
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

УДК 528.854

ОБРАБОТКА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛОКОН ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСИНЫ

О. В. НЕДЗЬВЕДЬ¹⁾, С. В. АБЛАМЕЙКО²⁾, К. Р. ХАДЖИ-МАНИЧ³⁾, А. САВИЧ³⁾

¹⁾Белорусский государственный медицинский университет, пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Институт мультидисциплинарных исследований Белградского университета,
бульвар Стефана, 142, 11060, г. Белград, Сербия

Предложен алгоритм анализа смещения волокон и изменения структуры древесины при деформации. Представленный алгоритм предназначен для определения изменений в структуре клеток растений, испытывающих стресс, и изучения механических свойств волокон. Алгоритм основан на определении сдвига между слоями при помощи вычисления оптических потоков для последовательности статичных микроскопических изображений. Применение оптических потоков в данном случае дает возможность выявить особенности структурной деформации в объеме тканей растений. Алгоритм состоит из двух частей, что обуславливает ускорение вычислительного

Образец цитирования:

Недзведзь О. В., Абламейко С. В., Хаджи-Манич К. Р., Савич А. Обработка микроскопических изображений волокон для анализа структуры древесины // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2018. № 1. С. 95–104.

For citation:

Nedzvedz O. V., Ablameyko S. V., Hadži-Manić K. R., Savić A. Microscopic images processing for the wood structure analysis. *J. Belarus. State Univ. Math. Inform.* 2018. No. 1. P. 95–104 (in Russ.).

Авторы:

Ольга Валерьевна Недзведзь – старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики фармацевтического факультета.

Сергей Владимирович Абламейко – академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры информационных систем управления факультета прикладной математики и информатики.

Ксения Радотич Хаджи-Манич – кандидат наук (биофизика растений и биохимия); профессор кафедры естественных наук.

Александр Савич – кандидат наук (физическая химия); научный сотрудник кафедры естественных наук.

Authors:

Olga V. Nedzvedz, senior lecturer at the department of medical and biological physics, pharmacy faculty.
olga_nedzved@tut.by

Sergey V. Ablameyko, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; professor at the department of information systems management, faculty of applied mathematics and computer science.
ablameyko@bsu.by

Ksenija R. Hadži-Manić, PhD (plant biophysics and biochemistry); professor at the department of natural sciences.
xradotic@gmail.com

Aleksandar Savić, PhD (physical chemistry); researcher at the department of natural sciences.
asavic@imsi.rs

процесса за счет параллельных вычислений. Результатом работы алгоритма является построение векторных полей оптического потока в трехмерном пространстве. Использование трех различных типов изображений позволяет определить деформацию, химический сдвиг и поворот волокон. По результатам работы алгоритма можно оценить физиологические процессы, происходящие в деформированной ткани растения, а также проконтролировать результат работы математического моделирования.

Ключевые слова: оптический поток; микроскопические изображения; анализ структуры древесины.

Благодарность. Работа поддержана грантом 173017 Министерства образования, науки и технологий Республики Сербии. Изображения для анализа предоставлены Институтом междисциплинарных исследований (IMSI) Белградского университета (Сербия) и Институтом биологии растений Венгерской академии наук как результат выполнения проекта «Структурная анизотропия клеточных стенок растений различного происхождения и их составных полимеров с использованием дифференциально-поляризованной лазерной сканирующей микроскопии (DP-LSM)». Описанный алгоритм разработан в рамках двустороннего проекта «Расширенный анализ микроскопических изображений в биологии и медицине», выполняемого IMSI и Институтом проблем информатики НАН Беларуси. Авторы выражают благодарность за предоставленные изображения и материалы Александре Митрович, Елене Богданович-Пристовой и Ясне Симонович из IMSI и Габору Штайнбаху из Центра биологических исследований Венгерской академии наук (Сегед).

MICROSCOPIC IMAGES PROCESSING FOR THE WOOD STRUCTURE ANALYSIS

O. V. NEDZVEDZ^a, S. V. ABLAMEYKO^b, K. R. HADŽI-MANIĆ^c, A. SAVIĆ^c

^aBelarusian State Medical University, 83 Dzierżyńska Avenue, Minsk 220116, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezależności Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cInstitute for Multidisciplinary Research, University of Belgrade,
142 Stefana Bulevar, Belgrad 11060, Serbia

Corresponding author: O. V. Nedzvedz (olga_nedzved@tut.by)

An algorithm for analysis of wood fibers displacement and changes of the wood structure during deformation is proposed. This algorithm is intended for determination of changes in the structure of plant cells under stress and for study the mechanical properties of fibers. The algorithm is based on determination of the shift between layers by calculation of the optical flows for a sequence of static microscopic images. The use of optical flows allows to identify the particular features of structural deformation within the volume of plant tissues. The algorithm consists of two parts, which makes it possible to accelerate the computational process through parallel computations. The result of the algorithm is the construction of vector fields of the optical flow in three-dimensional space. Using three different types of images allows to determine the deformation, chemical shift and rotation of the fibers. The results of the algorithm allow to evaluate the physiological processes occurring in the deformed tissue of the plant and check the result of mathematical modeling.

Key words: optical flow; microscopic image; analysis of the wood structure.

Acknowledgements. This work was supported by grant 173017 from the Ministry of Education, Science and Technology of the Republic of Serbia. Images for analysis were provided by the Institute for Multidisciplinary Research (IMSI) of the University of Belgrade (Serbia) and the Institute of Plant Biology of the Hungarian Academy of Sciences as a result of the implementation of the project «Structural anisotropy of the plant cell walls of various origin and their constituent polymers, using differential-polarized laser scanning microscopy (DP-LSM)». The proposed algorithm was developed within the project «Advanced image analysis on micron scale in biology and medicine» between Belarus and Serbia, carried out by IMSI of the University of Belgrade (Serbia) and the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. Authors are grateful for the images and materials provided by Dr. Aleksandra Mitrovic, Dr. Jelena Bogdanovic-Pristov and Ms Jasna Simonovic of IMSI, and Dr. Gabor Steinbach of Biological Research Centre (Szeged).

Введение

Воздействие на растения различных абиотических факторов, таких как резкое изменение температуры, избыток или дефицит влаги, загрязнение почвы промышленными отходами, вызывает у растений ответную реакцию, которую принято называть стрессом. К стрессовым реакциям относится и механическая деформация, в процессе которой изменяются механические и химические свойства, а также морфология клеточных стенок волокон древесины [1; 2].

В настоящее время существует потребность в усовершенствовании методик для анализа микроскопических изображений деформированных волокон древесины в целях изучения распределения целлюлозы и лигнина в клеточных стенках древесины, что позволит лучше понять механические свойства волокон. В настоящей работе предложен алгоритм для анализа сжатия волокон древесины на основе определения изменения направления и структуры ее волокон при механической деформации.

Использование метода оптического потока позволяет быстро проанализировать смещение слоев древесины при деформации. Визуальное представление в виде цветного пространства или непосредственно в виде векторного поля значительно облегчает восприятие изменений в ткани. Комплексное использование различных видов микроскопии позволяет получить более полную информацию о структуре и ориентации волокон, а также определить функционально-морфологические изменения в клетках.

Особенности структуры волокон древесины при деформации на микроскопических изображениях

Основной объем мягкой древесины состоит из клеток, называемых волокнами или трахеидами. Эти полые клетки включают просвет, окруженный клеточной стенкой, строение которой определяет механические свойства клетки. Одним из основных компонентов клеточных стенок является целлюлоза, причем ее содержание в волокне изменяется в ходе роста растения. Другой важный компонент клеточных стенок – лигнин – представляет собой сложное полимерное соединение, характеризующее степень одревеснения стенки растительной клетки. Лигнин повышает прочность клеточной стенки и волокон древесины в целом.

Макромолекулы целлюлозы и лигнина в клеточных стенках организованы в микро- и макрофибриллы, состоящие из нескольких связанных между собой макромолекул. Физические и химические свойства клеточной стенки зависят от взаимного расположения микро- и макрофибрилл, структура которых неоднородна. На некоторых участках молекулы целлюлозы ориентированы параллельно друг другу, на других их расположение не упорядочено.

В результате стресса происходит изменение структуры волокон древесины, заметное на микроскопических изображениях. Отдельные клетки при этом также претерпевают деформацию, степень которой отличается для других клеток и зависит от их расположения. В деформированных клетках по сравнению с нормальными изменяется распределение лигнина в клеточных стенках и повышается степень одревеснения клеточных стенок [2].

Получение и подготовка изображений среза растений

Исходные объемные многослойные изображения были получены путем объединения микроскопических изображений последовательных срезов ствола растения, выполненных на микротоме через каждые 100 мкм. Каждый слой является отдельным полутоновым изображением [3].

Анализ изменения структуры ткани растения выполняется в трехмерном пространстве, так как деформация происходит во всех направлениях.

Изображения хранятся в базе данных в формате RGB (красный, зеленый и синий каналы), при этом каждому каналу соответствует изображение, которое обеспечивает оптическая, флуоресцентная и поляризационная микроскопия соответственно. После извлечения изображения разделяют и обрабатывают по отдельности.

Каналу В соответствует микроскопическое изображение, полученное при помощи светового микроскопа. Предел разрешения такого микроскопа достигает 0,2 мкм. Микроскопическое изображение позволяет изучить строение и слоистую структуру клеточной стенки, ее целлюлозный каркас, а также дает возможность исследовать изменение структуры клеточной стенки в результате деформации.

Изображение, соответствующее каналу G, создается при помощи поляризационного микроскопа. Изображения, полученные в поляризованном свете, позволяют изучать оптически анизотропные структуры, обладающие упорядоченной ориентацией и способные вращать плоскость поляризации. С помощью поляризационного микроскопа можно исследовать, например, расположение микро- и макрофибрилл целлюлозы в клеточной стенке растений, а также изменение их ориентации в процессе деформации, поскольку волокна целлюлозы оптически анизотропны и их оптические свойства изменяются в зависимости от ориентации относительно плоскости поляризации падающего света.

Исследуемые объекты в поляризационном микроскопе выглядят светящимися на темном фоне, причем яркость объекта на изображении зависит от угла поворота волокна по отношению к плоскости поляризации падающего света.

Каналу R соответствует изображение флуоресцентной микроскопии, которое позволяет сделать видимым распределение лигнина и целлюлозы в волокнах, так как они обладают флуоресцентными

свойствами. Флуоресценция препарата или введенного в него красителя возбуждается за счет освещения его синим или ультрафиолетовым светом, после чего веществом излучается свет большей длины волны. Флуоресцентная микроскопия может рассматриваться как метод контрастирования, она позволяет в сложном препарате визуализировать структуры, которые не видны в обычном световом микроскопе. Изображение представляет светящиеся объекты на темном фоне, яркость которых зависит от химического состава вещества. Флуоресцентная микроскопия позволяет исследовать структуру и функции клеточных микроструктур, определять функционально-морфологические изменения клеток, проводить количественную оценку физико-химических параметров внутриклеточной среды.

Таким образом, для дальнейшего анализа выполняется разделение исходного изображения на три канала (рис. 1).

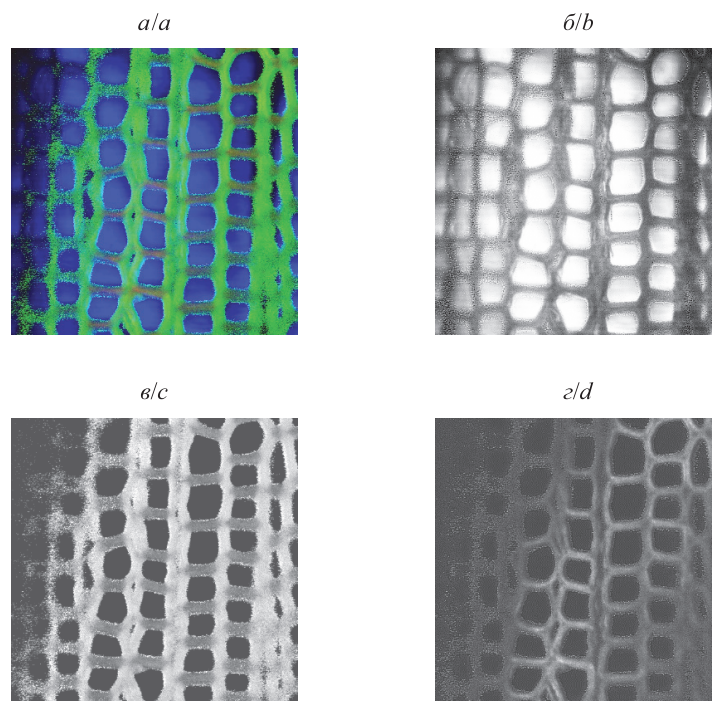


Рис. 1. Разделение изображения по каналам:
а – исходное изображение; б – изображение оптической микроскопии;
в – изображение флуоресцентной микроскопии;
г – изображение поляризационной микроскопии

Fig. 1. Splitting an image into channels:
а – the original image; б – image of optical microscopy;
с – an image of fluorescence microscopy; д – image of polarization microscopy

Сегментация изображений

Визуальный анализ изображений показывает, что на них видны в основном клеточные стенки. Таким образом, периодически расположенные на изображении полости не являются информативными при изучении деформации, поэтому при автоматизации анализа изображений их необходимо исключить. Целью сегментации в алгоритме, представленном в работе, является получение бинарной маски для определения областей, в которых будет проводиться анализ деформации.

Для получения изображений структуры среза ствола использовалась сегментация методом Отсу [3]. Данный алгоритм является оптимальным в связи с тем, что он определяет порог яркости по ее энтропии.

На любом оптическом изображении можно выделить постоянную компоненту (фон) и динамическую компоненту, которая изменяется при смене объектов или смещении камеры. Для получения реального откорректированного изображения прежде всего необходимо определить постоянную компоненту, которая содержит большинство постоянных дефектов и искажений. Существует проблема неоднородного фона, которая может быть решена с помощью определения порога в локальной области для каждого пикселя изображения, однако это требует больших временных затрат. Более быстрым является метод коррекции фона, но для него требуются предварительная подготовка изображения одного фона и калибровка микроскопа. Оба способа могут использоваться для решения данной задачи.

В простейшем случае изображение фона получается при помощи снимка пустого предметного стекла без объекта. В других случаях для построения изображения фона используются частотное преобразование Фурье и низкочастотная фильтрация, так как объекты и фон обычно разнесены в частотном спектре изображения. Низкочастотная фильтрация использует линейное ослабление сигнала относительно всего частотного диапазона за счет умножения каждой частоты на коэффициент C , который является функцией отклонения текущего значения частоты от максимального значения:

$$C(f) = \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_0},$$

где f_0 – минимальная частота; $f_{\max}$ – максимальная частота.

Для получения изображения, наиболее близкого фону, выполняется низкочастотная фильтрация с максимальной частотой, составляющей в данном случае 6 % от всего спектрального диапазона.

В связи с тем что характеристики фона зависят от освещения, для калибровки использовались изображения с минимальным и максимальным освещением. Затем была выполнена традиционная операция коррекции фона [5; 6]:

$$C_{x,y} = \frac{(I_{x,y} - B_{x,y}) \cdot (W_{\max} - B_{x,y})}{W_{x,y} - B_{x,y}},$$

где $I_{x,y}$ – значение яркости пикселя исходного изображения; $B_{x,y}$ – значение пикселя для изображения фона; $W_{x,y}$ – значение пикселя для изображения фона при полном освещении; $W_{\max}$ – мода в гистограмме яркости; $C_{x,y}$ – новое значение яркости пикселя в скорректированном изображении.

Подобная обработка позволяет скорректировать aberrации, обусловленные строением оптической системы микроскопа и ее неравномерным освещением.

Сегментация выполняется на цветном изображении в целях удаления участков, являющихся неинформативными на всех трех каналах. Для сегментации использовался метод Отсу [3], который заключается в переборе порогов с последующим определением оптимального порога. Цель метода состоит в том, чтобы выбрать порог, который минимизирует отношение объединенной дисперсии к дисперсии между классами, определяемыми разбиением гистограммы на участки по этому порогу. Общая дисперсия определяется как

$$\sigma_{\text{within}}^2(T) = n_B(T) \cdot \sigma_B^2(T) + n_0(T) \cdot \sigma_0^2(T),$$

где $n_B(T)$, $n_0(T)$ – количество элементов в классах; $\sigma_B^2(T)$, $\sigma_0^2(T)$ – дисперсия внутри классов; T – порог.

В результате получается изображение с большим набором разнотипных объектов. Для их классификации проводится определение геометрических свойств, и объекты, не попадающие в определенный интервал геометрических характеристик, удаляются (рис. 2, б). Дефекты формы объектов корректируются посредством морфологических операций открытия и замыкания (open/close) (см. рис. 2, в).

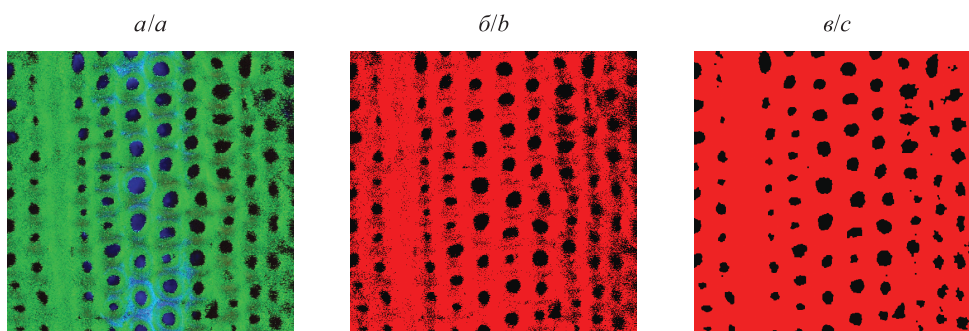


Рис. 2. Выделение информативных участков на изображении:
а – исходное изображение; б – результат сегментации методом Отсу;
в – результат коррекции формы методами математической морфологии

Fig. 2. Selection of informative areas in the image:
а – the original image; б – the result of segmentation by the Otsu method;
с – the result of correction of the form by methods of mathematical morphology

Анализ деформации

Для дальнейшего анализа изображения был разработан обобщенный алгоритм деформации. Изображения разделялись по каналам, так как каждый канал содержит уникальную информацию. Для описания деформации анализировалось смещение слоев древесины относительно друг друга посредством построения поля оптического потока. Обычно методы оптического потока применяются для анализа движения в видеопоследовательности, но в данном случае поток вычислялся между двумя статическими изображениями, которые соответствовали последовательным слоям микроскопического препарата в трехмерном пространстве.

Существуют различные методы вычисления оптических потоков. В целях получения более точного результата для дальнейшего анализа в работе были применены алгоритм Лукаса – Канаде и блочный метод [7–9]. При использовании первого метода информация о потоке определяется для окрестности каждой точки изображения, поэтому ее выгодно представить в виде вектора в цветном пространстве, где цвет характеризует направление вектора, а яркость – его величину. Цвет отображается посредством трех координат, чаще всего RGB. В цветовом пространстве каждому вектору оптического потока соответствует определенный цвет. Второй метод обеспечивает возможность непосредственного представления вектора смещения на изображении.

Оптический поток был рассчитан отдельно по каждому из трех каналов для изображений оптической, поляризационной и флуоресцентной микроскопии.

Построение оптического потока для канала В отражает изменение яркостно-геометрических характеристик между текущим и предыдущим изображением и, соответственно, позволяет оценить геометрическое смещение структуры клеточной стенки, ее целлюлозного каркаса при деформации. В результате было получено трехмерное представление оптического потока, отражающего деформацию между слоями (рис. 3).

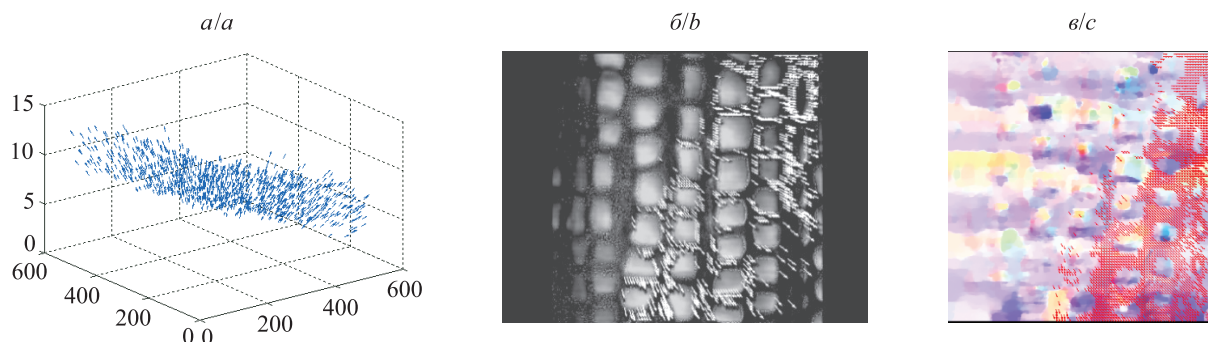


Рис. 3. Построение векторных полей деформации для оптических изображений на основе определения оптических потоков:
а – результат работы блочного метода в трехмерном пространстве;
б – наложение векторного поля для двух слоев на микроскопическое изображение; в – цветное представление оптического потока методом Лукаса – Канаде

Fig. 3. Construction of vector fields for optical images based on the determination of optical flows:
a – the result of the block method work in three-dimensional space;
b – superposition of a vector field for two layers on a microscopic image;
c – color representation of the optical flow by the Lucas – Kanade method

Яркость оптически анизотропных структур, какими являются волокна целлюлозы, зависит от ориентации волокон относительно плоскости поляризации света и изменяется в результате деформации. Угол поворота волокна определяется изменением яркости пикселя на изображении, оптический поток позволяет определить смещение точки волокна между слоями. Таким образом, оптический поток, построенный на основе поляризационных изображений, дает возможность получить модель деформации волокон и оценить их смещение и поворот (рис. 4). Отображение карты деформации может быть выполнено посредством цвета или векторов.

Оптический поток, построенный на основе флуоресцентных изображений, показывает перераспределение химических веществ при деформации (рис. 5).

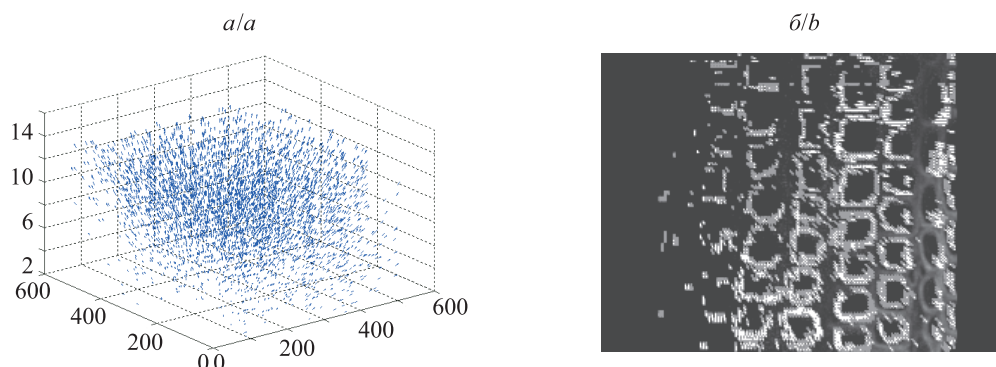


Рис. 4. Построение векторных полей деформации для изображений поляризационной микроскопии на основе определения оптических потоков:
а – результат работы блочного метода в трехмерном пространстве;
б – наложение векторного поля для двух слоев на микроскопическое изображение
Fig. 4. Construction of vector fields for images of polarization microscopy based on the determination of optical flows:
а – the result of the block method work in three-dimensional space;
b – superposition of a vector field for two layers on a microscopic image

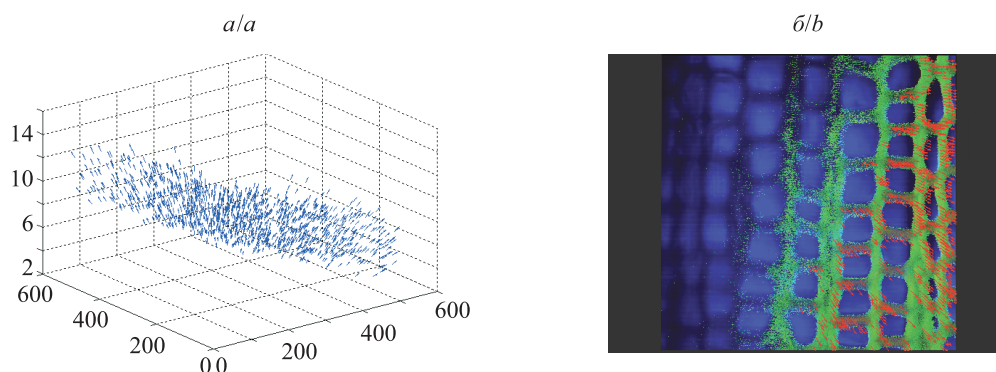


Рис. 5. Построение векторных полей деформации для изображений флуоресцентной микроскопии на основе определения оптических потоков:
а – результат работы блочного метода в трехмерном пространстве;
б – наложение векторного поля для двух слоев на микроскопическое изображение
Fig. 5. Construction of vector fields for fluorescence microscopy images based on the determination of optical flows:
а – the result of the block method work in three-dimensional space;
b – superposition of a vector field for two layers on a microscopic image

Описание алгоритма анализа деформации волокон древесины

Алгоритм состоит из двух этапов. Первый этап представляет собой сегментацию цветного изображения для выделения рабочей области, в которой определяются векторы деформации. Объединение рабочей области с изображением посредством конъюнкции помечает неинформативные области нулевым значением.

Второй этап работы алгоритма осуществляется непосредственно после разделения исходного цветного изображения на три канала [10–11]. Вычисление оптического потока выполняется по изображениям двух последовательных слоев. Потребность в изображении второго слоя реализована за счет обеспечения в цикле буфера хранения изображения. Для изображений поляризационной микроскопии дополнительно определяется поворот растительного волокна на основе анализа значений яркости (рис. 6).

Результатом работы алгоритма является получение трех векторных полей в трехмерном пространстве, определяющих смещение волокон, химический сдвиг и поворот волокна. Реализация данного алгоритма была выполнена в пакете Matlab на основе инструментария для обработки изображений, которые представлены в формате TIFF и находятся в общем для них каталоге (рис. 7). После завершения чтения изображений формируются наборы слоев, на основе которых получаются 3D-изображение и три сечения этого изображения: слева, справа и сверху (аналогично сечению при компьютерной томографии).

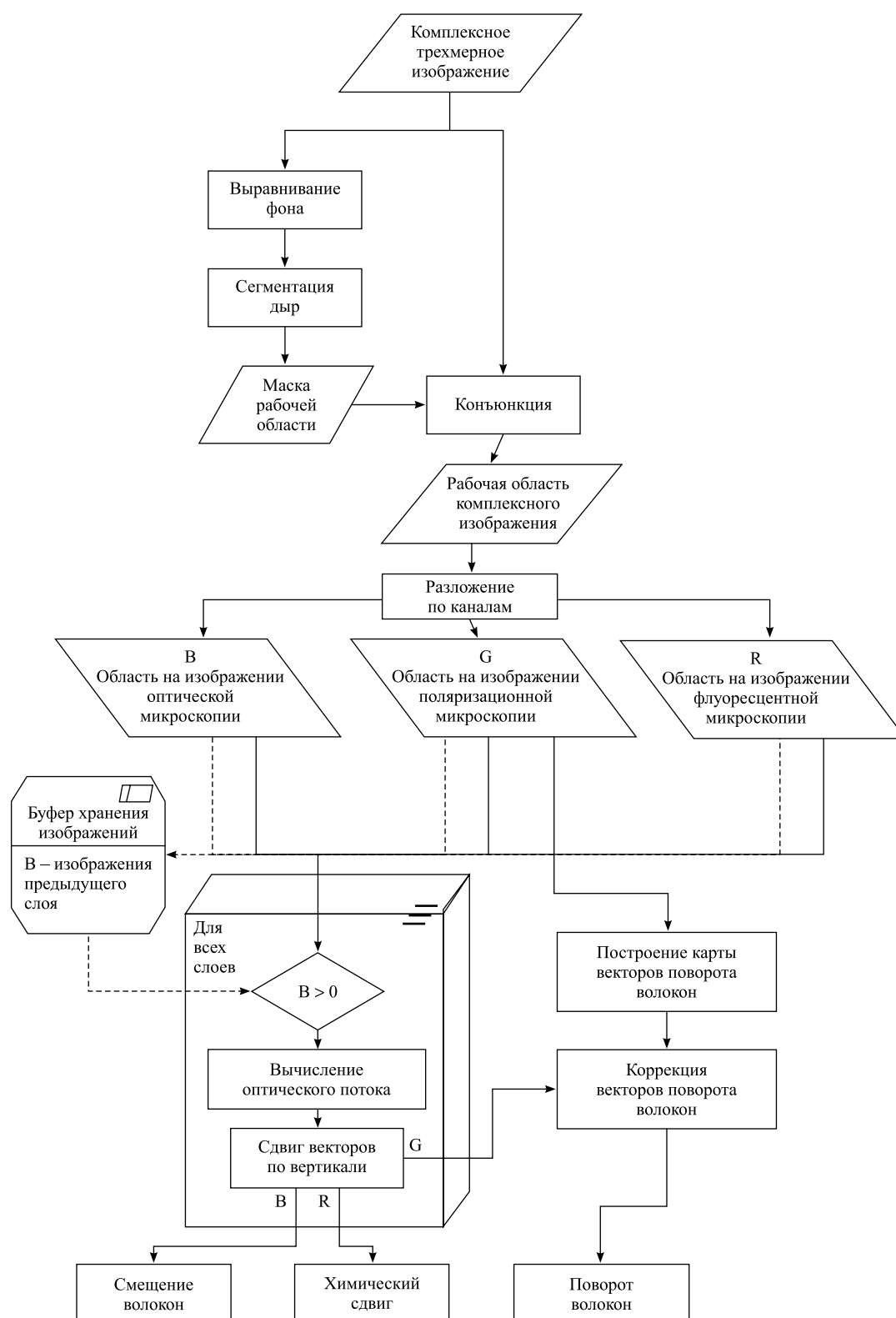


Рис. 6. Схема алгоритма определения изменений растительной структуры растения во время стресса
 Fig. 6. Scheme of algorithm for determination of changes in plant structure during plant stress

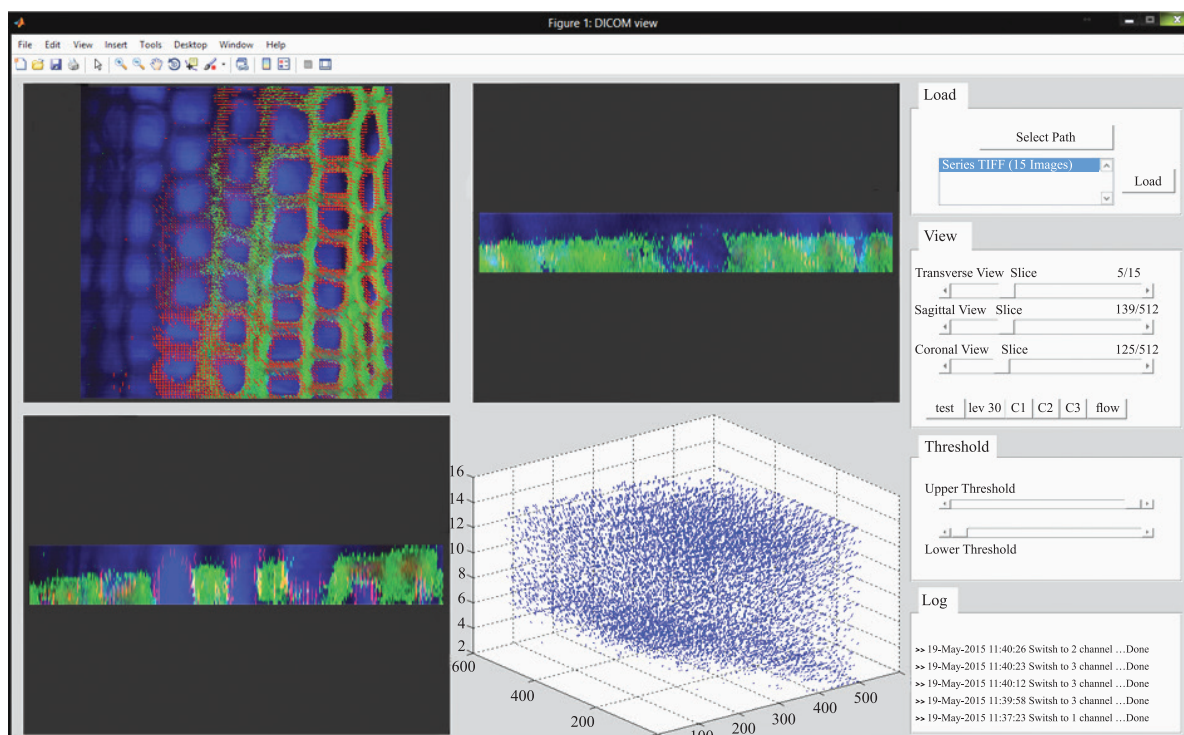


Рис. 7. Копия экрана приложения анализа деформации клеток при стрессе

Fig. 7. A copy of the screen for the application of the analysis of cells deformation under the stress

Дополнительные функции построения оптического потока для алгоритма Лукаса – Канаде реализованы на C++ с использованием библиотеки OpenCV. Они подключены в Matlab посредством технологии MEX.

Тестирование

Для тестирования алгоритма была разработана модель структуры, состоящая из девяти ячеек, на которую с левой стороны путем применения средств моделирования COMSOL Multiphysics оказывалось давление при помощи поверхности, наклоненной под разными углами. Для определения эффективности алгоритма оценивались равномерность распределения векторного потока по объему и соответствие его направления углу наклона плоскости. Проведенное тестирование показало, что при равномерном воздействии оптический поток также равномерно распределен по всему пространству с шагом, который задается в алгоритме. Соответствие угла наклона плоскости характеристике векторного потока представлено в таблице.

Соответствие наклона плоскости давления характеристикам векторного потока
Correlation between the slope of the pressure plane and the characteristics of the vector flow

Угол наклона плоскости, град	5	10	15	20	25	30	35	40
Направление вектора в потоке, град	50	65	70	75	80	85	90	95
Длина вектора в потоке, у. е.	3,25	3,85	3,99	4,01	4,2	4,18	4,23	4,24
Ошибка при определении длины вектора	0,000 13	0,004 362	0,002 533	0,088 97	0,020 67	0,047 9	0,014 3	0,011 51

Дополнительно оценивалась длина вектора по расчетному значению, пропорциональному косинусу угла наклона по сдвигу областей. Разница полученных значений с реальной длиной вектора составила

ошибку. Анализ данной ошибки показал, что ее величина колеблется в пределах 0,1 пк. Она возникает в процессе дискретизации векторного пространства оптического потока. Данный результат является удовлетворительным и показывает эффективность вычислений, выполненных в ходе работы алгоритма.

Заключение

Представленный алгоритм предназначен для установления изменений в структуре клеток растений в состоянии стресса. Он основан на использовании трех типов изображений и позволяет определить деформацию, химический сдвиг и поворот волокон.

Алгоритм состоит из двух частей, что повышает скорость процесса за счет параллельных вычислений. По результатам работы алгоритма можно оценить физиологические процессы, происходящие в деформированной ткани растения, а также проконтролировать результат математического моделирования.

Данный алгоритм основан на использовании оптического потока для совокупности статических изображений. В отличие от традиционных методов послойного анализа применение оптического потока позволяет выявить особенности объемной деформации структур тканей растений.

Библиографические ссылки

1. Ortega J. K. E. Plant Cell Growth in Tissue // *Plant Physiol.* 2010. Vol. 154, issue 3. P. 1244–1253. DOI: 10.1104/pp.110.162644.
2. Selig B., Luengo Hendriks C. L., Bardage S., et al. Automatic measurement of compression wood cell attributes in fluorescence microscopy images // *J. Microscopy.* 2012. Vol. 246, issue 3. P. 298–308. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2012.03621.x.
3. Meinhardt-Llopis E., Pérez J. S., Kondermann D. Horn-Schunck optical flow with a multi-scale strategy // *Image Process. On Line.* 2013. № 3. P. 151–172. DOI: 10.5201/ipol.2013.20.
4. Wayne R. O. *Light and Video Microscopy.* San Diego ; London ; Waltham : Academic Press, 2013.
5. Kanade T., Yin Z., Bise R., et al. Cell image analysis: Algorithms, system and applications // *Applications of Computer Vision : IEEE Workshop (Kona, 5–7 January, 2011).* Kona, 2011. P. 374–381.
6. Tao M., Bai J., Kohli P., et al. SimpleFlow: A Non-iterative, sublinear optical flow algorithm // *Comput. Graph. Forum.* 2012. Vol. 31. P. 345–353.
7. Sun D., Roth S., Black M. J. Secrets of optical flow estimation and their principles // *Computer Vision and Pattern Recognition : IEEE Comput. soc. conf. (San Francisco, 13–15 June, 2010).* San Francisco, 2010. P. 2432–2439.
8. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing.* 3rd ed. New Jersey : Prentice-Hall, 2008.

References

1. Ortega J. K. E. Plant Cell Growth in Tissue. *Plant Physiol.* 2010. Vol. 154, issue 3. P. 1244–1253. DOI: 10.1104/pp.110.162644.
2. Selig B., Luengo Hendriks C. L., Bardage S., et al. Automatic measurement of compression wood cell attributes in fluorescence microscopy images. *J. Microscopy.* 2012. Vol. 246, issue 3. P. 298–308. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2012.03621.x.
3. Meinhardt-Llopis E., Pérez J. S., Kondermann D. Horn-Schunck optical flow with a multi-scale strategy. *Image Process. On Line.* 2013. No. 3. P. 151–172. DOI: 10.5201/ipol.2013.20.
4. Wayne R. O. *Light and Video Microscopy.* San Diego ; London ; Waltham : Academic Press, 2013.
5. Kanade T., Yin Z., Bise R., et al. Cell image analysis: Algorithms, system and applications. *Applications of Computer Vision : IEEE Workshop (Kona, 5–7 January, 2011).* Kona, 2011. P. 374–381.
6. Tao M., Bai J., Kohli P., et al. SimpleFlow: A Non-iterative, sublinear optical flow algorithm. *Comput. Graph. Forum.* 2012. Vol. 31. P. 345–353.
7. Sun D., Roth S., Black M. J. Secrets of optical flow estimation and their principles. *Computer Vision and Pattern Recognition : IEEE Comput. soc. conf. (San Francisco, 13–15 June, 2010).* San Francisco, 2010. P. 2432–2439.
8. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing.* 3rd ed. New Jersey : Prentice-Hall, 2008.

Статья поступила в редакцию 27.11.2017.
Received by editorial board 27.11.2017.