возрастает до 1 м³, а пара до 25 кг. Результатом этого является необходимость отделения твердых отходов от воды и их последующее обезвоживание для дальнейшей переработки. Первичное обезвоживание, то есть отделение твердых отходов от воды, проводится чаще всего в дренирующих конвейерах. Влажность коры, выделенной на конвейерах, может достигать 82 %. Дальнейшая переработка отходов, состоящих из смеси коры, сколов и лома древесины, включает в себя их измельчение и обезвоживание методом прессования. На выходе этого технологического процесса имеем отходы, влажность которых может быть снижена до 50 % [53]. Их использование для производства целлюлозы невозможно из-за большого содержания коры.

Вода, отделенная в ходе описанных выше операций, подается на очистку в отстойники. В них происходит разделение загрязненной воды на воду пригодную для повторного

использования и осадок. Осадок вычерпывается из отстойников и подается на специальные фильтры, где обезвоживается с образованием скопа. Скоп – сгусток из мелких кусочков коры, древесины и минеральных примесей, уловленный сеткой фильтра. Он представляет собой спрессованную массу влажностью около 78 %.

Процесс производства технологической щепы из окоренных балансов в рубительной машине сопровождается образованием до 7 % отходов в виде мелких древесных частиц, которые нельзя использовать для производства целлюлозы. Кроме того процесс измельчения окоренной древесины сопровождается образованием до 5 % сверхкрупных частиц древесины, которые также не могут использоваться в основном процессе производства целлюлозы. Доля упомянутых некондиционных частиц может колебаться в широком диапазоне в зависимости от качества измельчаемой древесины, технологических параметров процесса окорки и технического состояния оборудования [1, 4, 5, 7, 8, 11, 15, 24, 49, 50]. Поэтому щепы, произведенная рубительной машиной, поступает для фракционирования на сортировку щепы. Конструктивные особенности и технологические регламенты не позволяют отделить с помощью сортировок все некондиционные частицы [6, 9, 12, 17, 39, 41, 54]. Часть сверхкрупных проходит через верхнее сито и смешивается с кондиционной щепой, в то время как часть мелких частиц не успевает за время процесса сортирования отсестаться из кондиционной фракции [12, 20]. Однако после операции сортирования щепы из общего потока выделяется до 5 % мелкой фракции и до 4 % крупной. Крупная фракция на ЦБК повторно измельчается с целью получения из нее кондиционной щепы. Этот процесс в зависимости от применяемого оборудования приводит к образованию от 40 до 60 % кондиционной щепы [10]. Остальная часть некондиционной крупной фракции превращается в мелкую. Таким образом, можно говорить о том, что около 7 % перерабатываемой на щепу древесины превращается в мелкие древесные частицы, которые в основном технологическом процессе производства целлюлозы использованы быть не могут. В ряде работ, проведенных ранее в Петрозаводском университете, изучались процессы сортировки щепы и формирования фракций, а также некоторые механические характеристики, полученные из модельных представлений [13, 17, 28, 29].

Суммируя все вышеизложенное, можно утверждать, что при производстве целлюлозы на ЦБК до 20 % поступающего на предприятие сырья превращается в безвозвратные потери, которые в настоящее время используются для сжигания. Учитывая, что даже небольшой ЦБК потребляет около 100 тысяч м³ древесного сырья в месяц, общий объем отходов может составлять до 20 тысяч м³. На наш взгляд, экономически эффективным было бы использование этих отходов не только в качестве топлива, но и в качестве сырья для изготовления конструкционных и теплоизоляционных материалов, применяемых в малоэтажном строительстве [35, 42, 46].

В настоящее время в Петрозаводском университете проводятся экспериментальные исследования по поиску оптимальных характеристик композитных материалов на основе цемента и отходов, получаемых на стадии ДПЦ. Для полученных образцов композитов

требуется быстрые и адекватные методы оценки механических свойств. Известно [40, 60], что некоторые физические характеристики композитных материалов, зависят от их морфологии, т.е. от размера, формы и пространственной ориентации включений, в данном случае древесных отходов ДПЦ. Изменение морфологии композита, за счет изменения фракционного состава включений, может приводить к изменениям их механических, функциональных свойств в достаточно широком диапазоне изучаемых, а также требуемых параметров конечного продукта.

Ранее в работах [16, 18, 30, 31, 33] была выдвинута гипотеза о том, что древесно-цементные композиции можно представлять в виде изотропного материала, имеющего фрактальную структуру. Это позволило бы принять в качестве критерия для отбора образцов результаты анализа структуры их поверхности.

В работах Дж. Серра (J. Serra) и ряда других исследователей получила развитие математическая морфология [55, 61, 62], которая позволила сформулировать новые алгоритмы обработки изображений, которые в дальнейшем были имплементированы в программные продукты и интегрированные среды, предназначенные для научных исследований. Существующее программное обеспечение, позволяющее анализировать изображения на предмет определения его структурированности. Проблема заключалась в том, что было не ясно, является ли поверхность образцов на самом деле структурированной, а также каковы должны быть условия фотографирования и обработки полученных изображений, позволяющие проводить упомянутые выше оценки.

Далее в статье приводится описание методов цифровой обработки изображений поверхности образца древесно-цементной композиции и результаты, полученные с его помощью. По результатам работы удалось определить структурные особенности материала, которые, в свою очередь, могут влиять на его механические свойства.

2. Материалы и методы

2.1. Образец древесно-цементной композиции

Объектом исследования являлись образцы, изготовленные из древесно-цементной композиции. В качестве древесной компоненты использовались отходы древесно-подготовительного производства целлюлозно-бумажного комбината, которые представляют собой смесь измельченных отходов окорки, отсева и скопа (далее по тексту смесь).

Фракционный состав древесной компоненты определялся с помощью набора сит, расположенных друг над другом. Сито представляет собой короб, имеющий обечайку в виде кольца диаметром 400 мм, к которому в виде дна прикреплен металлический лист с круглыми отверстиями, рис. 1. Диаметр отверстий уменьшался от верхнего сита к нижнему. Под нижним ситом устанавливался поддон, на котором собирались частицы прошедшие через все сита сверху донизу.

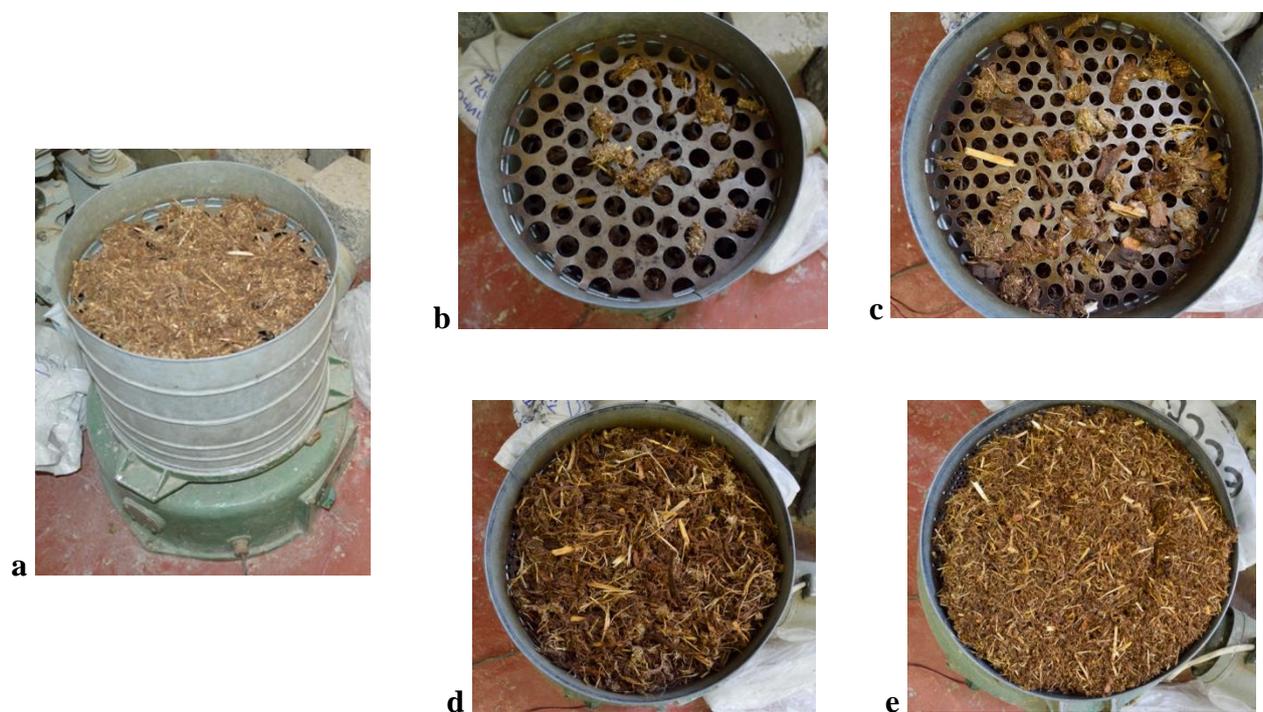


Рисунок 1. Анализатор для определения фракционного состава древесной компоненты: **a** – в сборе, **b** – остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм, **c** – остаток на сите с отверстиями диаметром 20 мм, **d** – остаток на сите с отверстиями диаметром 10 мм, **e** – остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм

Перед началом фракционирования на верхнее сито высыпалась навеска анализируемой смеси массой 2 кг. Затем всему набору сит придавались круговые колебания амплитудой 20 мм и частотой – $3,5 \text{ с}^{-1}$. Фракционный состав смеси представлен в таблице 1. Остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм разбирался вручную. Если оставшиеся частицы по наибольшему размеру проходили через сито, то их присоединяли к остатку на сите с отверстиями диаметром 20 мм.

Таблица 1. Фракционный состав отходов ДПП

древесная компонента	масса остатков на ситах с отверстиями диаметром, мм, в %				
	30	20	10	5	0
смесь	0	7,2	38,4	27,3	27,1

В качестве цемента использовалось порошкообразное вещество, имевшее химический состав, приведенный в таблице 2. Анализ фракционного состава, проведенный методом лазерной дифракции, показал что диаметр частиц порошка находится в пределах от 3 до 230

мкм. Газовая хроматомасс-спектрометрия с отбором равновесной паровой фазы над пробой летучих органических примесей в образцах не обнаружила.

Таблица 2. Результаты анализа образцов цемента рентгенофлуоресцентным методом по способу фундаментальных параметров

Наименование показателя	Массовая доля
кальций в пересчете на CaO, %	58,600
кремний в пересчете на SiO ₂ , %	21,800
сера в пересчете на SO ₃ , %	6,900
алюминий в пересчете на Al ₂ O ₃ , %	4,600
магний в пересчете на MgO, %	3,600
железо в пересчете на Fe ₂ O ₃ , %	2,900
калий в пересчете на K ₂ O, %	0,910
титан в пересчете на TiO ₂ , %	0,480
марганец в пересчете на MnO, %	0,110
стронций в пересчете на SrO, %	0,085
ванадий в пересчете на V ₂ O ₅ , %	0,024
медь в пересчете на CuO, %	0,023
цинк в пересчете на ZnO, %	0,017
цирконий в пересчете на ZrO ₂ , %	0,017
мышьяк в пересчете на As ₂ O ₃ , %	0,005
рубидий в пересчете на Rb ₂ O, %	0,003
итрий в пересчете на Y ₂ O ₃ , %	0,002

Из древесно-цементной смеси, после добавления воды, сульфата алюминия и жидкого стекла, готовилась бетонная смесь. Состав бетонной смеси для изготовления образцов приведен в таблице 3. Бетонная смесь готовилась следующим образом. Взвешивалось 3 % от массы заполнителя $Al_2(SO_4)_3$ (сульфат алюминия или сернокислый алюминий) и разводилось в воде до момента полного растворения (примерно 3 часа). В емкость с заполнителем (древесной компонентой) заливалась вода с раствором $Al_2(SO_4)_3$. Заполнитель вымачивался сутки. Далее в эту емкость добавлялся цемент, и все перемешивалось до однородной консистенции. Взвешивалось 10% от массы цемента жидкого стекла $(Na_2O(SiO_2)_n)$ и перемешивалось с водой необходимой для раствора. Раствор представлял собой однородную массу.

Таблица 3. Состав бетонной смеси для изготовления образцов

Древесный материал (заполнитель)		Цемент, кг	H ₂ O, кг	Al ₂ (SO ₄) ₃ , кг	Na ₂ O(SiO ₂) _n , г
вид	масса, кг				
смесь	203	486	411	6	49
смесь	203	543	473	6	54
смесь	203	600	536	6	60

Из бетонной смеси в соответствии с ГОСТ 10180-90 изготавливались образцы в виде кубов с длиной ребер – 70 мм. Образцы изготавливались методом отливки в опалубку (Рис. 2). Ячейка опалубки заполнялась раствором на 1/3 и трамбовалась ударами стального бруска, зажатого в руке. Удары наносились с высоты примерно 150 мм от поверхности раствора в форме. Размеры бруска размером 200×50×50 мм. Затем укладывался еще один слой раствора такой же по толщине и также трамбовался. Раствор укладывался и трамбовался до того момента пока высота утрамбованной смеси не становилась равной высоте стенки опалубки или выше.

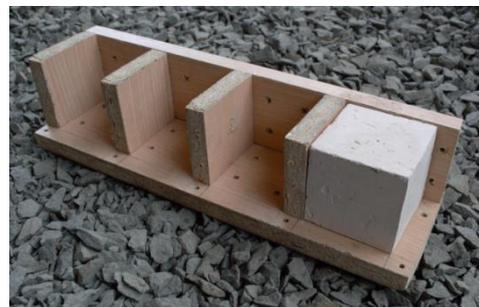


Рисунок 2. Опалубка для изготовления образцов бетона из древесно-цементной смеси (слева) и распалубленный образец (справа)

Распалубка образцов производилась через 24 часа. После этого образцы до начала фотографирования укладывались на прокладки. Фотографирование осуществлялось через 28 суток после изготовления образца.

2.2. Методика получения изображения поверхности

Изображения поверхности образца получали с помощью бытовой фотокамеры. Формат изображений RAW. Образец устанавливался на черном фоне и освещался коллимированным источником света (Рис. 3). Угол под которым производилось освещение образца, α , менялся в процессе съемки от 10 до 60°



Рисунок 3. Метод получения изображений поверхности образцов.

3. Процедура обработки изображений и ее результаты

На рисунке 4 представлено первичное изображение боковой грани образца древесно-цементной композиции, полученное при освещении коллимированным источником света под углом $\alpha=10^\circ$. Т.к. размер не кратен степени двух, то на изображении, полученном при различных параметрах освещения, вырезалось окно размером 2048 x 2048 (максимальная степень 2-х, обеспечивающая окно целиком лежащее на изображении). Начальное положение выбиралось из соображений однородности изображения в области окна, степень однородности оценивалась визуально. Далее окно сдвигалось вдоль образца в несколько положений отличных от верхнего левого угла, так чтобы после сдвига правый нижний угол оставался в пределах изображения. Сдвиг осуществлялся дискретно на 100 пикселей по каждой из координат вдоль главной диагонали образца, x . Учитывая, что за начало системы координат в графических системах обработки изображений принималась точка в верхнем левом углу, то движение осуществлялось вдоль главной диагонали первого координатного квадранта: слева направо и сверху вниз. Так были получены окна кадрирования с 1 по 8. Вторая серия изображений получена аналогично, но фиксация окон осуществлялась со сдвигом вдоль диагонали перпендикулярной главной (далее по тексту – «дополнительная диагональ»). Начало дополнительной диагонали, y , совпадало с началом однородной области в правом верхнем углу изображения образца. Таким образом движение окон изображения по дополнительной диагонали осуществлялось справа налево и сверху вниз. В результате этого были получены окна кадрирования с 9 по 16. При реализации полной процедуры получены шестнадцать изображений поверхности образца, по восемь изображений вдоль каждой диагонали.



Рисунок. 4 Первичное изображение образца: x – главная диагональ, y – дополнительная диагональ.

На рисунке 5 приведены примеры кадрированных изображений. Изображения крайних образцов вдоль каждой из диагоналей, т.е. в первом ряду находятся первый и восьмой кадр главной диагонали, во втором девятый и шестнадцатый – дополнительной диагонали.

Для первоначальной обработки изображений использовались два пакета GNU/R и GNU/Octave, распространяемых по лицензии GNU/GPL [56, 58]. Система статистического анализа **R** (R-cran) - бесплатный аналог коммерческой системы **S+** (GNU S). GNU Octave это свободно распространяемый язык программирования высокого уровня, ориентированный на проведение численных расчетов, который является альтернативой коммерческому пакету MatLab. Оба пакета, системы имеют кроссплатформенную реализацию, например, для MS Windows и Linux. Оба пакета, начиная с некоторых версий, имеют локализованные интерфейсы. Существуют графические оболочки пакетов, которые, однако, снижают их функциональность. Для более эффективного использования и разработки приложений удобнее использовать консольные интерфейсы. Также для реализации некоторых алгоритмов использовались программные имплементации алгоритмов из библиотек CERNLIB и CPC, известных и широко распространенных пакетов для научных вычислений. Все пакеты и библиотеки верифицированы многолетним применением в научных исследованиях, что повышает достоверность полученных результатов. Достоверность вычислений также

подтверждается сопоставлением результатов, полученных с помощью каждого из двух упомянутых пакетов.

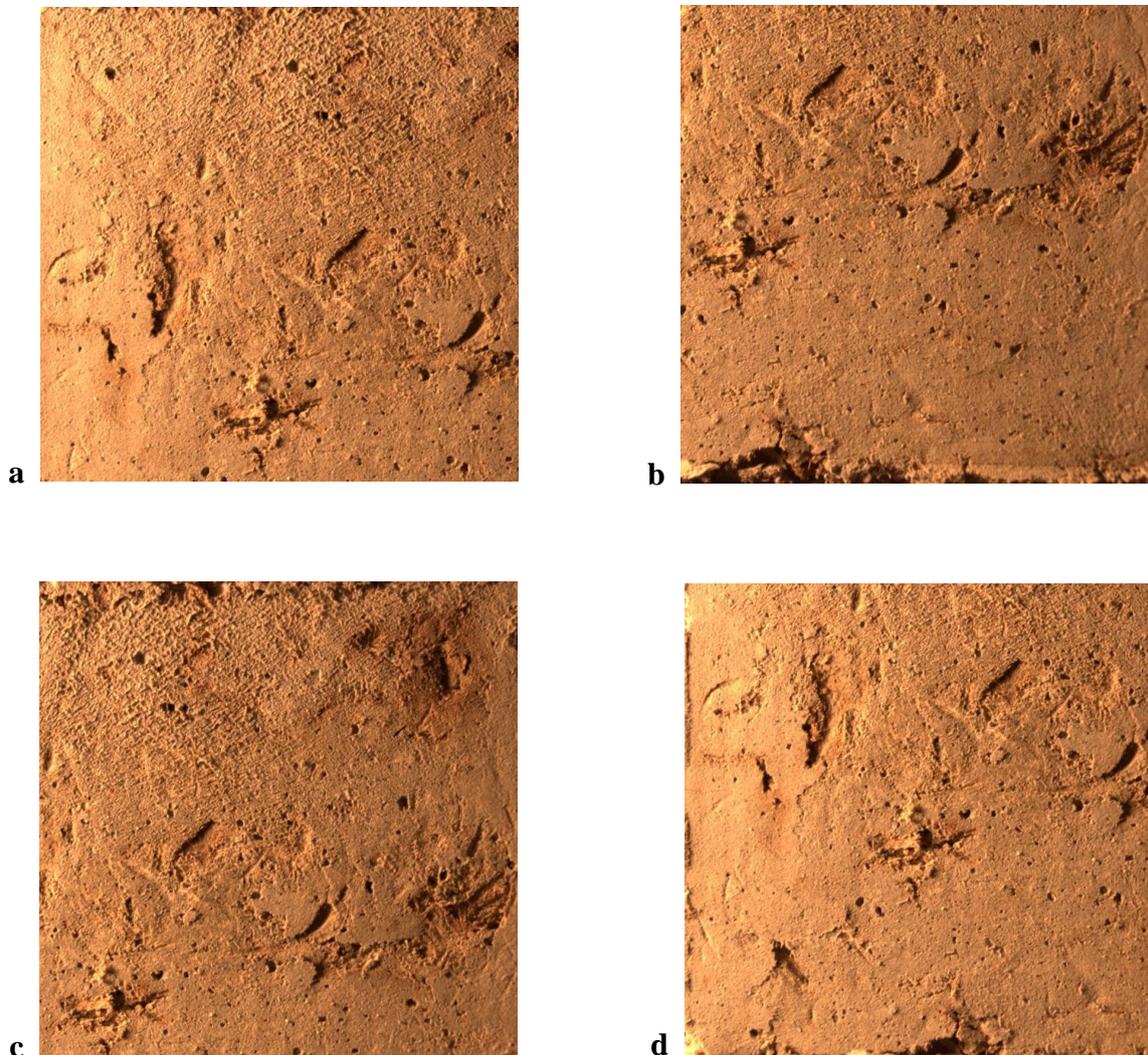


Рисунок 5. Примеры кадрированных изображений: **a** и **b** – соответственно первый и восьмой кадры главной диагонали; **c** и **d** – соответственно девятый и шестнадцатый кадры дополнительной диагонали

В силу некоторых отличий в реализации и в условиях использования лицензий, обработка изображений проводилась как в среде операционной системы Windows 7, так и в среде Linux Debian 7.4.

Рассмотрим работу с изображениями композита, исходный образ которого представлен на рисунке 4.

В обеих средах существуют пакеты (библиотеки) для импорта изображений в цифровое представление. Рассмотрим более подробно библиотеки из среды R, в которых есть

несколько различных реализаций алгоритмов работы с образами. Удобно использовать библиотеку EBImage,

Загрузка библиотеки обработки изображений осуществляется командой:

```
library("EBImage")
```

Информацию о библиотеке можно получить консольной командой:

```
>citation("EBImage")
```

```
Gregoire Pau, Andrzej Oles, Mike Smith, Oleg Sklyar and  
Wolfgang
```

```
Huber (). EBImage: Image processing toolbox for R. R package  
version 4.6.0.
```

Здесь и далее фрагменты кода выделены шрифтом Courier New, а символом “>” приглашение (prompt) консоли пакета R.

Импорт изображения осуществляется следующими командами библиотеки:

```
>f = system.file("images", "home/user/work/1.jpg",  
package="EBImage")
```

```
> compoz01 = readImage(f)
```

или, вместо определения объекта *f*, импорт можно осуществить прямой ссылкой на объект файловой системы.

После импорта изображение во внутреннее представление пакета и библиотеки, соответственно, получается объект данных размерности $N \cdot M \cdot 3$, где N, M – размерность матрицы, соответствующая размерности изображения в пикселах, а третья компонента отвечает за один из каналов изображения. Таким образом произвольный элемент объекта – интенсивность данного элемента по данному каналу, определяемая значениями трех индексов. На данном этапе исследовались три канала RED, GREEN, BLUE. В определениях среды данный объект не является матрицей. Структура образа

```
Image
```

```
  colormode: Color
```

```
  storage.mode: double
```

```
  dim: 2048 2048 3
```

```
  nb.total.frames: 3
```

```
  nb.render.frames: 1
```

```
imageData(object)[1:5,1:6,1]:
```

```
  [,1]      [,2]      [,3]      [,4]      [,5]      [,6]  
[1,] 1.0000000 1.0000000 1.0000000 1.0000000 0.9960784 1.0000000  
[2,] 1.0000000 1.0000000 0.9960784 1.0000000 1.0000000 0.9921569  
[3,] 0.9960784 0.9960784 0.9960784 0.9882353 1.0000000 0.9882353  
[4,] 1.0000000 0.9921569 1.0000000 0.9960784 0.9882353 1.0000000  
[5,] 1.0000000 1.0000000 1.0000000 0.9960784 0.9921569 1.0000000
```

Далее в трех таблицах 4—6 приведены элементарные статистики окон изображений по главной диагонали.

Таблица 4. Элементарные статистики по каналу RED главной диагонали

Статистика	Номер окна							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее	0,773	0,757	0,739	0,722	0,707	0,693	0,682	0,664
Станд. отклонение	0,195	0,192	0,188	0,185	0,179	0,173	0,169	0,172
Медиана	0,796	0,769	0,749	0,729	0,710	0,694	0,682	0,667

Таблица 5. Элементарные статистики по каналу GREEN главной диагонали

Статистика	Номер окна							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее	0,499	0,485	0,469	0,454	0,443	0,433	0,425	0,412
Станд. отклонение	0,166	0,160	0,153	0,147	0,140	0,134	0,130	0,130
Медиана	0,498	0,482	0,467	0,455	0,443	0,431	0,424	0,417

Таблица 6. Элементарные статистики по каналу BLUE главной диагонали

Статистика	Номер окна							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее	0,283	0,274	0,264	0,254	0,247	0,241	0,236	0,229
Станд. отклонение	0,111	0,106	0,102	0,098	0,093	0,089	0,085	0,085
Медиана	0,282	0,271	0,263	0,255	0,247	0,239	0,235	0,227

Отметим, что в данных расчетах проводилась оценка устойчивости полученных вычислений и их зависимость от операционных систем и их разрядности. Расчет элементарных статистик по каналу RED проводился в упомянутых выше операционных системах с различной разрядностью, а также на процессорах с различной архитектурой. Отличий в результатах вычислений не наблюдалось для результатов представленных конечным числом значащих цифр, для одинарной точности, где точность понимается как точность в рамках стандарта IEEE754.

Данный анализ необходим, так как один из авторов работы сталкивался с разрушениями алгоритмов и потерей их устойчивости при смене разрядности системы и архитектуры процессора [30].

Приведем также сравнение интенсивностей по всем каналам для окон кадрирования, расположенных на главной диагонали (Рис. 6). Воспользуемся графическим представлением результатов в коробчатых диаграммах (жаргонное название в статистическом арго «ящики с усами», оригинальное – Box-whisker plot), т.е графике, который используется для наглядного представления в описательной статистике, с целью компактного представления результатов [3]. Границами ящиков (Рис. 6) служат первый и третий квантили распределений, а средняя линия – второй квантиль или медиана распределения. Размах представлен пунктирными линиями – «усами».

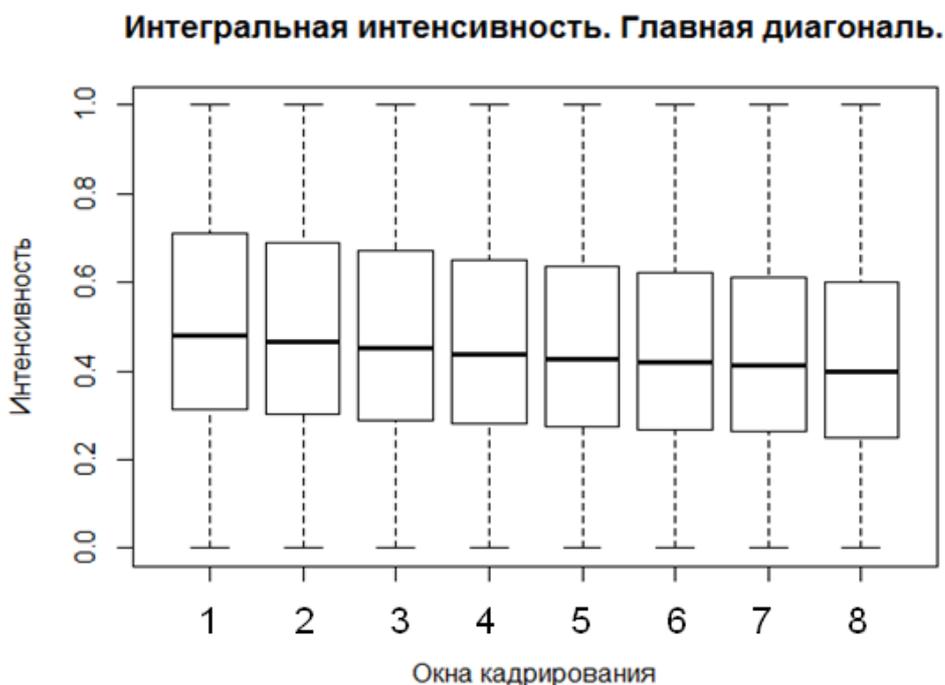


Рисунок 6. Коробчатая диаграмма интегральной интенсивности по окнам образца вдоль главной диагонали.

Рассмотрим далее статистики по каналам вдоль дополнительной диагонали (Табл. 7—9).

Сравнивая таблицу 4 с таблицей 7, можно обратить внимание, что интенсивность по каналу возрастает к левой границе образца, значения в окрестности центра для обеих диагоналей приблизительно совпадают. Расхождения объясняются, в частности, достаточно произвольным выбором начальных диагоналей точек и общей неоднородностью изображения.

Таблица 7. Элементарные статистики по каналу RED дополнительной диагонали

Статистика	Номер окна							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее	0,663	0,680	0,694	0,712	0,730	0,748	0,765	0,777
Станд. отклонение	0,189	0,188	0,189	0,188	0,186	0,183	0,182	0,184
Медиана	0,663	0,682	0,698	0,718	0,737	0,757	0,776	0,782

Таблица 8. Элементарные статистики по каналу GREEN дополнительной диагонали

Статистика	Номер окна							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее	0,410	0,422	0,433	0,447	0,461	0,476	0,490	0,499
Станд. отклонение	0,146	0,148	0,149	0,148	0,148	0,148	0,150	0,153
Медиана	0,408	0,420	0,431	0,447	0,459	0,476	0,490	0,502

Таблица 9. Элементарные статистики по каналу BLUE дополнительной диагонали

Статистика	Номер окна							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее	0,226	0,234	0,240	0,250	0,258	0,268	0,278	0,284
Станд. отклонение	0,097	0,098	0,099	0,099	0,098	0,099	0,100	0,102
Медиана	0,224	0,231	0,239	0,247	0,259	0,267	0,278	0,286

При сравнении значений статистик в каналах GREEN и BLUE наблюдаются эффекты аналогичные полученным по каналу RED.

Сравнение интенсивностей по всем каналам для окон кадрирования, расположенных на дополнительной диагонали представлено на рисунке 7.

Интегральная интенсивность. Дополнительная диагональ

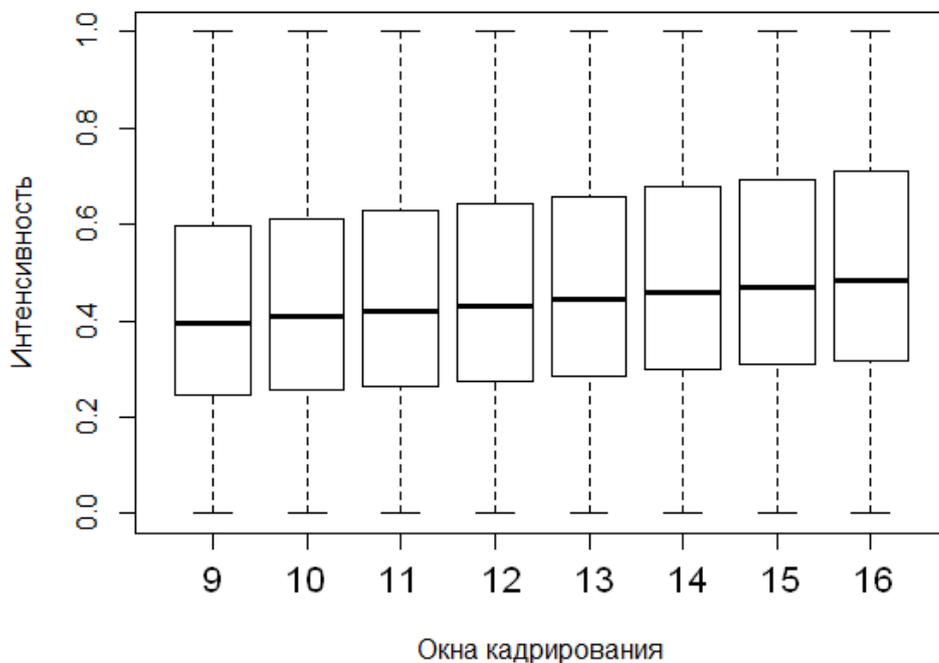


Рисунок 7. Коробчатая диаграмма интегральной интенсивности по окнам образца вдоль дополнительной диагонали

Оценим далее анизотропию изображения в двух выбранных направлениях, по обоим направлениям, так как условия освещения образца могут приводить к отличию статистических характеристик в зависимости от положения окон и условий съемки. В данном случае оценивается только анизотропия изображения образца в каналах RED, GREEN, BLUE.

Для оценки анизотропии по направлениям диагоналей, используем эмпирические функции распределения интенсивности в отдельных окнах изображения по заданным каналам. Сравним полученные функции распределения, используя известные статистические критерии (см., например, [21, 59]).

Оценим оптическую плотность в нескольких окнах. Будем использовать общепринятую последовательность проведения статистического теста. Для этого проверим сначала эмпирические распределения на нормальность при помощи Q-Q (Quantile-Quantile) теста по каждому из каналов, так как от класса распределения будут зависеть типы используемых тестов. Графики, полученные для каналов RED и GREEN, представлены соответственно на рисунках 8 и 9.

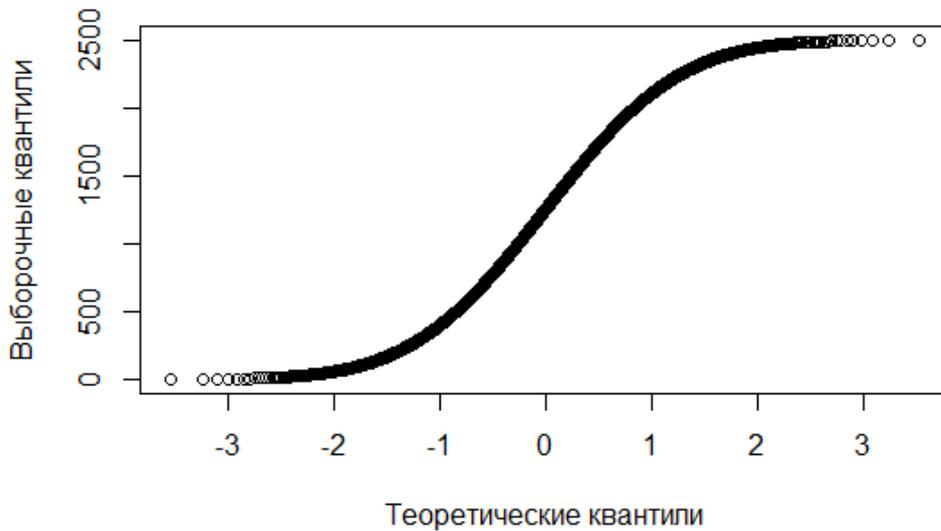


Рисунок 8. Q-Q тест для канала RED изображения композита



Рисунок 9. Q-Q тест для канала GREEN изображения композита.

Все тесты с другими изображениями качественно подобны приведенным. В силу этого можно сделать вывод о существенном отличии полученных распределений от нормального распределения для распределений интенсивности по каналам в изображениях композитов.

Переход к представлению в градациях серого, которое будет использоваться на первоначальном этапе, в силу подобия распределений интенсивностей в каналах изображений, осуществляется командой

```
> colorMode(compoz01) = Grayscale
```

Оценим далее анизотропию изображения в двух выбранных направлениях, по вертикали и по горизонтали, так как технологические условия формирования образца могут приводить к неоднородности механических характеристик в зависимости от направления. В данном случае оценивается только анизотропия изображения образца в каналах RED, GREEN и BLUE.

Для оценки анизотропии в направлении сжатия образца при его изготовлении, используем эмпирические функции распределения интенсивности в верхних и нижних слоях изображения – строках матрицы по заданным каналам. Сравним полученные функции распределения, используя статистические критерии (см., например, [21, 59]).

Сравним оптическую плотность в нескольких верхних слоях. Будем использовать последовательность теста. Для этого проверим сначала распределения на нормальность при помощи Q-Q теста по каждому из каналов, а также используя тест Шапиро-Уилка для оценки интегральной интенсивности, усредненной по всем каналам.

Для канала GREEN тест Шапиро-Уилка дает следующие значения для первого слоя:

$$w = 0.9452, \text{ p-value} < 2.2e-16$$

где w – значение критерия, а p-value – вычисленный уровень значимости.

Следовательно нулевая гипотеза о том, что выборка происходит из генеральной совокупности, имеющей нормальное распределение, должна быть отвергнута.

Для каналов RED и BLUE соответственно тест Шапиро-Уилка дает значения:

$$w = 0.9541, \text{ p-value} < 2.2e-16$$

$$w = 0.9642, \text{ p-value} < 2.2e-16$$

К сожалению, для нескольких слоев статистики критерия Шапиро-Уилка вычислить не удастся, т.к. размерность (число элементов выборки) превышает допустимую величину для функции пакета.

Воспользуемся для оценки нормальности распределения по всей матрице и по каждому из каналов, первым из упомянутых выше тестов, а именно Q-Q тестом, который также демонстрирует отклонение от нормального распределения рисунок 10.

Проведенные тесты говорят о том, что для сравнения средних значений оптических плотностей в каналах для оценки анизотропии образца, необходимо использовать непараметрические методы оценивания. Воспользуемся реализованным в пакете тестом Уилкоксона-Манна-Уитни. Вычисленное значение статистики w в канале GREEN для ряда первых слоев, при сравнении с нижними слоями, лежит в интервале от 1800073 до 1845451, а уровень значимости не превышает значения $2 \cdot 10^{-5}$. Т.е. гипотезу о равенстве средних значений интенсивности в канале GREEN для слоев распределении по вертикали следует отвергнуть. Данное утверждение остается верным и для других каналов и для усредненной по каналам интенсивности. Например, по каналу GREEN среднее значение интенсивности в верхнем слое равно 0,522, а в нижнем – 0,541, причем средние значимо отличаются. Для каналов RED и B пары интенсивностей в верхних и нижних слоях соответственно равны (0,522; 0,540) и (0,494; 0,519).

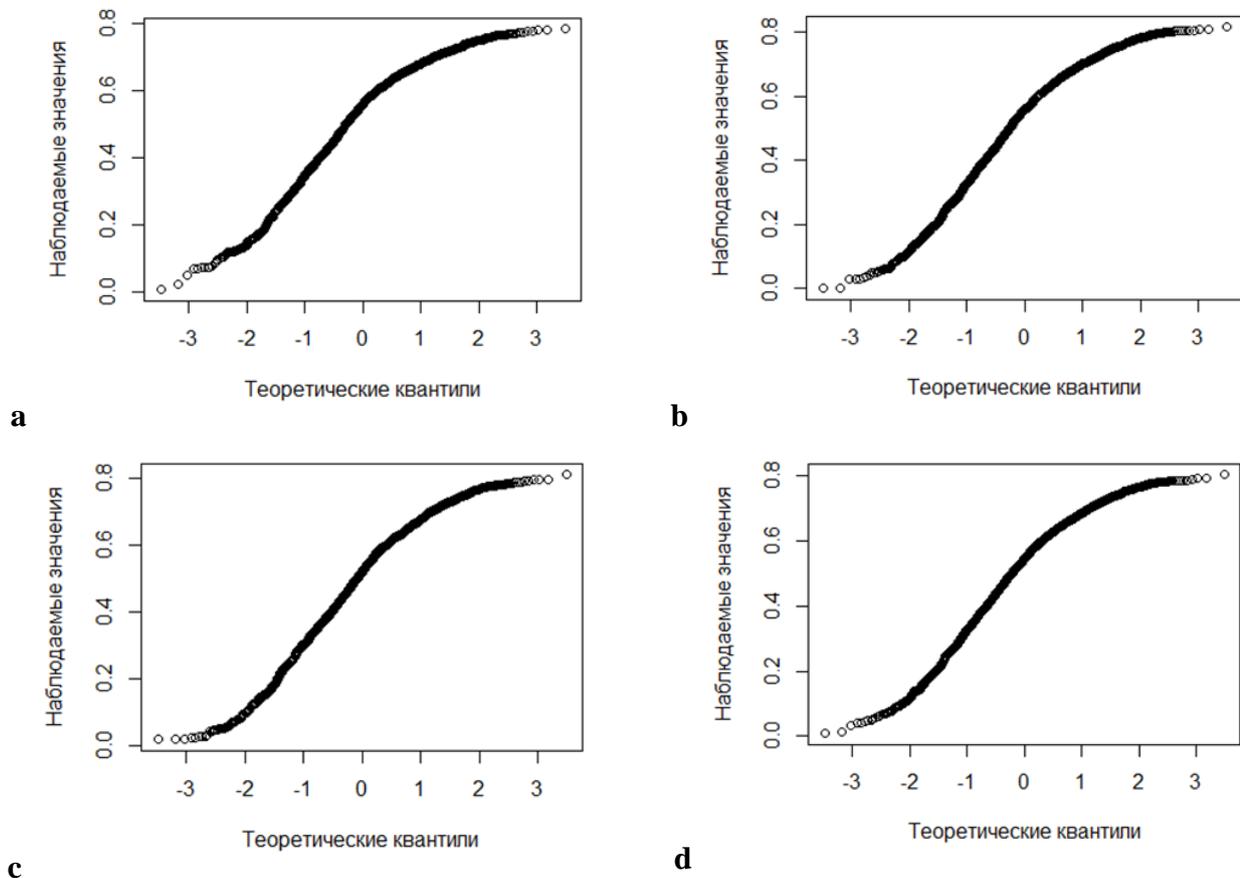


Рисунок 10. Q-Q тест на нормальность распределения по различным каналам и в градациях серого в горизонтальных слоях образца: **a** – для канала GREEN, **b** – для канала RED, **c** – для канала BLUE, **d** – для градаций серого.

Аналогичные тесты в вертикальных слоях, где интенсивности усреднены по группам соответствующим максимальному размеру наблюдаемой неоднородности в горизонтальном направлении, приводят к принятию гипотезы о незначимом отклонении средних значений. Отметим, что дисперсия значений интенсивностей в вертикальных слоях достаточно велика, причины такого разброса требуют отдельного изучения и предположительно связаны с механикой формирования образца.

Расчетные значения, полученные в Octave, совпадают с вычисленными статистиками в пакетах R, что подтверждает достоверность полученных результатов.

В результате можно принять окончательный вывод об анизотропии изображения образца композита в вертикальном направлении, что соответствует физическим условиям формирования образца (см. раздел 2 настоящей статьи). В рамках изложенного метода анализа изображения поверхности образца древесно-цементного композита оптическую анизотропию можно принять ортотропной.

На рисунке 11 приведен тест для канала GREEN, а также результат анализа изображения образца, преобразованного к градациям серого.

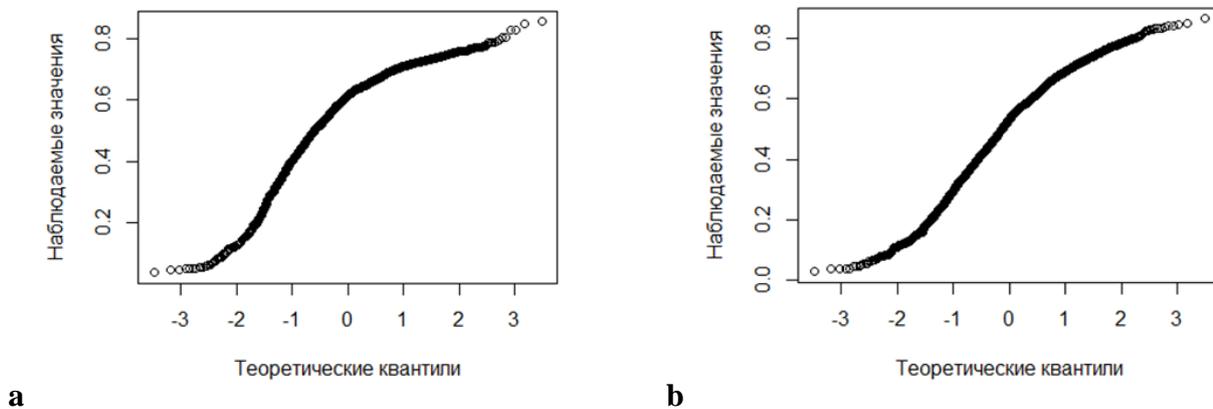


Рисунок 11. Пример Q-Q теста на нормальность распределения по каналу GREEN (а) и в градациях серого (б) в вертикальных слоях образца.

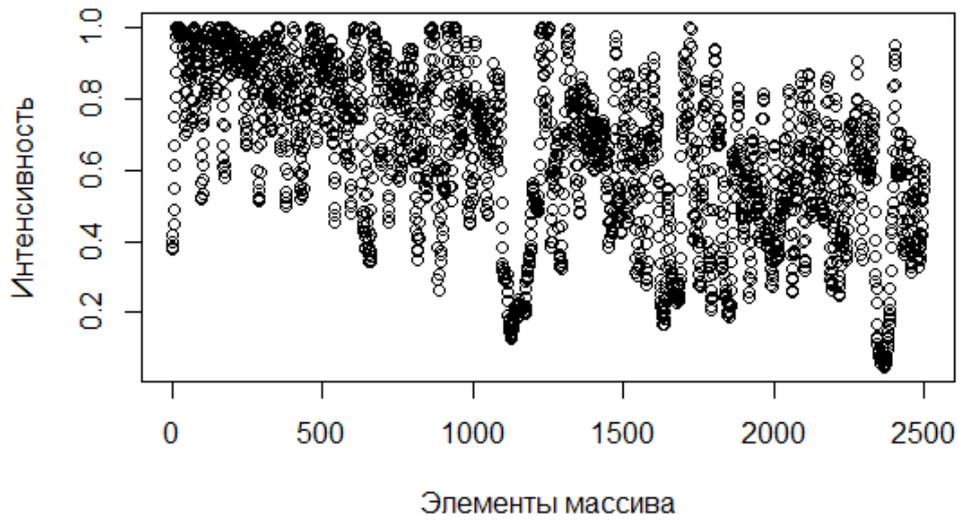
Обратим внимание на то, что, к сожалению, данные выводы относятся исключительно к изображениям, а не непосредственно к образцу. Необходимо изучить устойчивость полученных результатов по отношению к различным методикам и параметрам получения изображений экспериментальных образцов.

Далее приведены результаты исследования нескольких фотографий образцов композиционных материалов, которые получены на основе отходов деревообрабатывающей промышленности, с использованием цемента как основы матрицы композита. Технология получения образцов не обсуждается, изучаются фотографии полученных образцов с целью получения метрических характеристик изображений, которые, как известно, в ряде случаев позволили оценить физические свойства материалов. Например, в монографии [51] Ивановой Веры Семеновны подробно изучены характеристики материалов в различных зонах процессов механического разрушения и их фрактальные размерности.

С другой стороны, процесс получения изображения образца достаточно сложен. Здесь можно выделить две принципиально разные схемы формирования изображения шероховатой поверхностью, связанные с отношением характерных размерностей неоднородностей и длиной световой волны, формирующей фотографию образца в оптической системе камеры. Для малоконтрастных образцов, в которых длина волны много больше размеров неоднородностей можно воспользоваться моделью случайного экрана [25, 45], который считается простейшей рассеивающей системой со случайно изменяющейся фазой. Для малых, по сравнению с размером включений длин волн, анализ усложняется необходимостью учета рассеяния, поглощения, а также формированием каустических структур на контрастных краях включений. В последнем случае возможно использование подходов с использованием моделей геометрической оптики, в рамках которых может быть учтено формирование каустик, как с учетом рассеяния, так и без него [2, 27, 32].

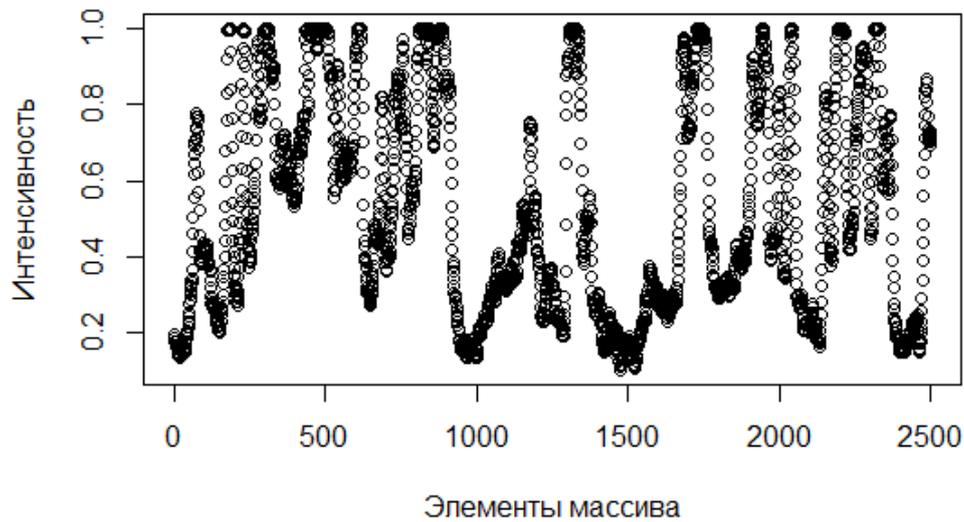
Приведем в качестве примера несколько изображений распределения интенсивности по различным граням образца и различным каналам для наглядной мотивации использования фрактальной размерности, как инвариантной характеристики изображений (Рис. 12 и 13).

Распределение интенсивности в канале Red



а

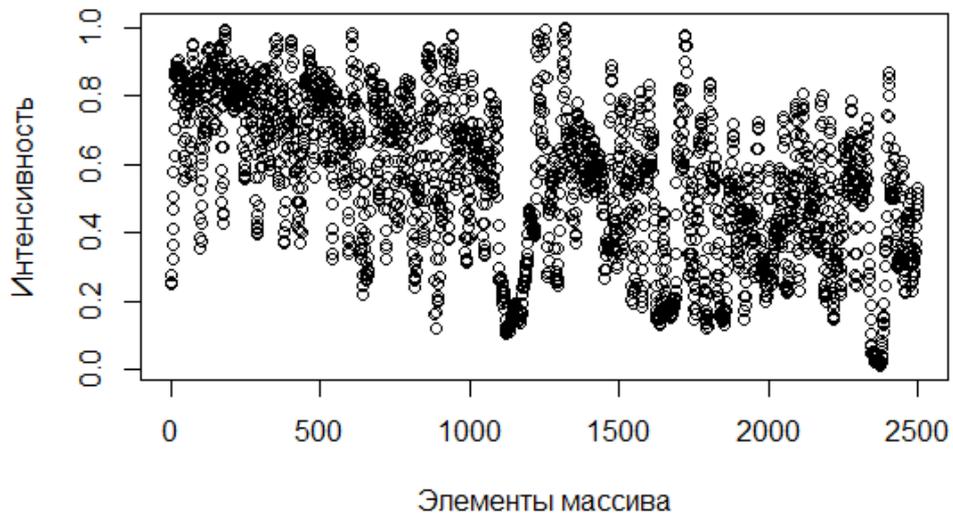
Распределение интенсивности в канале Red



б

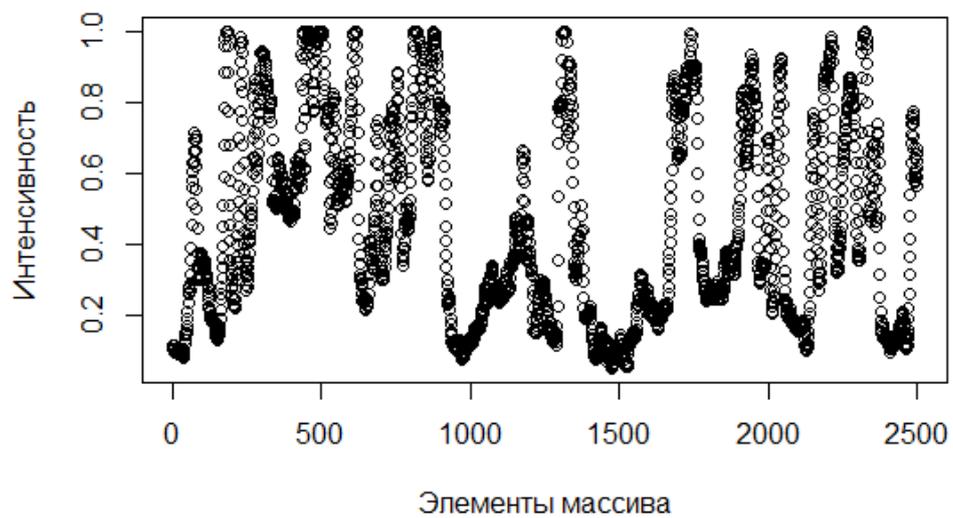
Рисунок 12. Распределение интенсивности в канале RED для одной из боковых (а) и верхней (б) граней образца.

Распределение интенсивности в канале Green



а

Распределение интенсивности в канале Green



б

Рисунок 13. Распределение интенсивности в канале GREEN для одной из боковых (**а**) и верхней (**б**) граней образца.

Распределения интенсивности по каналам выглядят достаточно стохастично и обнаружить закономерности формирования этих распределений представляется невозможным.

Далее рассматриваются цифровые методы обработки изображений, позволяющие оценить фрактальные размерности изображений композитов на основе древесины, выделяющие структурные особенности материала, которые, в свою очередь, могут влиять на его механические свойства.

Для обработки изображений и их фрактальной размерности, как и выше, использовался пакет расширения GNU/R, распространяемый по лицензии GNU/GPL [58].

Для получения фрактальных метрических характеристик изображения использовалось расширение R – пакет `fractaldim` из стандартного репозитория CRAN в модификации от 24 февраля 2014 года.

Методы вычисления фрактальной размерности в пакете основаны на алгоритме рассмотренном в статье [57]. Как известно, для гладкой поверхности в \mathbb{R}^d ее топологическая и фрактальная размерности совпадают и равны d . Для некоторых множеств нетривиальной структуры, называемых фракталами, их размерность Хаусдорфа находится в интервале от d до $d + 1$. Для двумерных данных на конечной решетке, авторы алгоритма предложили надежные трансект-оценки, которые используют медианы оценок измеренных вдоль строк и столбцов массива данных. В алгоритме используется распространенная практика определения размерности точечного множества $X \subset \mathbb{R}^d$, основанная на определении размерности данной Хаусдорфом. Для любого $\epsilon > 0$ конечного или счетного $\{B_i: i = 1, 2, \dots\}$ существует -покрытие X дисками $B_i \subset \mathbb{R}^d$ диаметра $|B_i|$ равного или меньшего ϵ . Тогда

$$H^\delta(X) = \liminf_{\epsilon \rightarrow 0} \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |B_i|^\delta : \{B_i: i = 1, 2, \dots\} - \epsilon - \text{покрытие } X \right\} \quad (1)$$

обозначает – меру Хаусдорфа для множества X , если существует единственное неотрицательное значение D , такое, что $H^\delta(X) = \infty$ если $\delta < D$ и $H^\delta(X) = 0$, если $\delta > D$. Такое значение D называется размерность Хаусдорфа точечного множества X . При некоторых, достаточно слабых, условиях регулярности размерность Хаусдорфа совпадает с размерностью Минковского,

$$D_{BC} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(\frac{1}{\epsilon})} \quad (2)$$

где $N(\epsilon)$ обозначает минимальное число кубов с длиной ребра ϵ в \mathbb{R}^d , которые могут покрыть X . Определенную так размерность легко реализовать алгоритмически, что и сделано в используемом пакете. Далее рассмотрим алгоритм, реализованные в пакете, который получил название `box-count`, так как вычисления размерности Минковского сводятся к подсчеты контрастных точек изображений в «ящиках» размерности, которая меняется от некоторой минимальной, до максимальной в импортированной структуре, и преобразованной к матрице данных. Подробнее с методом, используемым в пакете, можно ознакомиться в статье [63].

Для импорта образов во внутреннюю структуру R снова воспользуемся пакетом `EImage`, посредством которого в структуры данных импортировались изображения верхней, нижней и двух боковых граней образцов композита. Предварительно растровый образ исходного RED, GREEN и BLUE изображения обрезался до размера 2048×2048 пикселей, т.е. размер стороны изображения был обрезан до максимального размера, совпадающего со степенью

двух, а именно 2^{11} . Примеры обрабатываемых изображений приведены на рисунке 5. Результаты обработки представлены на рисунках 14 и 15.

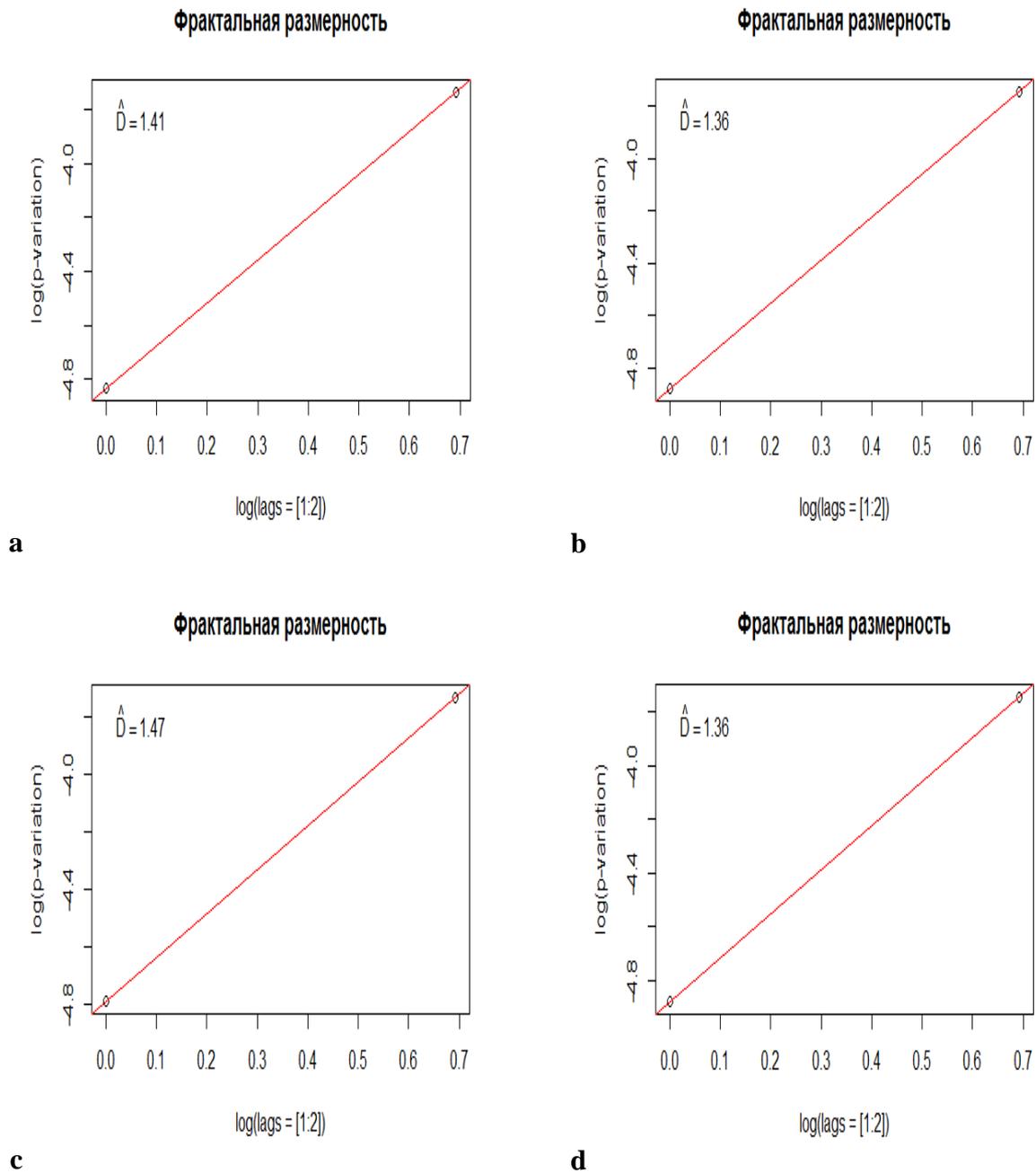


Рисунок 14. Оценки фрактальной размерности изображений боковой грани в различных каналах: **a** – RED, **b** – GREEN, **c** – BLUE и **d** – оттенках серого

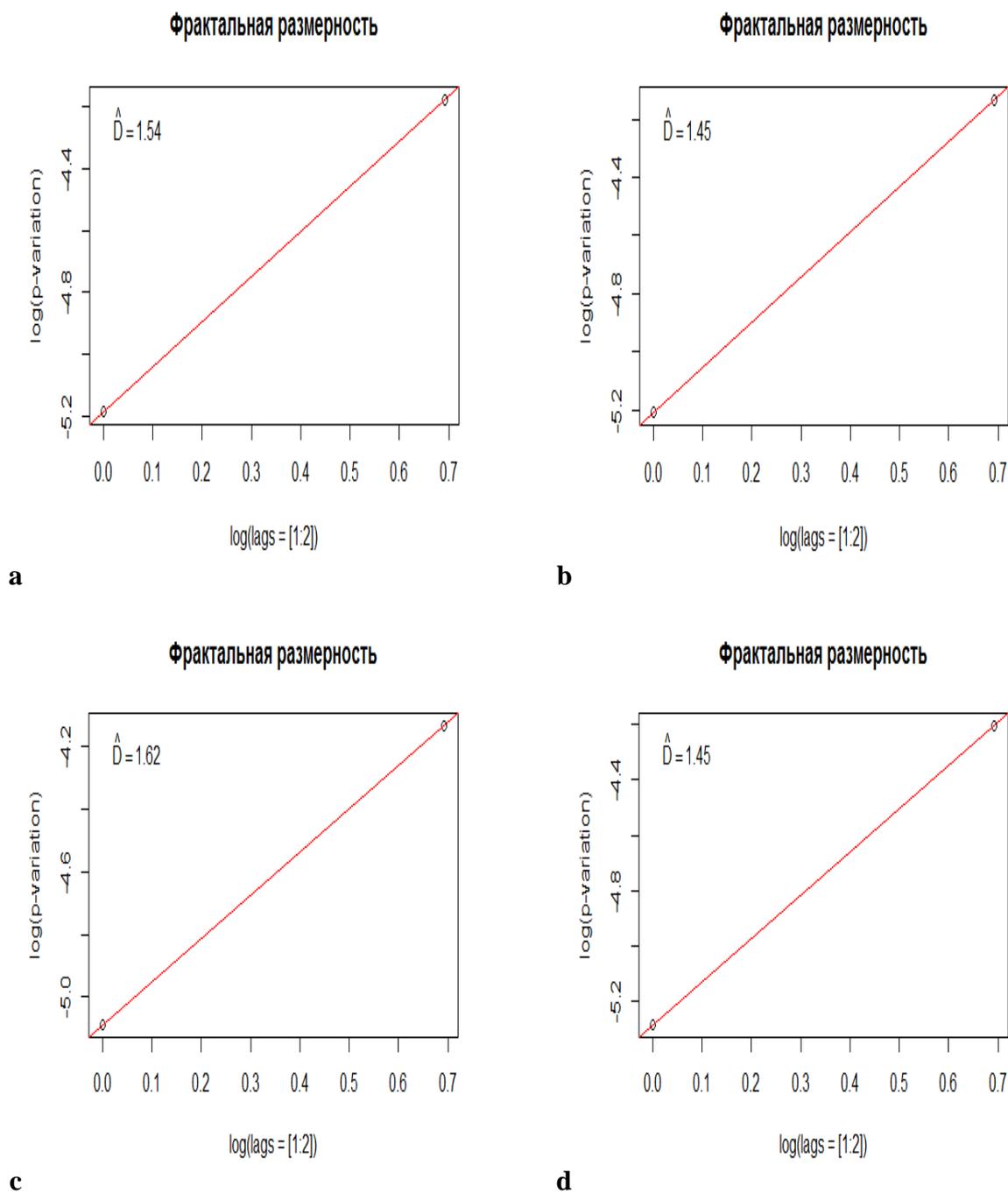


Рисунок 15. Оценки фрактальной размерности изображений верхней грани в различных каналах: **a** – RED, **b** – GREEN, **c** – BLUE и **d** – оттенки серого

Дальнейшие оценки продемонстрировали, что полученные фрактальные размерности практически не отличаются для различных боковых граней образца, но статистически значимо могут отличаться при сравнении боковых граней с верхней и нижней гранью. Значение α – вероятности отвергнуть гипотезу о коэффициенте линейной регрессии, определяющем фрактальную размерность, равно указанным значениям на графиках log-log, не превышает 10^{-4} .

Далее проведем оценки фрактальной размерности линейно контрастированных изображений, которые преобразованы к оттенкам серого (grayscale) методами, реализованными в библиотеке EImage. Стандартный линейный алгоритм контрастирования и изменения яркости основан на простом преобразовании

$$B_{ij}^t = \alpha B_{ij} + \beta \quad (3)$$

где B_{ij}^t – новое изображение, B_{ij} – исходное, а α и β некоторые параметры, называемые в задачах обработки изображений увеличение снижение контрастности, и смещением соответственно. Также используется следующее, частное по отношению к предыдущему, преобразование

$$B_{ij}^t = \alpha (B_{ij} - \bar{B}_{ij}) + \bar{B}_{ij} \quad (4)$$

где \bar{B}_{ij} – среднее значение по матрице интенсивностей изображения. В этом случае α – называется коэффициентом контраста.

Пример контрастированного изображения для $\alpha = 10$, приведен на рисунке 16, однако расчеты были приведены для всех четырех изображений. Вычисленные фрактальные размерности полученных изображений совпадают с размерностью не контрастированных изображений.

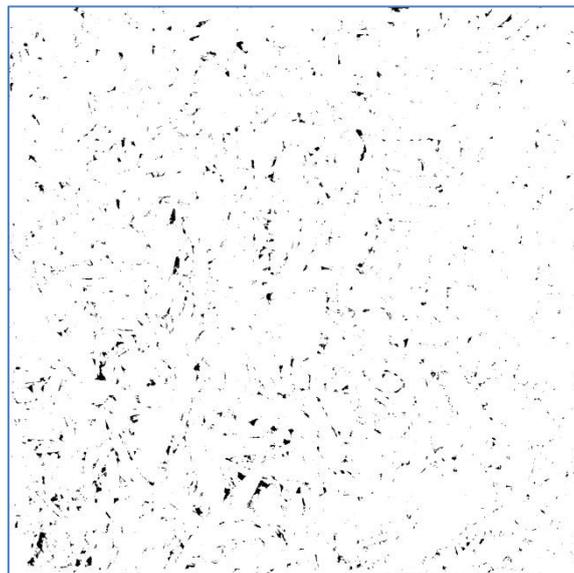


Рисунок 16. Контрастированное изображение для коэффициента контраста $\alpha = 10$

Линейные преобразования контрастирования не приводят к изменению фрактальной размерности изображений и демонстрируют устойчивость метода к подобного рода преобразованиям.

Различие во фрактальной размерности боковых, а также верхней и нижней граней можно связать со способом формирования образца, т.к. при утрамбовке включений в цементе, в боковых гранях происходит упорядочивание элементов в горизонтальные слои.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Изображения боковых граней образцов древесно-цементного композита при освещении его коллимированным источником света под углом 10° характеризуются анизотропией оптической плотности.
2. Анализ фрактальных размерностей верхней, нижней, а также боковых граней показывает, что структура поверхностей граней зависит от способа формирования образцов древесно-цементного композита.

Полученные результаты позволяют надеяться на то, что в дальнейшем удастся разработать методику неразрушающего контроля прочности образцов данного класса.

Литература

1. Андреев А. А. Анализ технологических операций получения древесной щепы / А. А. Андреев, Н. А. Доспехова, В. С. Копарев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. — 2012. — № 81. — С. 374—389.
2. Арнольд В. И. Особенности дифференцируемых отображений / В. И. Арнольд, А. Н. Варченко, С. М. Гусейн—Заде. — М.: МЦНМО, 2009. — 672 с.
3. Бююль А. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цёфель; пер. с нем. — СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. — 608 с.
4. Васильев С. Б. Влияние изменения длины баланса, измельчаемого в дисковой рубительной машине, на размеры частиц древесной щепы / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Г. Н. Колесников // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. — 2012. — № 81. — С. 270—279.
5. Васильев С. Б. Влияние параметров дисковой рубительной машины / С. Б. Васильев, И. В. Симонова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2007. — № 6. — С. 78—82.
6. Васильев С. Б. Влияние параметров оборудования на процесс сортирования щепы / С. Б. Васильев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2007. — № 2. — С. 86—89.
7. Васильев С. Б. Влияние технологии раскря балансовой древесины на фракционный состав щепы / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Г. Н. Колесников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2011. — № 195. — С. 125—133.
8. Васильев С. Б. Измельчение биомассы дерева на щепу / С. Б. Васильев. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. — 218 с. — Деп. в ВИНТИ 24.04.02, № 754-В2002.
9. Васильев С. Б. Исследование работы плоских гирационных сортировок щепы / С. Б. Васильев, А. В. Кульбицкий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 189. — СПб.: СПбГЛТА, 2009. — С. 132—140.
10. Васильев С. Б. Исследования конструктивных и технологических параметров оборудования для переработки крупной фракции щепы и кусковых отходов предприятий

- лесного комплекса на технологическую щепу / С. Б. Васильев. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. — 42 с. — Деп. в ВИНТИ 14.12.2001, № 2588-B2001.
11. Васильев С. Б. Комплексные исследования процесса производства щепы / С. Б. Васильев // *Resources and Technology*. — 2003. — Т. 4. — С. 13.
 12. Васильев С. Б. Логистический подход к моделированию фракционирования сыпучих материалов / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. — 2010. — № 4. — С. 61—65.
 13. Васильев С. Б. Моделирование процесса движения древесной щепы при сортировании / С. Б. Васильев, В. Б. Ефлов // *Матем. моделирование и краев. задачи: тр. Всерос. науч. конф., 29—31 мая 2007 г. Часть 2*. — Самара: СамГТУ, 2007. — С. 26—28.
 14. Васильев С. Б. Модуль рольганга с технологической функцией интенсификации выделения короткомеров из потока балансов / С. Б. Васильев, Н. А. Доспехова, Г. Н. Колесников // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. — 2013. — № 9. — С. 145—149.
 15. Васильев С. Б. Обоснование формообразующих параметров диска рубительной машины / С. Б. Васильев, И. В. Симонова // *Известия Санкт-петербургской лесотехнической академии*. — СПб.: СПбГЛТА, 2007. — № 179. — С. 130—135.
 16. Васильев С. Б. Оптические оценки анизотропии древесного композита / С. Б. Васильев, В. Б. Ефлов, В. С. Копарев // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. — 2014. — Т. 2, № 4. — С. 213—216.
 17. Васильев С. Б. Статистические свойства механических характеристик волокнистого композита / С. Б. Васильев, В. Б. Ефлов, Н. А. Прохорова // *Матем. моделирование и краев. задачи: тр. Всерос. науч. конф., 26—28 мая 2004 г. Часть 1*. — Самара: СамГТУ, 2004. — С. 49—51.
 18. Васильев С. Б. Учет реперных изображений для обработки образов древесных композитов / С. Б. Васильев, В. Б. Ефлов, В. С. Копарев // *Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-практ. конф., 18 апреля 2014 г.* — Петрозаводск, 2014. — С. 56—61.
 19. Васильев С. Б. Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане / С. Б. Васильев, Н. А. Доспехова, Г. Н. Колесников // *Resources and Technology*. — 2013. — Т. 10, № 1. — С. 24—38.
 20. Васильев С. Б. Экспериментальная проверка методов классификации щепы по толщине / С. Б. Васильев, И. В. Симонова // *Resources and Technology*. — 2005. — Т. 5. — С. 15.
 21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и её инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 2000. — 480 с.
 22. Влияние лесозаготовительных систем на качество круглых лесоматериалов / А. А. Селиверстов, А. П. Соколов, А. С. Сюнев, Ю. Ю. Герасимов // *Resources and Technology*. — 2012. — Т. 9, № 2. — С. 94—105.
 23. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. — 2008. — № 96. — С. 84—91.
 24. Девятникова Л. А. Влияние технологии раскря балансов на фракционный состав щепы / Л. А. Девятникова, С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*. — 2012. — № 3. — С. 120—124.
 25. Джейкмен Э. Рассеяние на фракталах / Э. Джейкмен // *Фракталы в физике / пер. с англ. под ред. Я. Г. Синая, И. М. Халатникова*. — М.: Мир, 1988. — С. 82—90.

26. Доспехова Н. А. Геометрическое моделирование контактного взаимодействия балансов в корообдирочном барабане / Н. А. Доспехова, О. Б. Марков, Б. Г. Марков // Resources and Technology. — 2010. — Т. 8. — С. 41—48.
27. Ефлов В. Б. Метод Монте-Карло в решении задач переноса узких поляризованных пучков света / В. Б. Ефлов, Ю. А. Ильинский // Вестник МГУ. М. — 1984. — Т. 25, № 5. — С. 115—118.
28. Ефлов В. Б. Моделирование процесса одномерной сортировки щепы / В. Б. Ефлов, И. Л. Гладкий, С. Б. Васильев // Труды ПетрГУ. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. — 2007. — Вып. 12. — С. 93—104.
29. Ефлов В. Б. Моделирование процесса сортирования щепы на плоских гирационных сортировках / В. Б. Ефлов, И. Л. Гладкий, С. Б. Васильев // Структурная перестройка лесного комплекса Республики Карелия: материалы респ. научно-практ. конф. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. — С. 19—20.
30. Ефлов В. Б. Обработка изображений образцов композита на основе древесины в средах GNU/R, GNU/OCTAVE / В. Б. Ефлов // Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-практ. конф., 18 апреля 2014 г. — Петрозаводск, 2014. — С. 43—49.
31. Ефлов В. Б. Оценка фрактальной размерности древесных композитов / В. Б. Ефлов // Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-практ. конф., 18 апреля 2014 г. — Петрозаводск, 2014. — С. 50—55.
32. Ефлов В. Б. Распространение пучка света в оптически-неоднородной среде с анизотропным рассеянием / В. Б. Ефлов, Ю. А. Ильинский // Вестник МГУ. — 1983. — Т. 24, № 5. — С. 77—79.
33. Ефлов В. Б. Фрактальная размерность изображения древесного композита и характеристики процесса разрушения / В. Б. Ефлов, А. А. Андреев, Г. Н. Колесников // Актуальные направления научных исследований XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф., 18—19 июня 2014 г. Часть 1, № 4 — Воронеж, 2014. — С. 217—220.
34. Житков О. В. Хранение и подготовка древесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности / О. В. Житков, Е. М. Мазарский. — М.: Лесная промышленность, 1980. — 224 с.
35. Зайцева М. И. Возможности использования отходов как компонента строительных материалов в республике Карелия / М. И. Зайцева, Ю. В. Никонова // Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-практ. конф., 23—28 июня 2013 г. — Петрозаводск, 2013. — С. 30—36.
36. Интенсификация сортировки транспортируемых рольгангом круглых лесоматериалов по критерию длины при их подготовке к измельчению на щепу / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Н. А. Доспехова, Г. Н. Колесников // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10-2. — С. 257—260.
37. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2008. — № 185. — С. 195—202.
38. Колесников Г. Н. Алгоритм декомпозиции линейной задачи дополненности и его применение для моделирования соударений балансов в корообдирочном барабане / Г. Н. Колесников // Resources and Technology. — 2013. — Т. 10, № 2. — С. 111—138.
39. Колесников Г. Н. Математическая модель технологического процесса фракционирования полидисперсного сыпучего материала методом рассева на установках с ярусной

- компоновкой сит / Г. Н. Колесников, С. Б. Васильев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2012. — № 3. — С. 42—49.
40. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. — М.: Мир, 1982. — 338 с.
41. Кульбицкий А. В. Влияние на стратификацию щепы толщины сортируемого слоя и угла наклона сит / А. В. Кульбицкий, С. Б. Васильев // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. — 2009. — № 7. — С. 98—100.
42. Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И. Х. Наназашвили. — Л.: Стройиздат, 1990. — 415 с.
43. Никонова Ю. В. Методика определения жесткости балансов, результаты численных экспериментов и испытаний образцов / Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // *Resources and Technology*. — 2010. — № 8. — С. 100—106.
44. Оптимизация логистики лесозаготовок / А. П. Соколов, В. С. Сюнев, Ю. Ю. Герасимов, Т. Каръялайнен // *Resources and Technology*. — 2012. — Т. 9, № 2. — С. 117—128.
45. Потапов А. А. К теории функционалов стохастических полей обратного рассеяния / А. А. Потапов // *Радиотехника и электроника*. — 2007. — Т. 52, № 3. — С. 261—310.
46. Пошарников Ф. В. Применение в строительных конструкциях материалов на основе отходов древесины / Ф. В. Пошарников, М. В. Филичкина // *Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение: межвуз. сб. науч. тр.* — Воронеж: ВГТЛА, 2007. — С. 155—160.
47. Раковская М. И. Численное моделирование и определение сил контактного взаимодействия длинномерных сортиментов в корообдирочном барабане / М. И. Раковская, Ю. В. Никонова // *Системы управления и информационные технологии*. — 2008. — № 1.3. — С. 397—401.
48. Секция рольганга для сортировки транспортируемых лесоматериалов по длине / Г. Н. Колесников, С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Н. А. Доспехова // *Патент на полезную модель RUS 117411 05.12.2011*
49. Симонова И. В. О применении свойств геликоиды в рубительных дисках / И. В. Симонова, С. Б. Васильев // *Resources and Technology*. — 2010. — № 8. — С. 133.
50. Симонова И. В. Теоретическое исследование процесса взаимодействия древесного сырья с рабочим органом дисковой рубительной машины / И. В. Симонова, С. Б. Васильев // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. — 2009. — № 99. — С. 102—106.
51. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. — М.: Наука, 1994. — 383 с.
52. Технологические решения для реализации потенциала ресурсосбережения при переработке круглых лесоматериалов на щепу / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Г. Н. Колесников, И. В. Симонова. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. — 92 с.
53. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы: в 3-х томах. Т. 1. — СПб.: ЛТА, 2002. — 425 с.
54. Установка для фракционирования сыпучих полидисперсных материалов / Г. Н. Колесников, С. Б. Васильев, А. А. Андреев // *Патент на полезную модель RUS 117326 27.02.2012*.
55. Цифровая обработка изображений в информационных системах: уч. пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых [и др.]. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 352 с.
56. Шамрай Н. Б. Краткое руководство по работе с пакетами GNU Octave и Gnuplot / Н. Б. Шамрай. — 2011. — 37 с.

57. Gneiting T. Estimators of fractal dimension: Assessing the smoothness of time series and spatial data / T. Gneiting, H. Sevcikova, D.B. Percival. — *Statistical Science*, 2010. — 27(2). — P. 247—277.
58. Maindonald J. H. *Using R for Data Analysis and Graphics* / J. H. Maindonald. — Canberra: Australian National University, 2008. — 112 p.
59. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reference Index. The R Core Team. Version 3.1.0 (2014-04-10)/Version Patched 3.1.0 Patched (2014-04-18). — Washington: University of Washington. — 2010. — 3384 p.
60. Roesler J. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites* / J. Roesler, H. Harders, M. Baeker. — Berlin; NY: Springer, 2007. — 534 p.
61. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology* / J. Serra. — Berlin; NY: Springer, 1994. — 384 p.
62. Soille P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, 2nd Edition / P. Soille. — Berlin; NY: Springer, 2004. — 392 p.
63. Zhu Z. Parameter estimation for fractional Brownian surfaces / Z. Zhu, M. Stein // *Statistica Sinica*. — 2002. — Vol. 12, № 3 — P. 863—883.

References:

1. Andreev A. A., Dospekhova N. A., Koparev V. S. Analysis of technological operations of wooden chips manufacturing // *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. — 2012. — № 81. — P. 374—389.
2. Arnold V. I., Varchenko A.N., S. M Guseyn-Zade. Features of differentiable displays. — M.: MCMU, 2009. — 672 p.
3. Byuyul A. SPSS: Information processing art. Analysis of statistical data and restoration of the hidden regularities — St. Petersburg: DiaSoftUP, 2005. — 608 p.
4. Vasilyev S. B., Devyatnikova L. A., Kolesnikov G. N. The size distribution of wooden influence of pulp logs length on chips manufactured by disk chipper // *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. — 2012. — № 81. — P. 270—279.
5. Vasilyev S. B., Simonova I. V. The chipper's dick profile parameters substantiation // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoi zhurnal* — 2007. — № 6. — P. 78—82.
6. Vasilyev S. B. Influence of Equipment Parameters on Chips Sorting Process // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoi zhurnal*. — 2007. — № 2. — P. 86—89.
7. Vasilyev S. B., Devyatnikova L. A., Kolesnikov G. N. The impact of technology on the cutting pulpwood chips fractional composition // *Proceedings of the St. Petersburg Forest Technical Academy*. 2011. № 195. p. 125-133.
8. Vasilyev S. B. Tree biomass crushing on chips — Petrozavodsk: PetrSU, 2002. — 218 p.
9. Vasilyev S. B., Kulbitsky A. V. The result of plain chip screens industrial research // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicoskoj akademii*. Vol. 189. — St. Petersburg: SPbSFTA, 2009. — P. 132—140.
10. Vasilyev S. B. Researches of design and technological data of the equipment for processing of large fraction of chips and lumpy waste of the enterprises of a forest complex into technological chips — Petrozavodsk: PetrSU, 2001. — 42 p.
11. Vasilyev S. B. Complex methods of chip production investigation // *Resources and Technology*. — 2003. — Vol. 4. — P. 13.
12. Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Logistic approach to modeling of fractionation of bulks // *Proceedings of petrozavodsk state university*. — 2010. — № 4. — P. 61—65.
13. Vasilyev S. B., Eflöv V. B. Modeling of process of the movement of wood chips when sorting — Samara. SamSTU, 2007. — P. 26—28.

14. Vasilyev S.B., Devyatnikova L.A., Dospekhova N.A., Kolesnikov G.N. Intensification of pulpwood sorting transported by a roll-table according to the criterion of length during their preparation to chipping // *Fundamental research* — 2013. — №10. P. 257—260.
15. Vasilyev S. B., Simonova I. V. Justification of form-building parameters of a disk of the chipper // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. Vol. 179. — St. Petersburg: SPbSFTA, 2007. — № 179. — P. 130—135.
16. Vasilyev S. B., Eflov V. B., Koparev V. S. Optical estimates of anisotropy of a wooden composite // *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*. — 2014. — Vol. 2, № 4. — P. 213—216.
17. Vasilyev S. B., Eflov V. B., Prohorova N. A. Statistical properties of mechanical characteristics of a fibrous composite // *Matem. simulation and edges. tasks: Conference papers*. 26—28 May 2004. Part 1. — Samara: SamSTU, 2004. — P. 49—51.
18. Vasilyev S. B., Eflov V. B., Koparev V. S. Accounting reference images for image processing of wooden composites // *Resources saving technologies, materials and designs: Conference papers*, 18 April 2014. — Petrozavodsk, 2014. — P. 56—61.
19. Vasilyev S. B. Simulation of Unequal Diameter Spruce Pulpwood Interaction in Debarking Drum/ S. B. Vasilyev, N. A. Dospekhova, G. N. Kolesnikov // *Resources and Technology*. 2013. Vol. 10. № 1. p. 024-038.
20. Vasilyev S. B., Simonova I. V. Experimental testing of wood chips classification techniques according to their thickness with a chip classifier // *Resources and Technology*. — 2005. — Vol. 5. — P. 15.
21. Ventcel E. S., Ovcharov L. A. Probability theory and its engineering appendices. — M.: Visshaja shkola, 2000. — 480 p.
22. Seliverstov A. A. Impact of wood harvesting systems on round wood quality / A.A.Seliverstov, A.P. Sokolov, V.S. Syuney, Y.Y. Gerasimov // *Resources and Technology*. — 2012. — Vol. 9, № 2. — P. 94—105.
23. Vasilyev S. B. The influence of local stiffness of debarking drum on variability interaction forces and wood waste / S. B. Vasilyev, G. N. Kolesnikov, Yu. V. Nikonova, M. I. Rakovskaya // *Proceedings of Petrozavodsk state university. Natural & Engineering Sciences*. — Petrozavodsk, 2008. - № 4. - p. 84– 91.
24. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Pulp wood re-sawing process influence on wood chip quality // *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*. Publishing house of Moscow State Forest University 2012. № 3. p. 120-124.
25. Jeikmen E. Dispersion on fractals // *Fractals in physics (in Rus.)*. — M.: Mir, 1988. — P. 82—90.
26. Dospekhova N. A., Markov O. B., Markov B. G. Geometric modeling of the contact interaction of balances in a drum of a debarking machine // *Resources and Technology*. — 2010. — Vol. 8. — P. 41—48.
27. Eflov V. B., Il'inski Yu. A. The Monte-Carlo method in the solution of problems of transfer of the narrow polarized beams of light // *Vestnik of MSU. Moscow*. — 1984. — Vol. 25, № 5. — P. 115—118.
28. Eflov V. B., Gladki I. L., Vasilyev S. B. Modeling of process of one-dimensional sorting of chips // *Papers of PetrSU*. — Petrozavodsk PetrSU. — 2007. — Vol. 12. — P. 93—104.
29. Eflov V. B., Gladki I. L., Vasilyev S. B. Simulation of process of chips stratification by means of flat giratsionnykh chipscreen // *Restructuring of a forest complex*. — Petrozavodsk PetrSU. 2008. — P. 19—20.
30. Eflov V. B. Processing of images of samples of a composite on the basis of wood in the GNU/R, GNU/OCTAVE environments // *Resource-saving technologies, materials and designs: Proceedings*, 18 April 2014. — Petrozavodsk, 2014. — P. 43—49.

31. Eflov V. B. Assessment of fractal dimension of wood composites // Resource-saving technologies, materials and designs: Proceedings, 18 April 2014. — Petrozavodsk, 2014. — P. 50—55.
32. Eflov V. B., Il'inski Yu. A. Distribution of a beam of light in optically non-uniform environment with anisotropic dispersion // Vestnik of MSU. Moscow. — 1983. — Vol. 24, № 5. — P. 77—79.
33. Eflov V. B., Andreev A. A., Kolesnikov G. N. Fractal dimension of the image of a wood composite and characteristic of process of destruction // Actual directions of scientific researches of the XXI century: Proceedings, 18—19 Jun 2014. Part 1, № 4 — Voronej, 2014. — P. 217—220.
34. Zhitkov A. V. Storage and preparation of raw materials in the pulp and paper industry / A. V. Zhitkov, S. M. Mazar. M.: Forest Industry, 1980 224p.
35. Zaitseva M. I. The possibility of using wastes as a component of building materials in the Republic of Karelia / M. I. Zaitseva, Yu. V. Nikonova // Collection of articles: Wooden low-rise housing construction economics, architecture and resource-saving technologies - Collection articles on the materials of the international scientific-practical conference. Petrozavodsk State University. Petrozavodsk, 2013. p. 30-36.
36. Intensification of pulpwood sorting transported by a roll-table according to the criterion of length during their preparation to chipping / S. B. Vasilyev, L. A. Devjatnikova, N. A. Dospekhova, G. N. Kolesnikov // Fundamental research. — 2013. — № 10-2. — P. 257—260.
37. Vasilyev S. B. Study of patterns of change in the collision force to reduce losses in the debarking drum / S. B. Vasilyev, G. N. Kolesnikov, Yu. V. Nikonova, M. I. Rakovskaya // Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii. 2008. № 185. p. 195-202.
38. Kolesnikov G. N. Decomposition Algorithm of Linear Complementarity Problem and its Application for Simulation of Pulpwood Collisions in Debarking Drum // Resources and Technology. — 2013. — Vol. 10, № 2. — P. 111—138.
39. Kolesnikov G. N., Vasilyev S. B. Mathematical simulation of free-flowing bulk polydisperse materials fractioning process by means of tiered packaged screens // Fundamental and applied problems of equipment and technology. — 2012. — № 3. — P. 42—49.
40. Kristensen R. Introduction to mechanics of composites (in Rus.). — Moscow. Mir, 1982. — 338 p.
41. Kulbitski A. V., Vasilyev S. B. The influence of the thickness of inclination's corner of sieve parameters on screening efficacy // Proceedings of petrozavodsk state university. — 2009. — № 7. — P. 98—100.
42. Nanazashvili I. H. Construction materials from wood-cement composition (in Rus.). — Leningrad. Stroizdat, 1990. — 415 p.
43. Nikonova Yu. V., Rakovskaja M. I. Method of paper wood rigidity evaluation, experimental results // Resources and Technology. — 2010. — Vol. 8. — P. 100—106.
44. Sokolov A. P., Siunev V. S., Gerasimov Yu. Yu., Karjalainen T. Optimisation of wood logistics // Resources and Technology. — 2012. — Vol. 9, № 2. — P. 117—128.
45. Potapov A. A. To the theory of functionalities of stochastic fields of the return dispersion (in Rus.) // Radio technician and electronic engineer. — 2007. — Vol. 52, № 3. — P. 261—310.
46. Posharnikov F. V. Application in construction designs of materials on the basis of wood waste // Environmental management: resources, technical providing: Proceedings — Voronej: VSFTA, 2007. — P. 155—160.
47. Rakovskaja M. I., Nikonova Yu. V. Numerical simulation and determination of forces of contact interaction of lengthy pulpwood in a debarking drum // Control systems and information technologies. — 2008. — № 1.3. — P. 397—401.

48. Roll-section for sorting of the transported forest products according to length / G. N. Kolesnikov, S. B. Vaasilyev, L. A. Devjatnikova, N. A. Dospekhova // Patent for useful model RUS 117411 05.12.2011
49. Simonova I. V., Vasilyev S. B. Helicoid form of a disk chipper surface: properties and application // Resources and Technology. — 2010. — Vol. 8. — P. 133.
50. Simonova I. V., Vasilyev S. B. Theoretical Research for Plywood – Dick Interaction in Chippers // Proceedings of petrozavodsk state university. — 2009. — № 99. — P. 102—106.
51. Synergetics and fractals in materials science (in Rus.) / V. S. Ivanova, A. S. Balankin, I. J. Bunin, A. A. Oksogoev. — Moscow. Nauka, 1994. — 383 p.
52. Technological decisions for realization of resource-saving potential when processing round wood on chips / S. B. Vasilyev, L. A. Devjatnikova, G. N. Kolesnikov, I. V. Simonova. — Petrozavodsk: PetrSU Publishes, 2013. — 92 p.
53. Technology of pulp-and-paper production (in Rus.). Reference book. Vol. 1. — Snt. Petersburg. FTA, 2002. — 425 p.
54. Equipment for fractionation of loose polydisperse materials / G. N. Kolesnikov, S. B. Vaasilyev, A. A. Andreev // Patent for useful model RUS 117326 27.02.2012.
55. Digital processing of images in information systems: Textbook (in Rus.) / I. S. Gruzman, V. S. Kirichuk, V. P. Kosih. — Novosibirsk. NSTU, 2002. — 352 p.
56. Shamai N. B. Kratkoe rukovodstvo po rabote s paketami GNU Octave i Gnuplot. — 2011. — 37 p.
57. Gneiting T. Estimators of fractal dimension: Assessing the smoothness of time series and spatial data / T. Gneiting, H. Sevcikova, D.B. Percival. — Statistical Science, 2010. — 27(2). — P. 247—277.
58. Maindonald J. H. Using R for Data Analysis and Graphics / J. H. Maindonald. — Canberra: Australian National University, 2008. — 112 p.
59. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Reference Index. The R Core Team. Version 3.1.0 (2014-04-10)/Version Patched 3.1.0 Patched (2014-04-18). — Washington: University of Washington. — 2010. — 3384 p.
60. Roesler J. Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites / J. Roesler, H. Harders, M. Baeker. — Berlin; NY: Springer, 2007. — 534 p.
61. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. — Berlin; NY: Springer, 1994. — 384 p.
62. Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications, 2nd Edition / P. Soille. — Berlin; NY: Springer, 2004. — 392 p.
63. Zhu Z. Parameter estimation for fractional Brownian surfaces / Z. Zhu, M. Stein // Statistica Sinica. — 2002. — Vol. 12, № 3 — P. 863—883.