



Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна

1

# ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ФОРМОВАНИЯ БУМАГИ И КАРТОНА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

**Д.т.н., профессор Мидуков Николай Петрович**

**тел: +7 900 657 3103**

**E-mail: [midukovnikolai@mail.ru](mailto:midukovnikolai@mail.ru)**

*Кафедра процессов и аппаратов химической технологии*



# МИКРОСКОПИЯ КАК СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ БУМАГИ И КАРТОНА <sup>2</sup>

История развития исследований по микроструктуре бумаги и картона



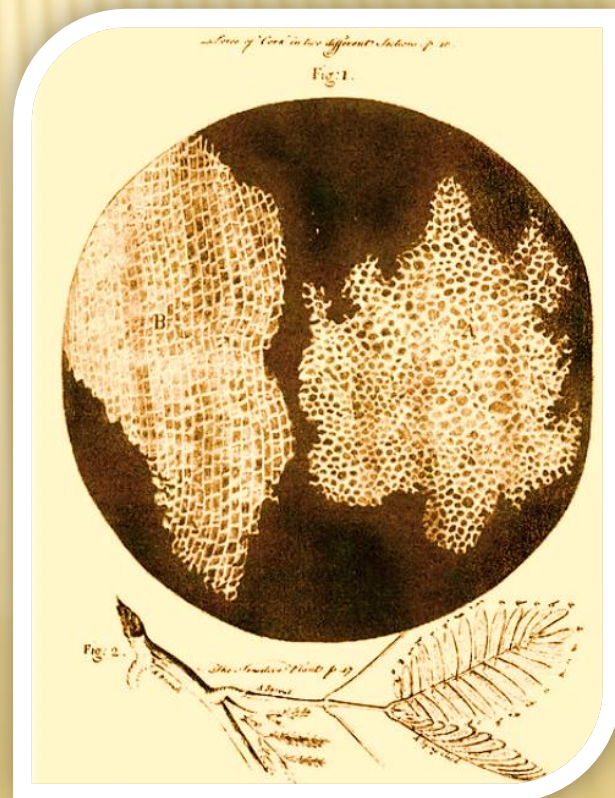
Роберт Гук

Английский физик и ботаник рассмотрел и опубликовал срез пробкового дуба. Обнаружил, что дерево состоит из ячеек, похожих на соты, которые он назвал клетками (cell (**1665** г.))



Лондонское королевское общество

Hooke, R. *Micrographia* – London. - 1665.



История развития исследований по микроструктуре бумаги и картона

**1665 –  
конец XIX века**

Исследования волокон бумаги и картона велись с помощью оптической микроскопии. Микроструктура бумаги и картона представлялась как переплетённые между собой волокна.

**Конец XIX -  
начало XX века**

Параллельно с развитием оптической микроскопии (повышение разрешения, развитие фазово-контрастной микроскопии), исследуется связеобразование волокон.

**Середина  
XX века**

Прорыв в исследовании микроструктуры бумаги и картона, связанный с развитием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Возросло разрешение до 3-10 нм, в 300 раз увеличилась глубина резкости. Принята гипотеза о физико-химической природе образования связей между волокнами

**Конец  
XX века**

Вместе с микроскопией успешно применяются цифровые технологии при анализе и обработке данных исследований микроструктуры волокон бумаги и картона. Появляются такие приборы как: Fiber tester, MorfiCompact. Разрабатываются стандарты на исследование бумаги и картона

## История развития исследований по микроструктуре бумаги и картона

---

**Конец  
XX века**

СЭМ развивается дальше. Появление детектора отражённых электронов (BSE) в качестве модуля СЭМ позволяет картировать волокнистый материал по химическим элементам

**Начало XXI**

СЭМ развивается дальше. Появление ионной резки открывает возможность по новому взглянуть на микроструктуру волокнистого материала.

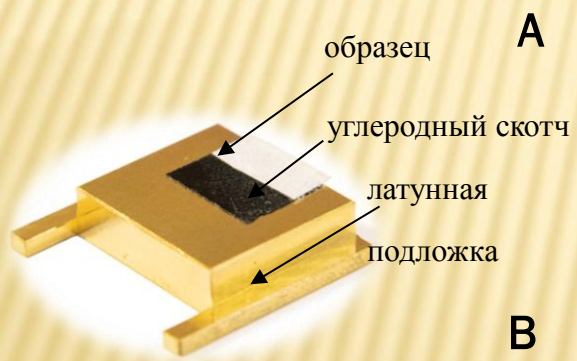
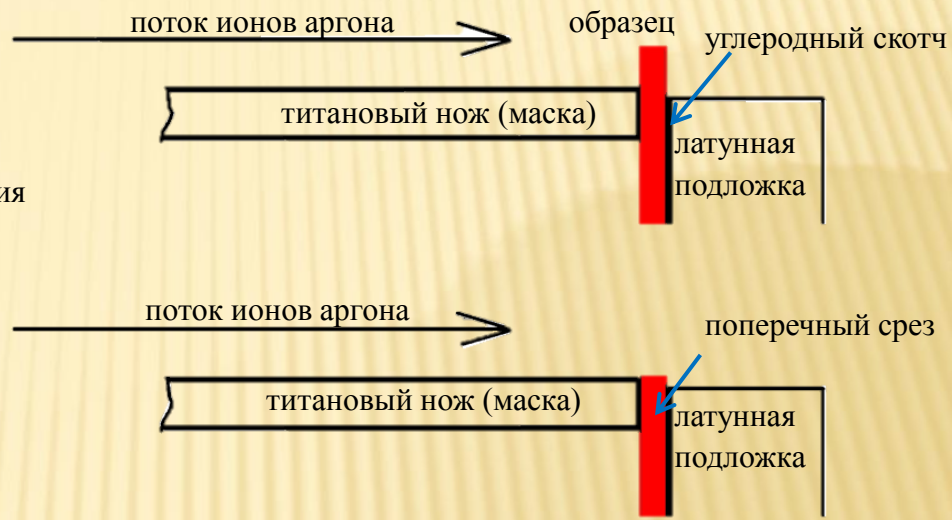
**Конец  
XX века**

Основным сырьём для производства многих видов бумаги и картона становится МАКУЛАТУРА, которая характеризуется неопределённостью состава, наличием примесей, неравномерным распределением волокон.

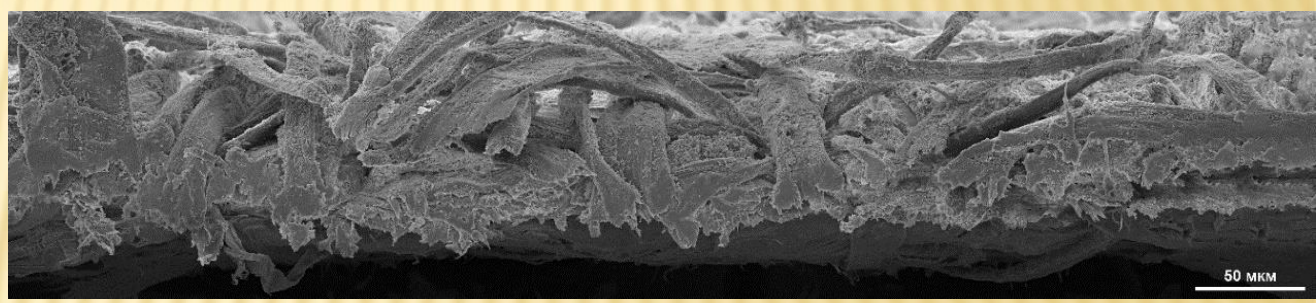
**Начало XXI**

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки (ПАТЕНТ № 2723972)

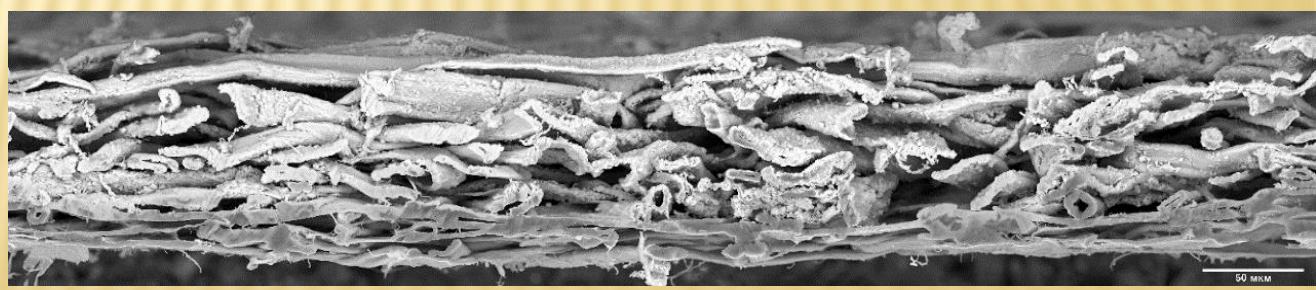
## Схема ионной резки двухслойного картона



**Фиксация образца на латунной подложке**



**В**



Изображения поперечных срезов образцов картона, полученных с помощью электронного микроскопа: А – срез, осуществлённый ножом; В – срез, полученный ионной резкой.

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки



Установка для ионной резки Technoorg Linda SEMPrep2 (модель SC-2100)

Визуализация поперечных срезов подготовленных образцов производилась с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH, производитель – TESCAN (Чешская Республика).

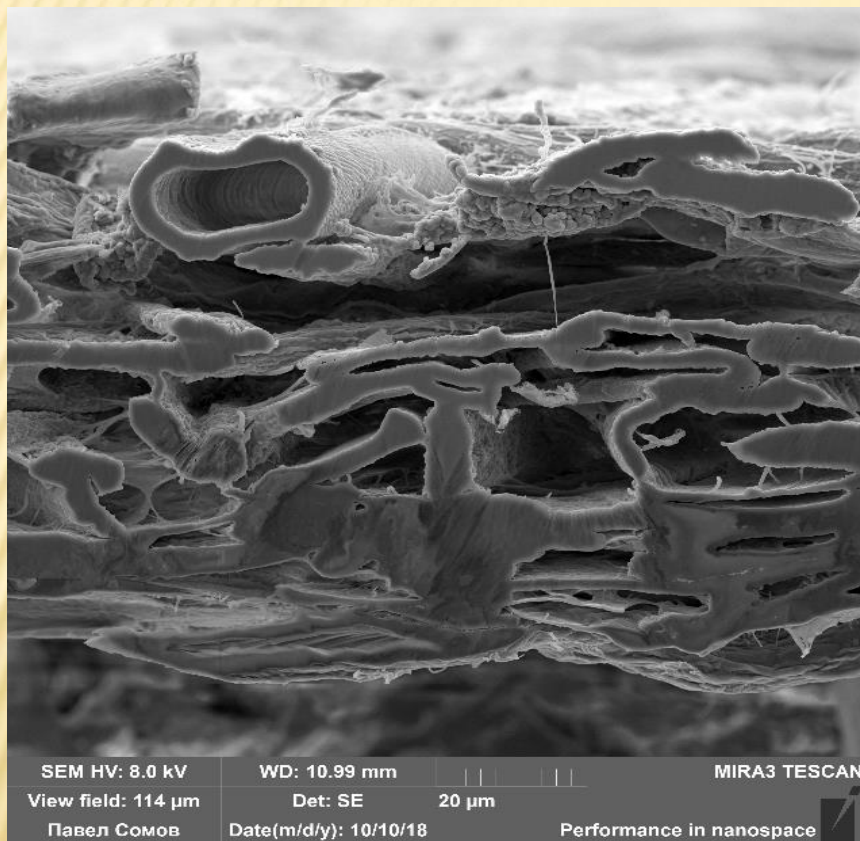
Преимущества:

- Один срез позволяет оценить ряд физико-механических показателей;
- Возможность оценки каждого слоя многослойного картона или бумаги;

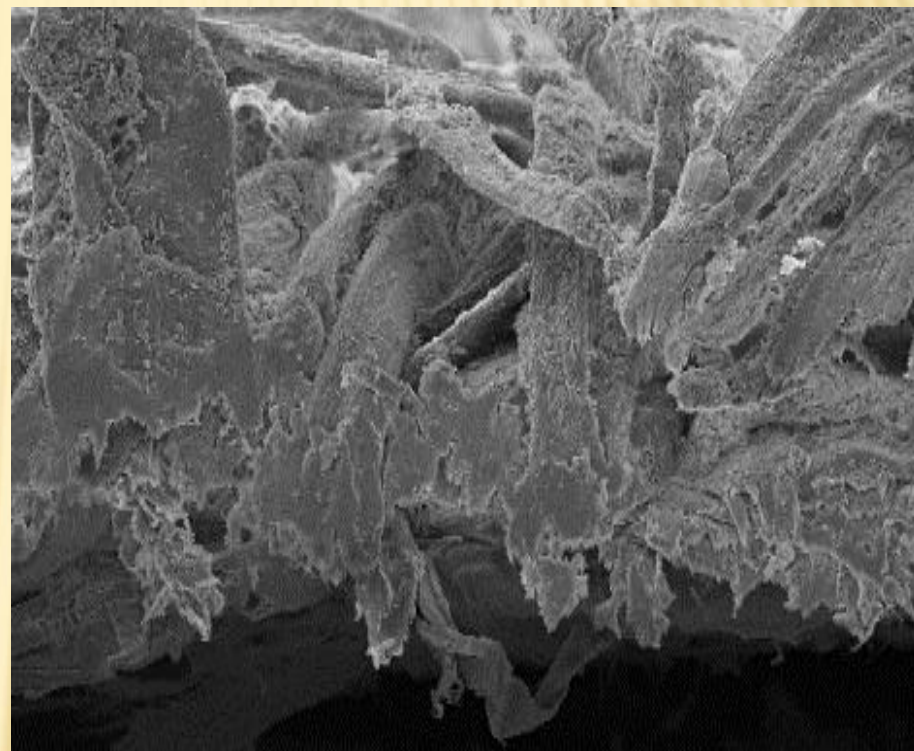
Недостатки:

- Дорогое оборудование
- Сложность обработки данных графического анализа

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки



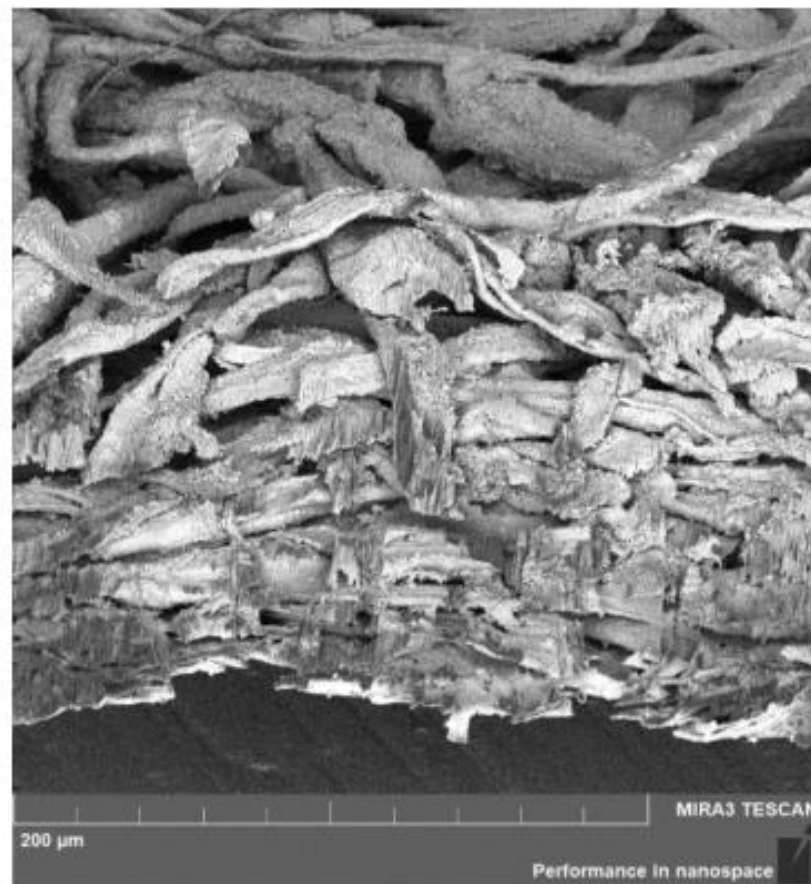
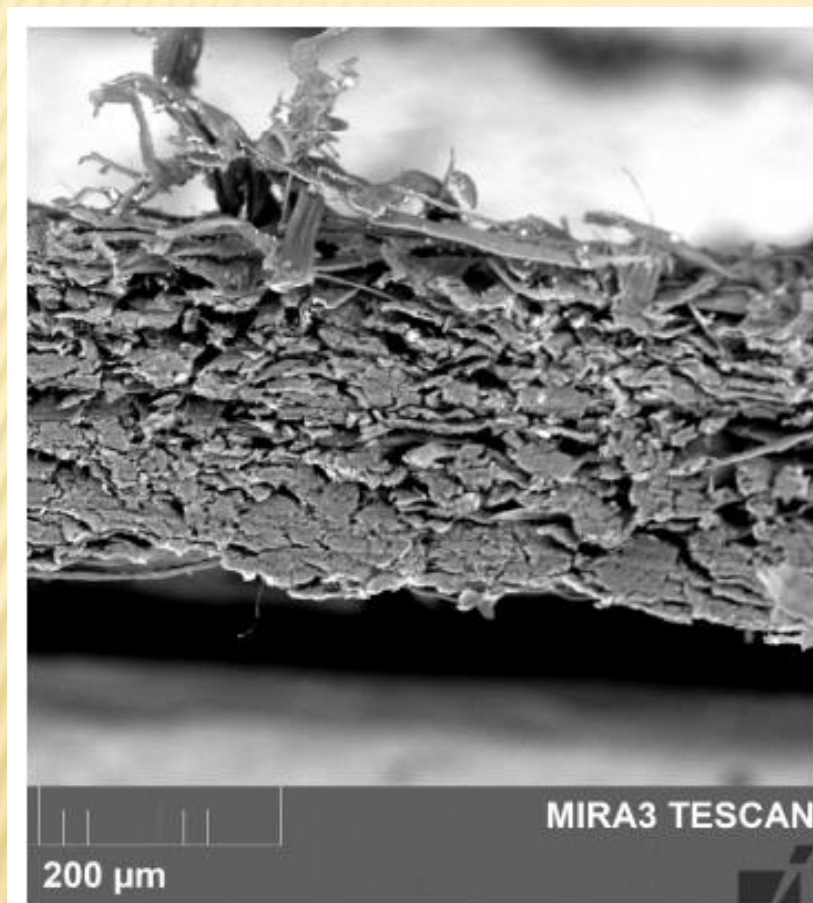
Ионная резка



Срез, выполненный ножевым инструментом

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки

8

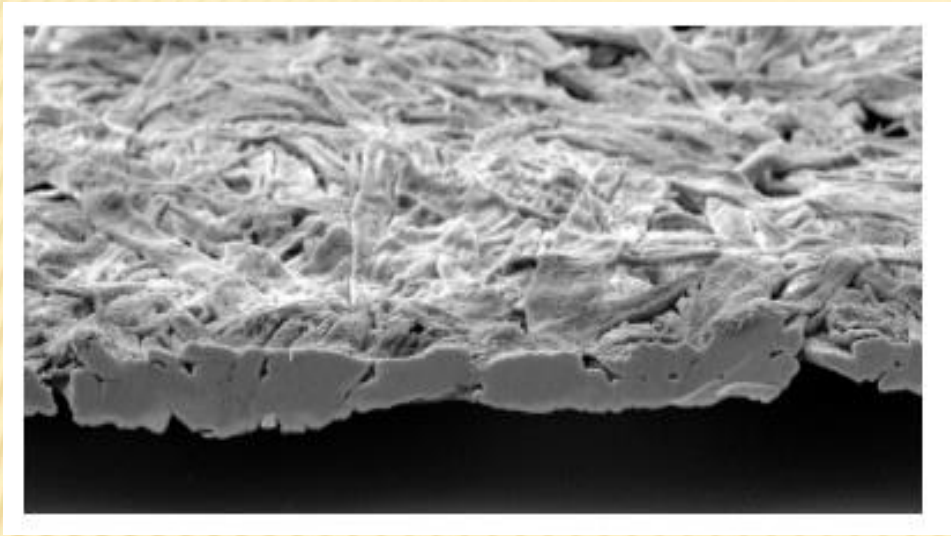


Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -250 мкм; продолжительность резки - 5 мин; энергия ионного пучка - 0 кэВ

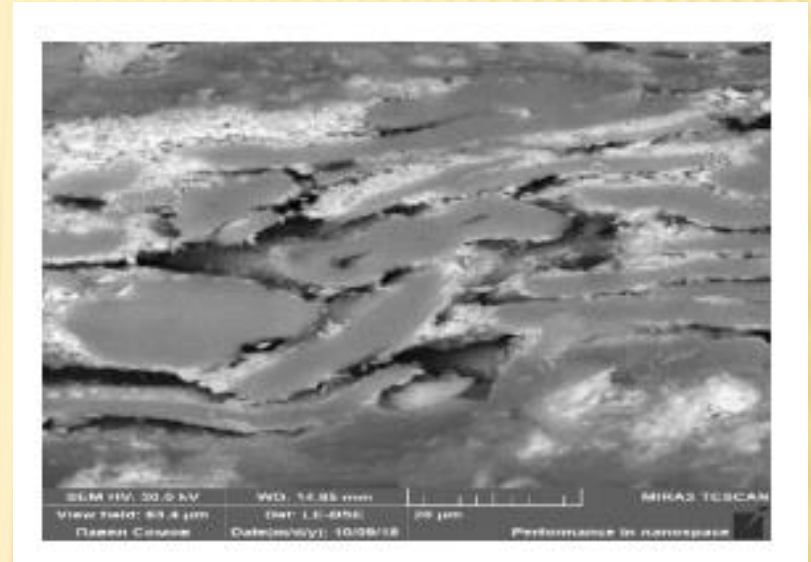
Поперечный срез двухслойного волокнистого материала: толщина среза -200 мкм; продолжительность резки - 40 мин; энергия ионного пучка - 15 кэВ



# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки 9



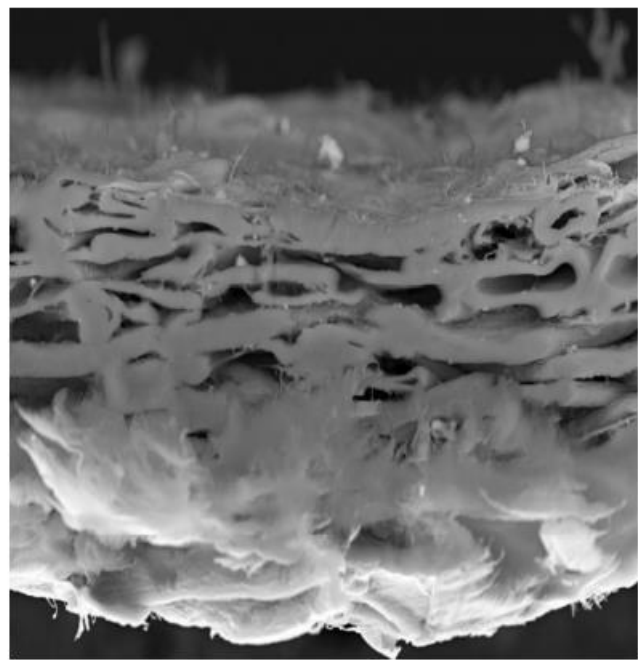
Поперечный срез двухслойного картона тест-лайнера: толщина среза - 50 мкм; продолжительность резки - 40 мин; энергия ионного пучка - 12 кэВ



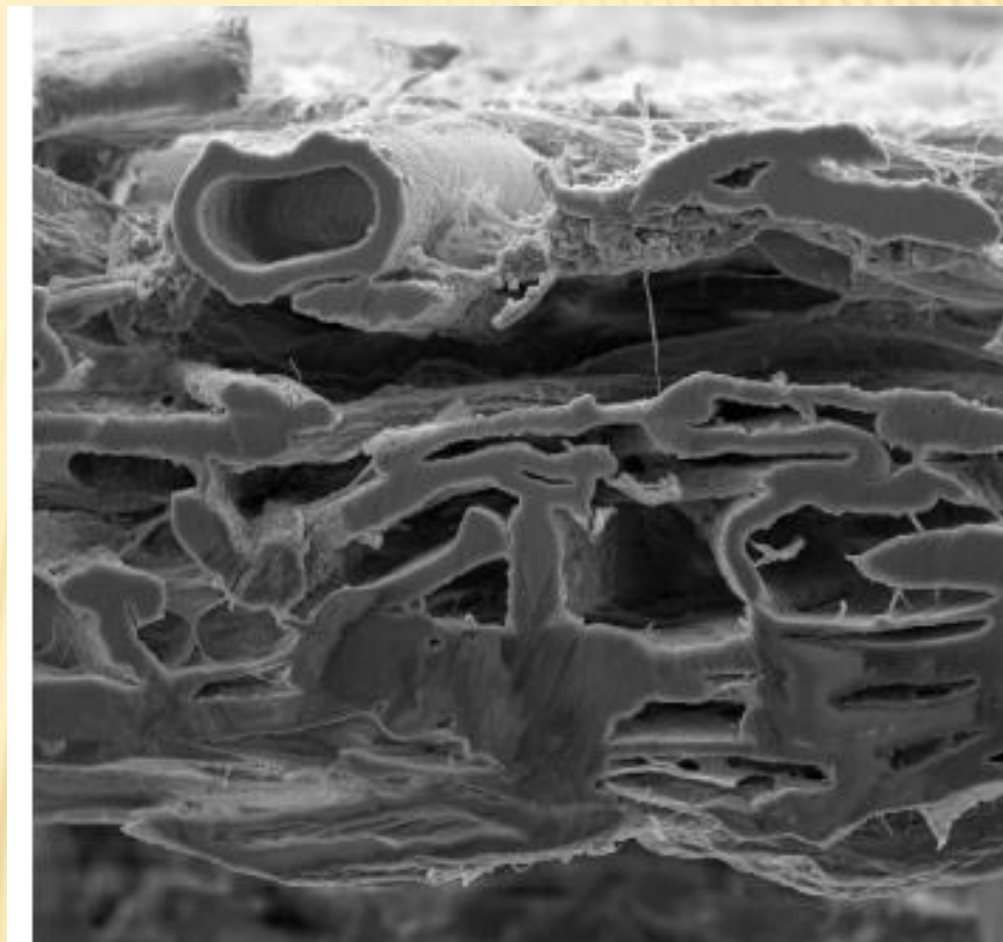
Поперечный срез двухслойного картона тест-лайнера: толщина среза - 150 мкм; продолжительность резки - 40 мин; энергия ионного пучка - 8 кэВ

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки

10

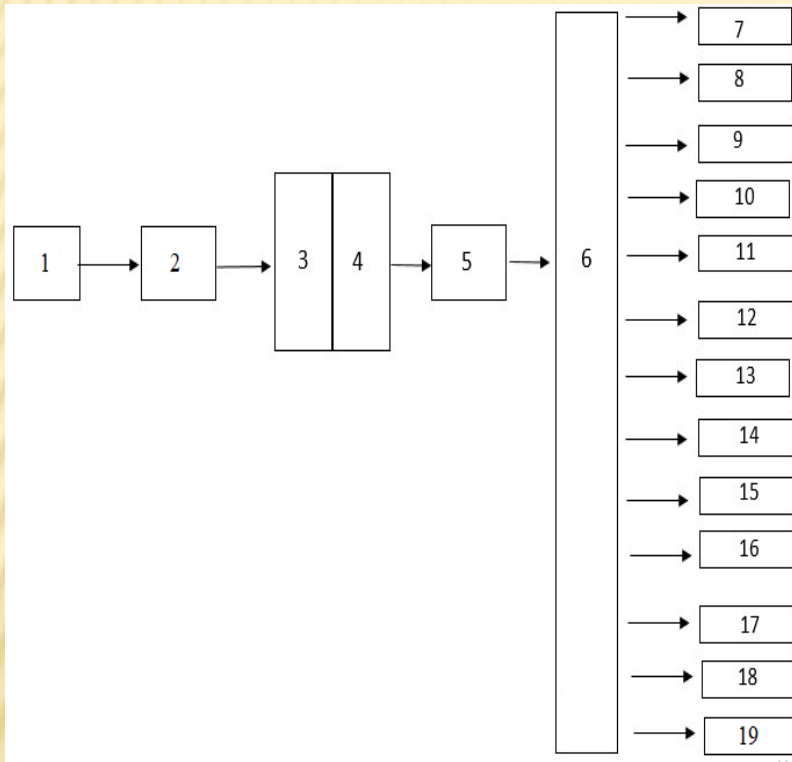


Поперечный срез  
двухслойного волокнистого  
материала: толщина среза -  
150 мкм;  
продолжительность резки -  
1 ч; энергия ионного пучка  
- 8 кэВ



Поперечный срез двухслойного волокнистого  
материала: толщина среза -150 мкм;  
продолжительность резки - 2 ч; энергия ионного  
пучка - 8 кэВ

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки (ПАТЕНТ № 2723972)



Последовательность выполнения стадий подготовки поперечного среза для оценки параметров двухслойного тест-лайнера с белым покровным слоем

- 1 - подготовка образцов бумаги или картона
- 2 - подготовка поперечного среза ионной резкой
- 3 - получение цифрового изображения поперечного среза
- 4 - подготовка панорамных снимков поперечного среза

5 - графическое преобразование изображений настройка контрастности оттенков цветов

6 - графическое преобразование изображений построение профилей границ слоёв, областей срезов волокон,...

7 - оценка шероховатости слоёв картона

8 - оценка равномерности распределения толщины слоя

9 - 19 - оценка показателей, определяющих физико-механические свойства бумаги и картона

# Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки

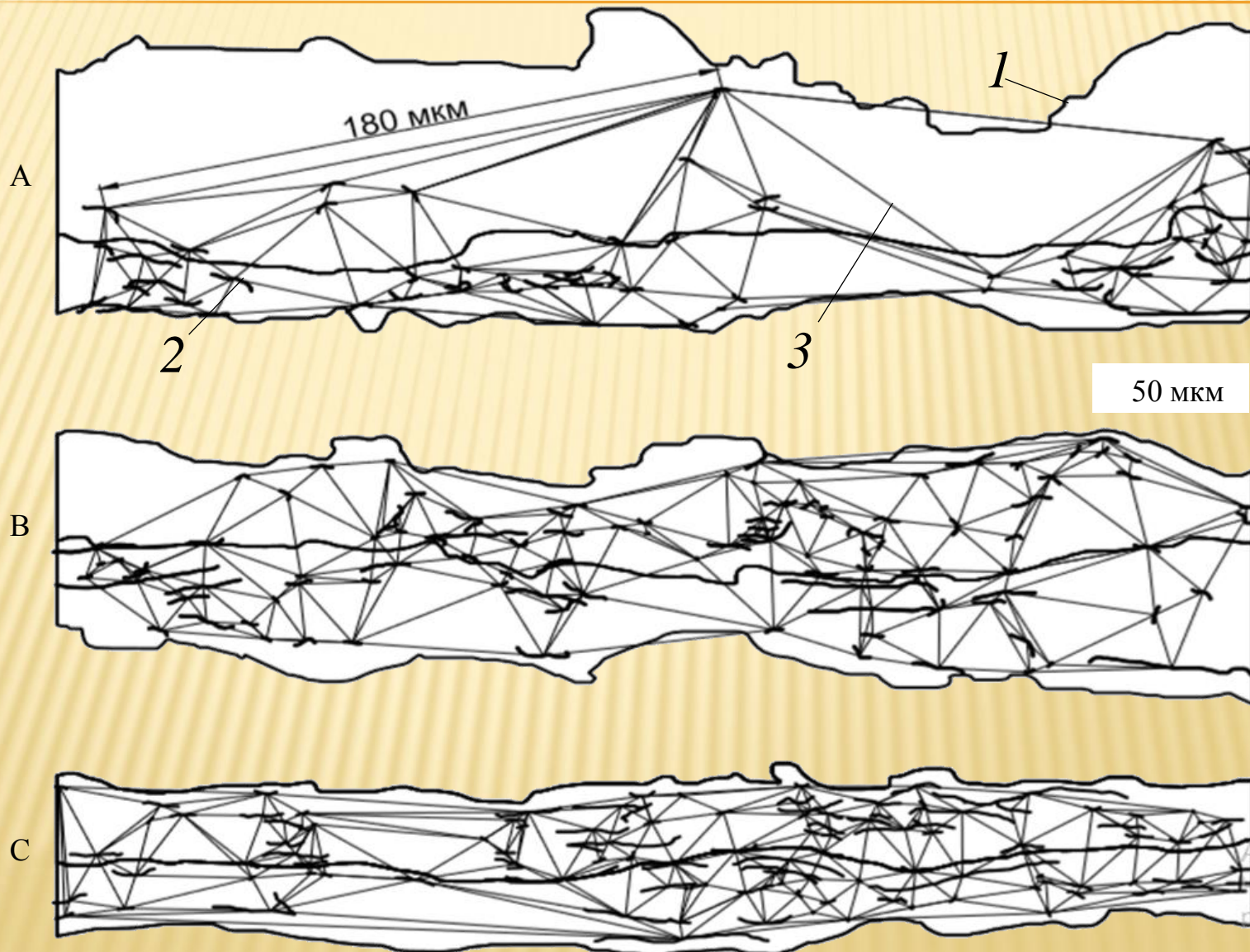
Поперечные срезы двухслойного картона, полученного методом ионной резки после графической обработки



А – покровный слой картона получен методом аэродинамического формования;  
В – покровный слой картона получен из волокон, подготовленных сухим способом и добавленных в массу;  
С – покровный слой картона получен из волокон, подготовленных сухим способом с последующим размолем в водной среде

# Метод определения равномерности распределения линий контактов волокон в поперечном срезе 13

## контактов волокон в поперечном срезе

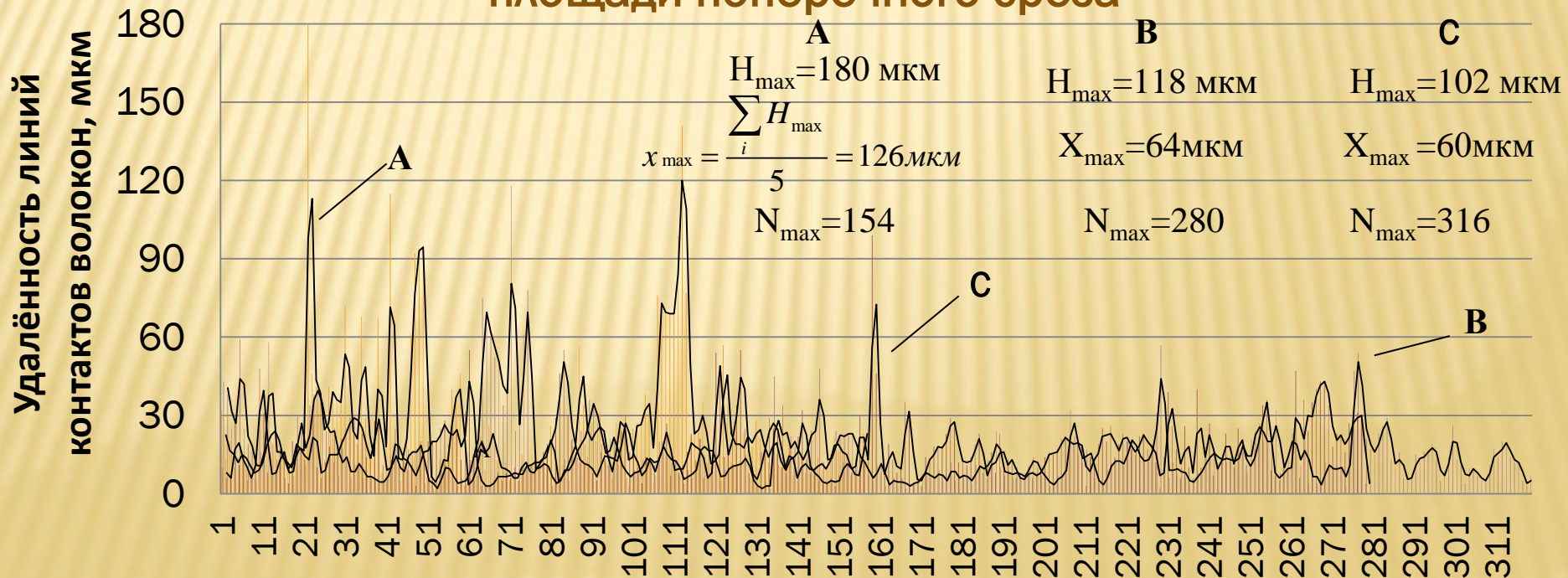


1—профили границ слоёв; 2—линии контактов волокон; 3—отрезки, соединяющие центры линий контактов волокон

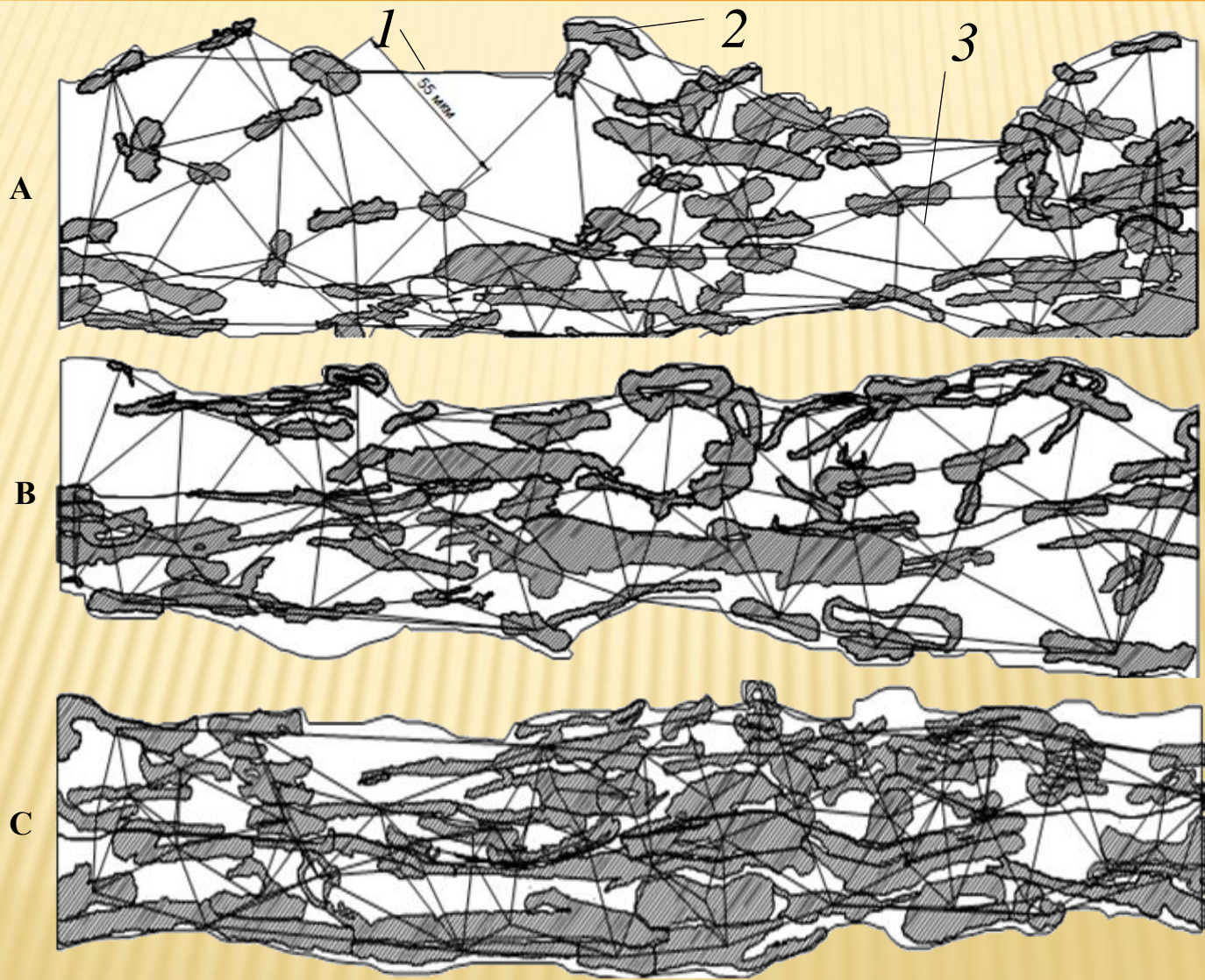
# Протяжённость линий контактов волокон в поперечном срезе двухслойного картона тест-лайнера 14

Наименование слоя	Протяжённость контактов волокон, мкм		
	вариант А	вариант В	вариант С
Покровный	<u>102</u>	<u>414</u>	<u>625</u>
Нижний	394	452	466
Двухслойный картон	496	866	1090

## Равномерность распределения линий контактов волокон по площади поперечного среза



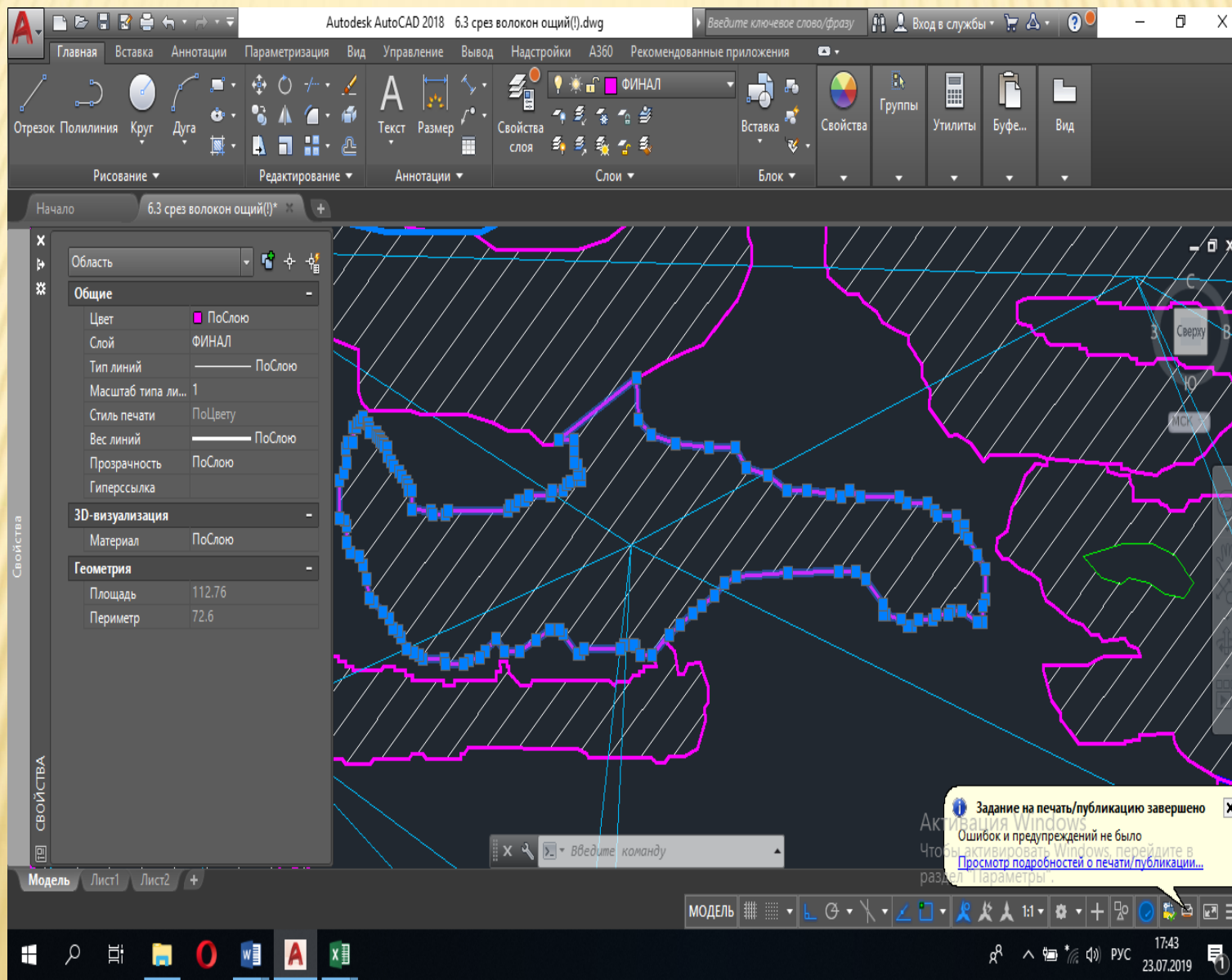
# Области срезов волокон и определение равномерности их распределения в поперечном сечении картона



1 – профили границ слоёв; 2 – области срезов волокон; 3 – отрезки, соединяющие центры областей срезов волокон

# Области срезов волокон и определение равномерности их распределения в поперечном сечении картона

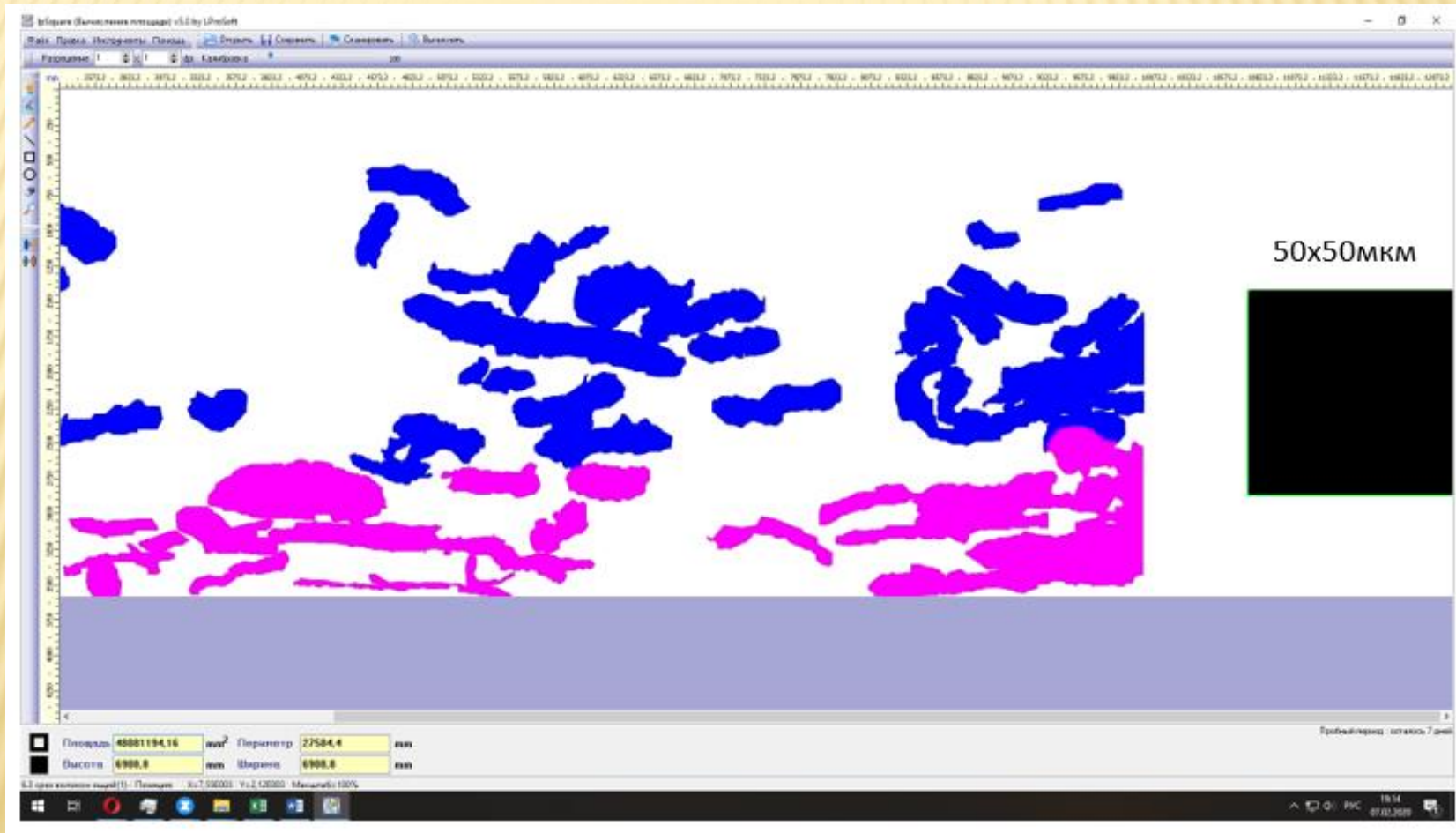
16





# Области срезов волокон и определение равномерности их распределения в поперечном сечении картона

Области среза волокон двухслойного материала в программе IProsoft

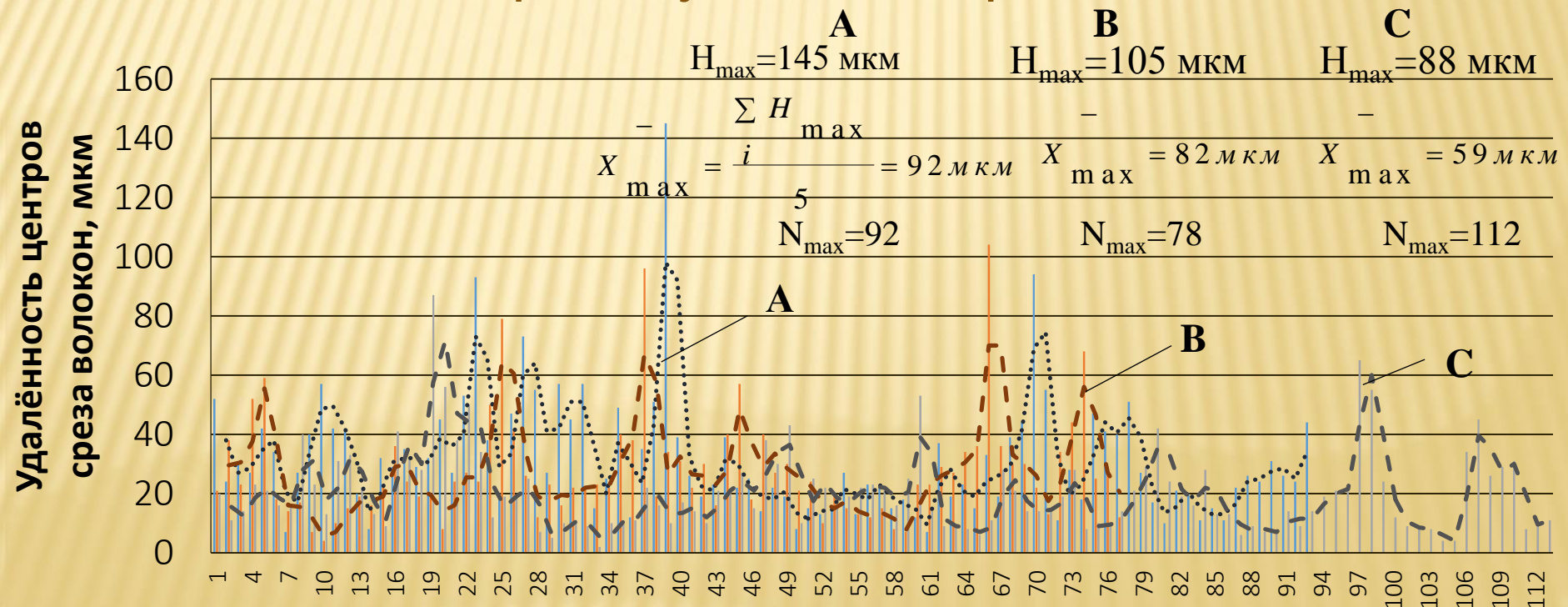


# Области срезов волокон в поперечном сечении двухслойного картона тест-лайнера

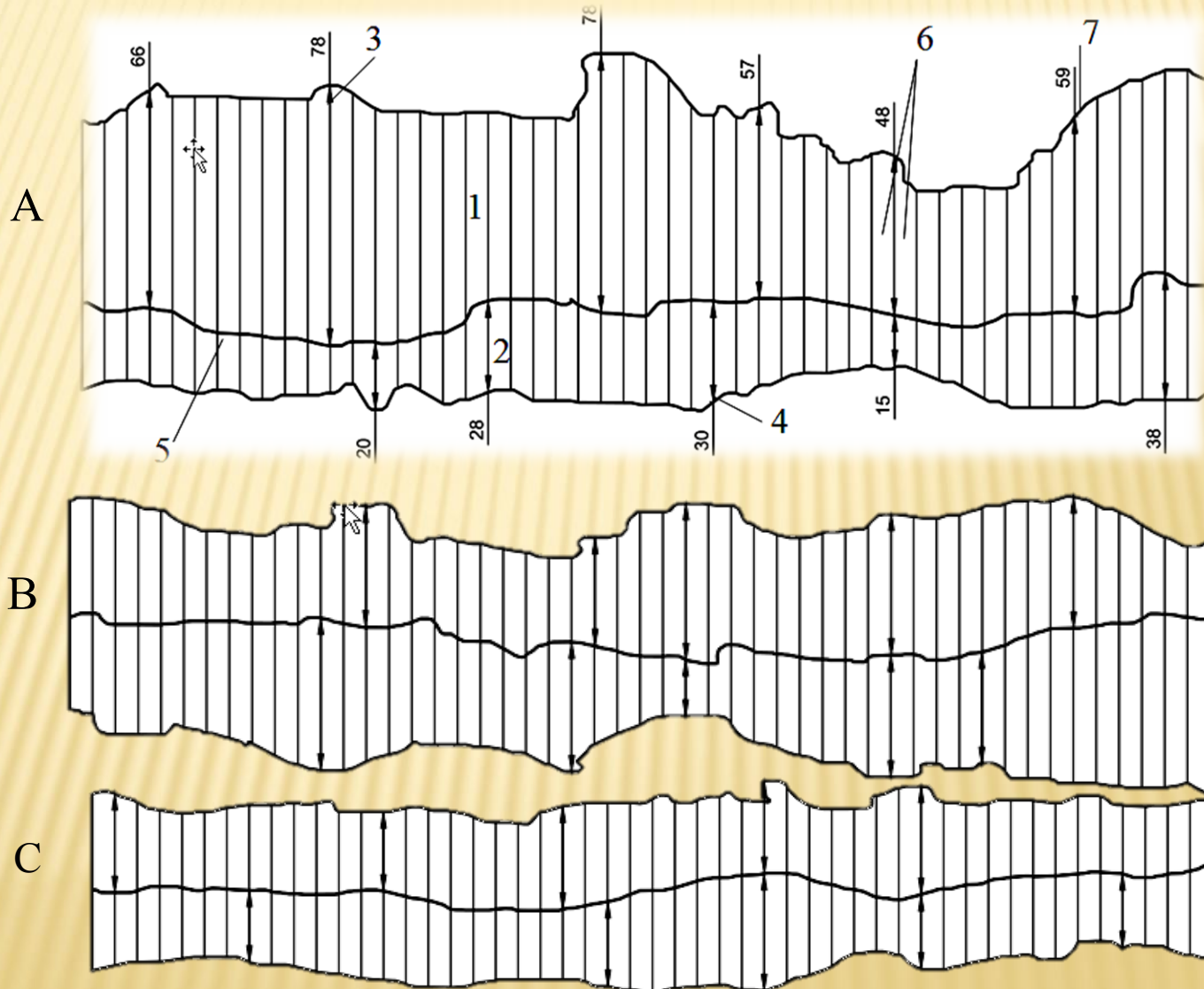
18

Наименование слоя	Области срезов волокон, мкм <sup>2</sup>		
	вариант А	вариант В	вариант С
Покровный	4762	4619	4789
Нижний	4669	4763	4759
Двухслойный картон	9431	9382	9548

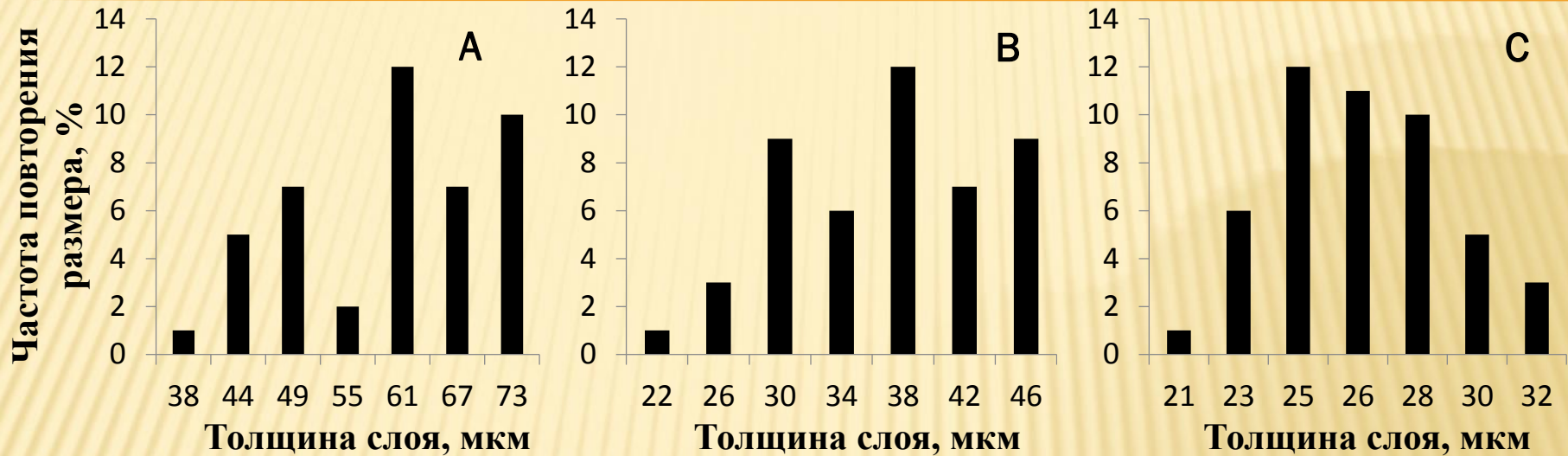
Равномерность распределения волокон по площади поперечного среза двухслойного картона



## Области поперечных срезов слоёв тест-лайнера



## Диаграммы распределения толщины покровных слоёв



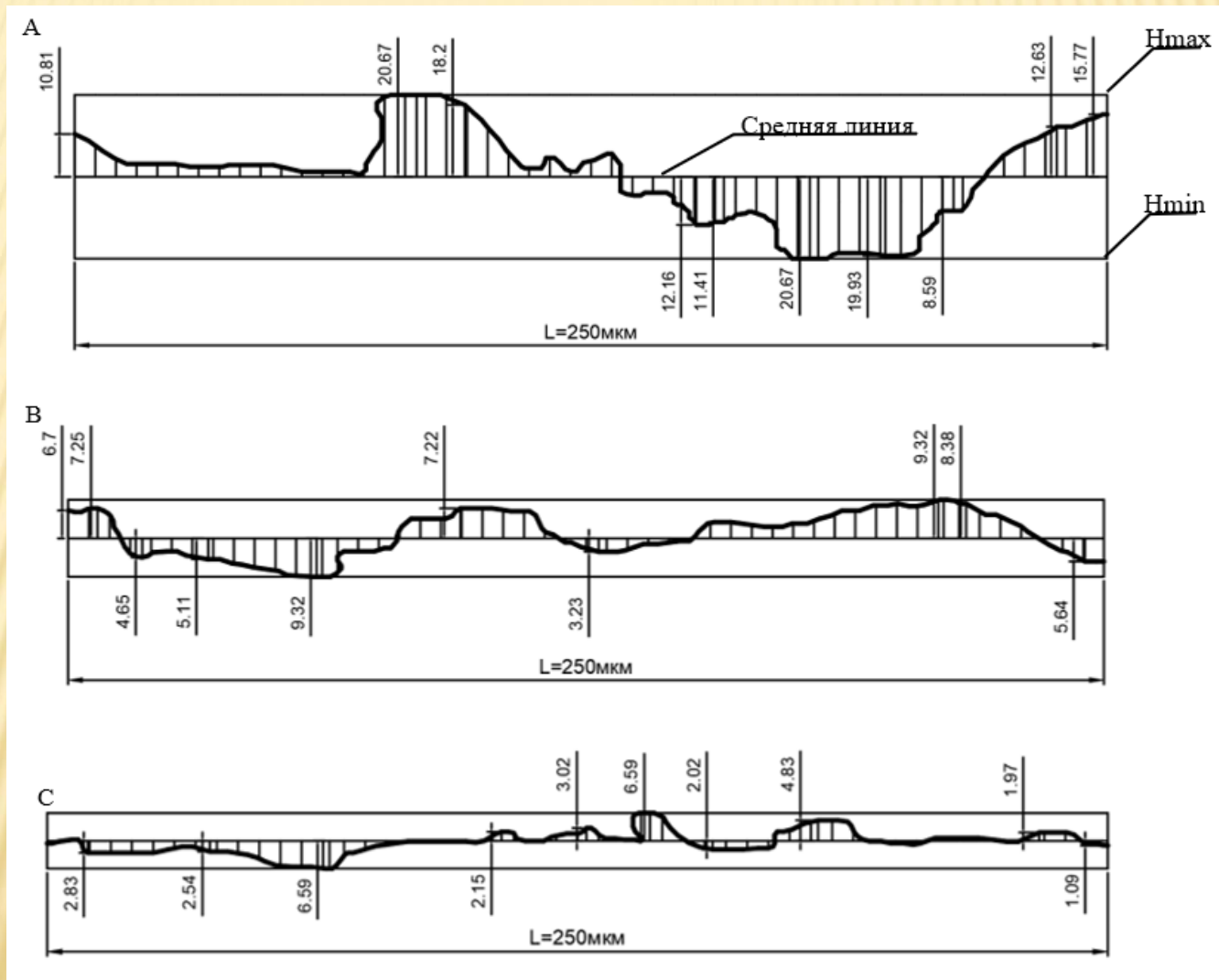
### Шероховатость слоёв картона тест-лайнера

Наименование слоя	Шероховатость, мкм					
	вариант А		вариант В		вариант С	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
Покровный	9	30	6	13	2	7
Нижний	3	10	5	15	5	11
Граница слоев	4	11	5	13	4	10

### Пористость картона тест-лайнера

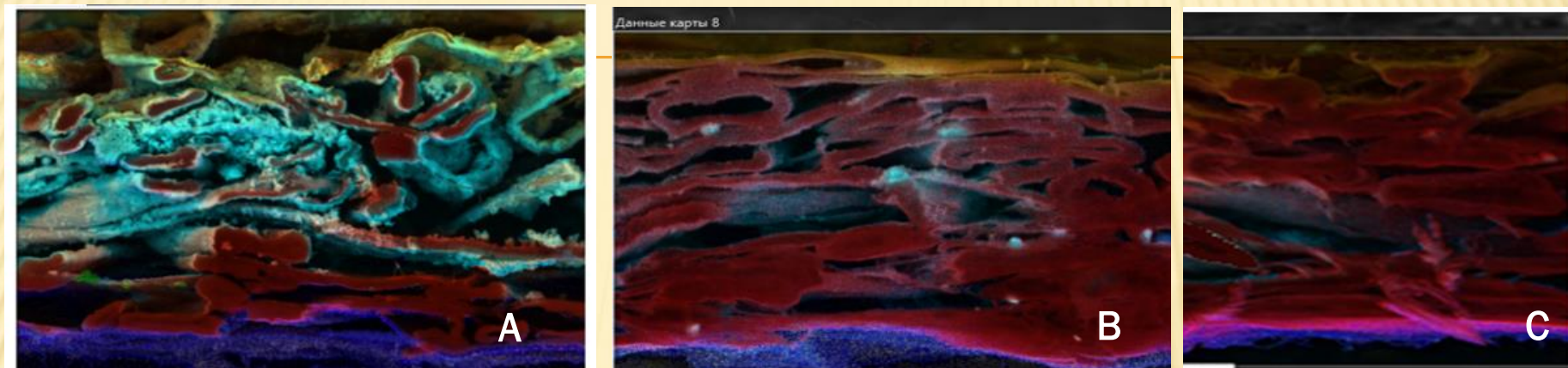
Наименование слоя	Площадь области поперечного среза, мкм <sup>2</sup>		
	вариант А	вариант В	вариант С
Покровный	15637	7326	3973
Нижний	3446	3379	3548
Двухслойный картон	19083	10705	7521

## Шероховатость слоёв картона тест-лайнера

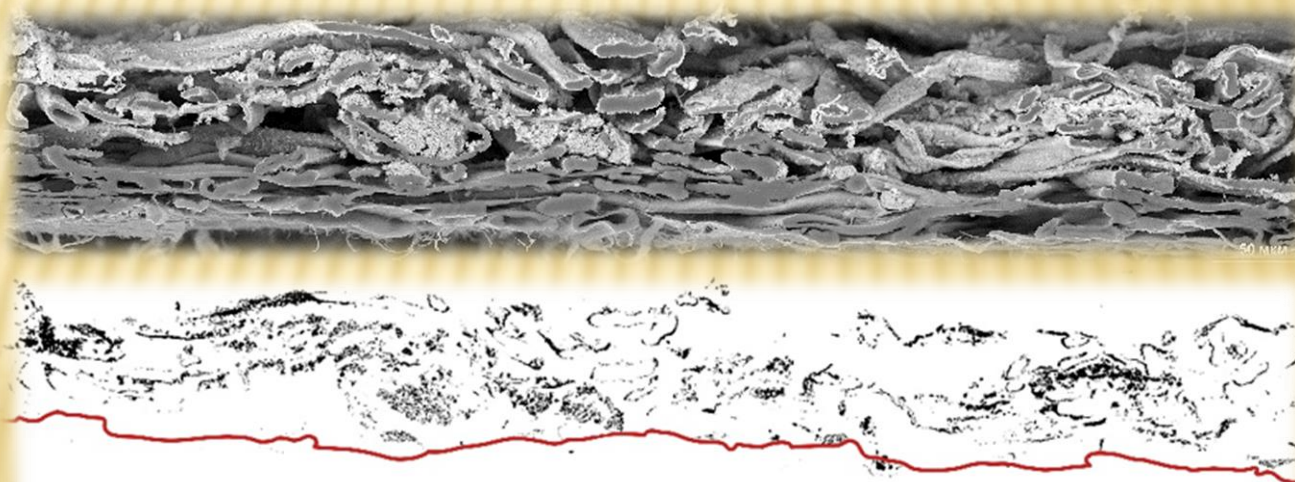


Профили покровного слоя тест-лайнера:  $L=250$  мкм; количество разбитых ячеек -  $n=50$ ; минимальное и максимальное отклонение от средней линии в 5 точках -  $H_{min}$ ,  $H_{max}$ ; А, В, С – аналогично подписи слайд 14 (ГОСТ 25142-82)

# Элементный состав поперечного среза многослойного картона 22

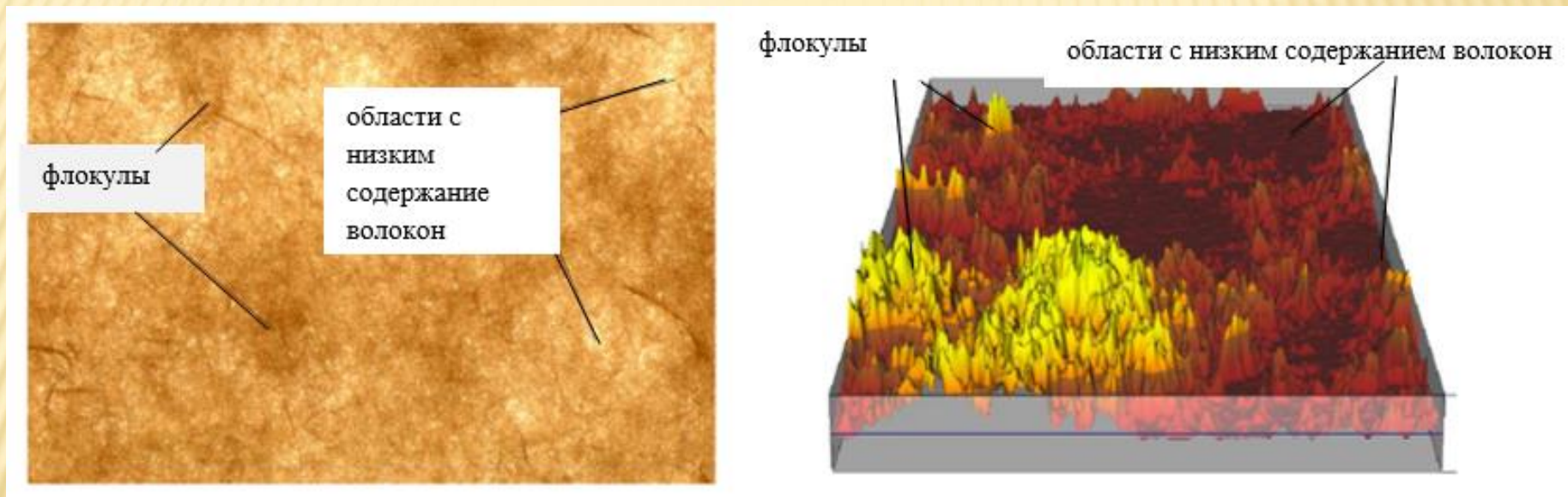


Графический метод оценки распределения мела в поперечном срезе двухслойного картона (вариант А)



# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

23

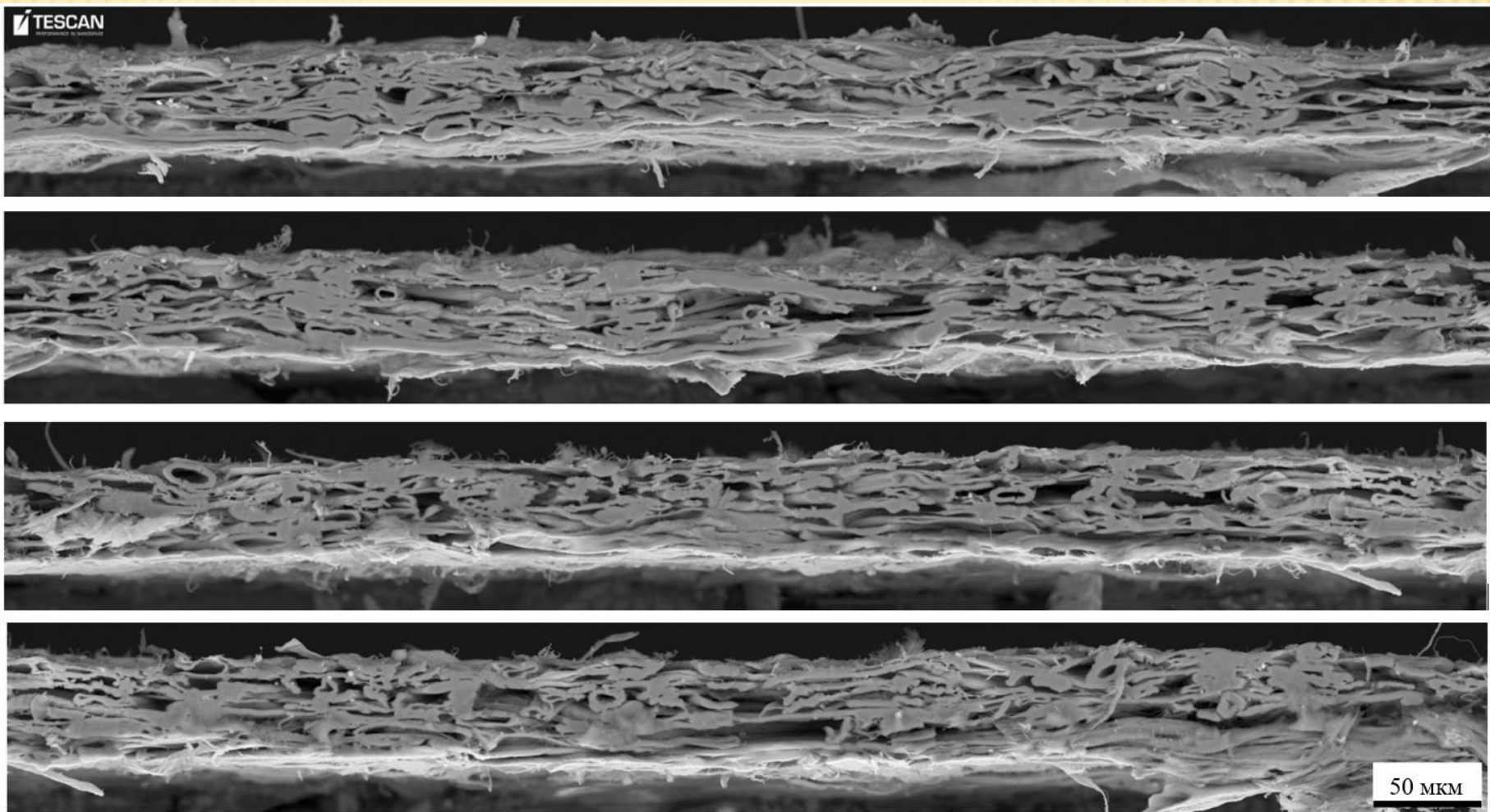


Неравномерность распределения массы в структуре волокнистого материала: а – плоская форма; б – объёмная форма (из диссертации *Абрамовой Виктории Викторовны*)

$$I_{\text{Кажани}} = N_c / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$$

$N_c$  – число точек (пикселей) образцов бумаги, имеющих тоновый уровень, равный среднеарифметическому значению тоновых уровней всех точек ( $I$ );  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значения тоновых уровней точек образца бумаги или картона

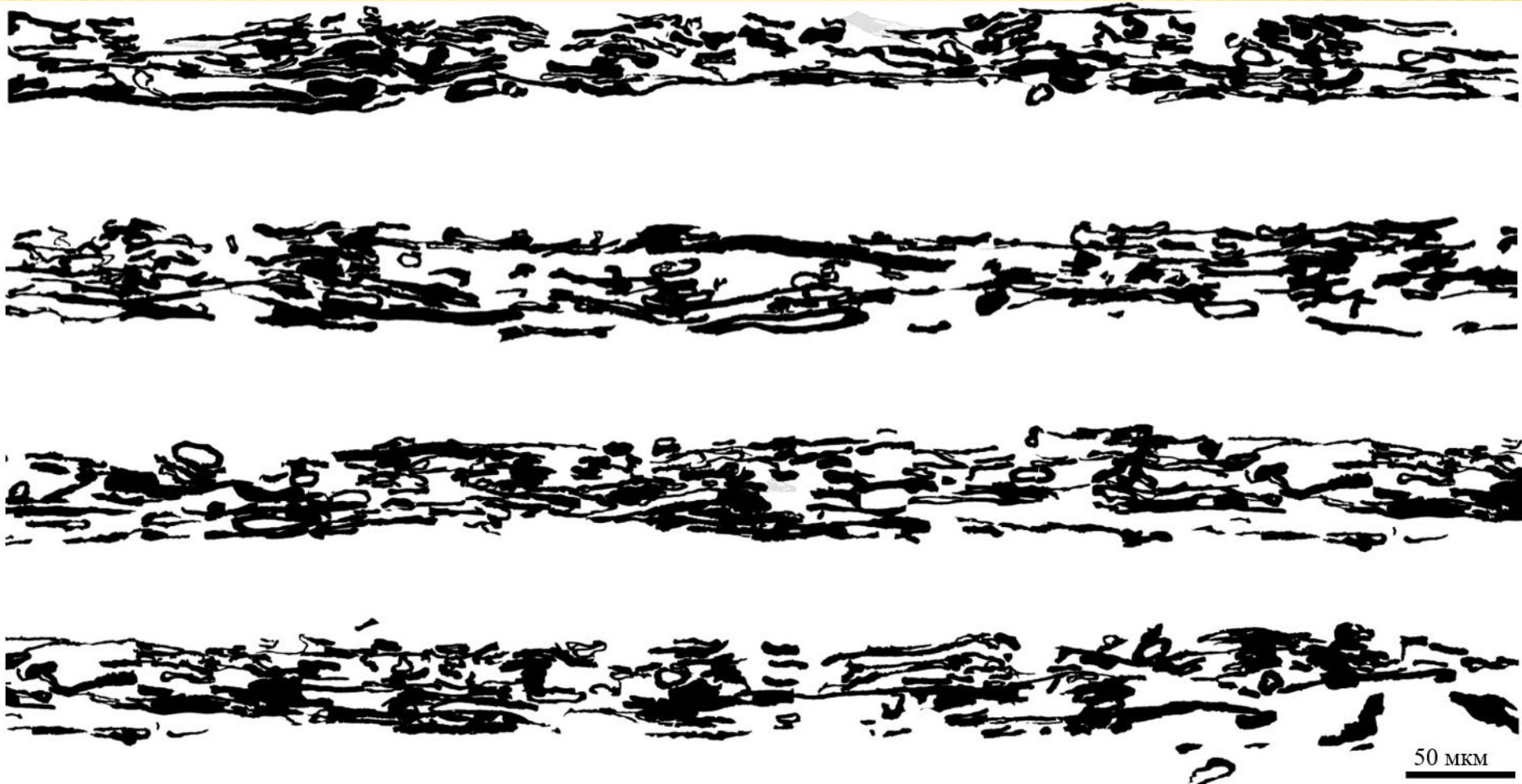
# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА



Поперечный срез двухслойного картона протяжённостью в 3,5 мм

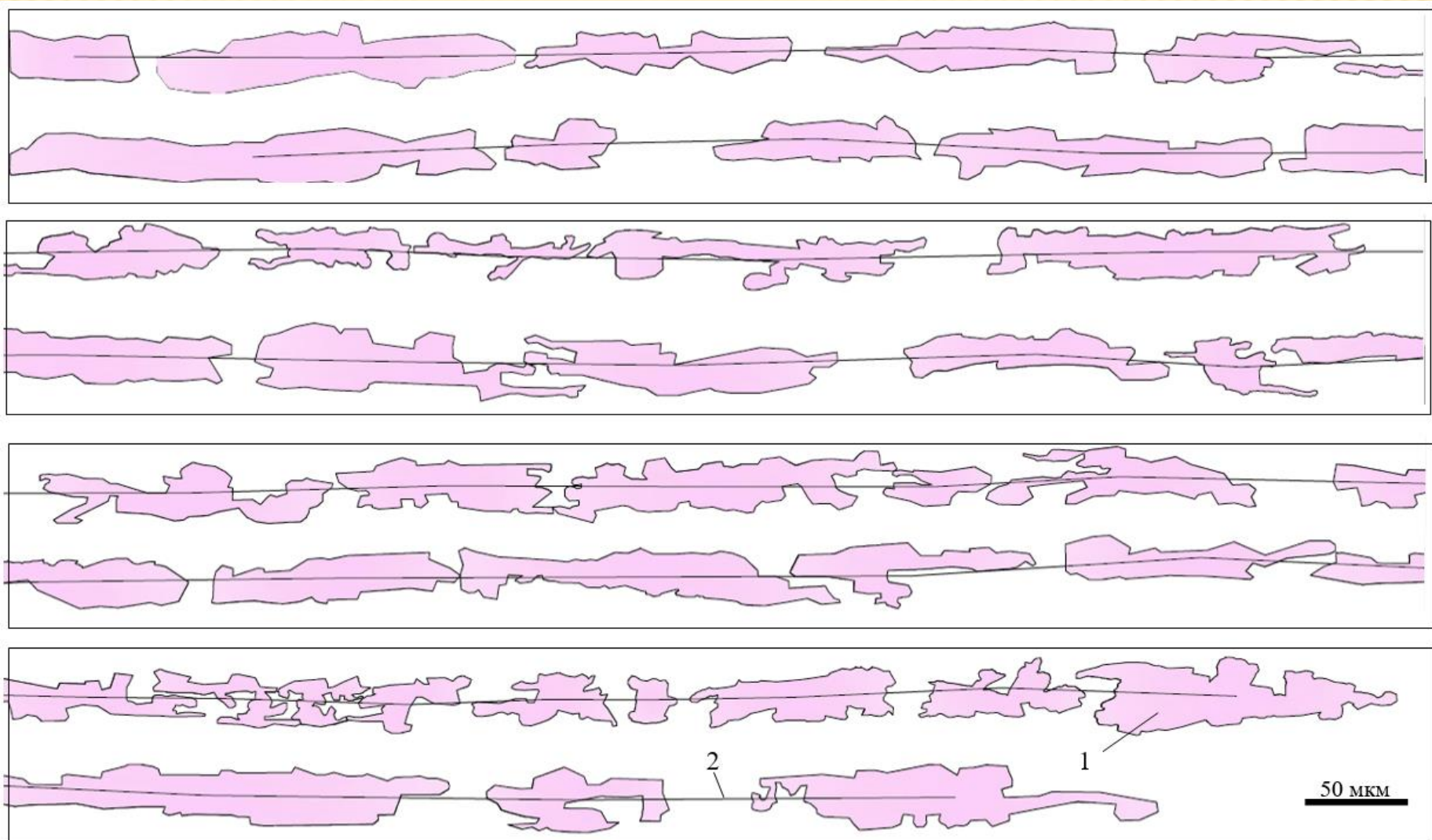


# ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА



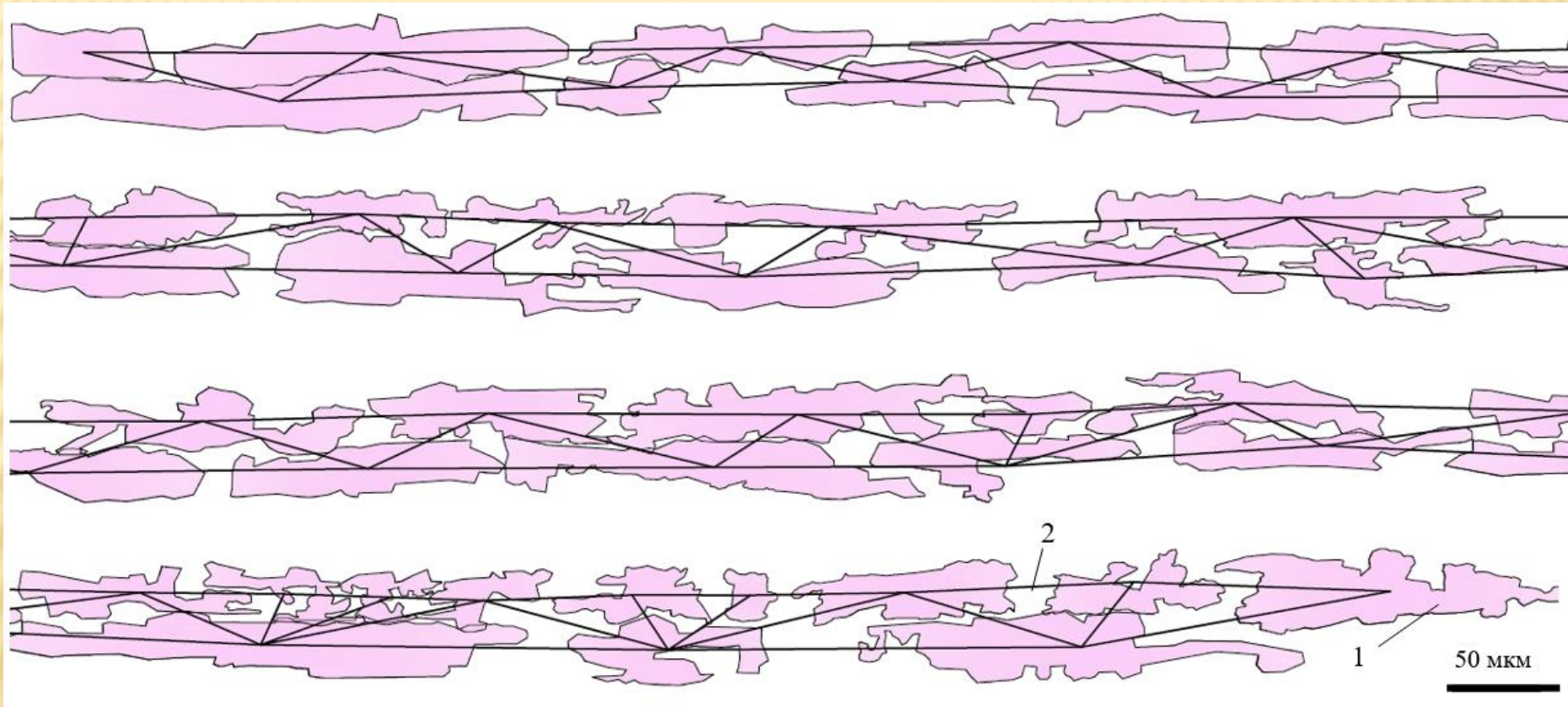
Выделенные области волокнистого материала в поперечном срезе двухслойного картона протяжённостью 3,5 мм

# ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА



# ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

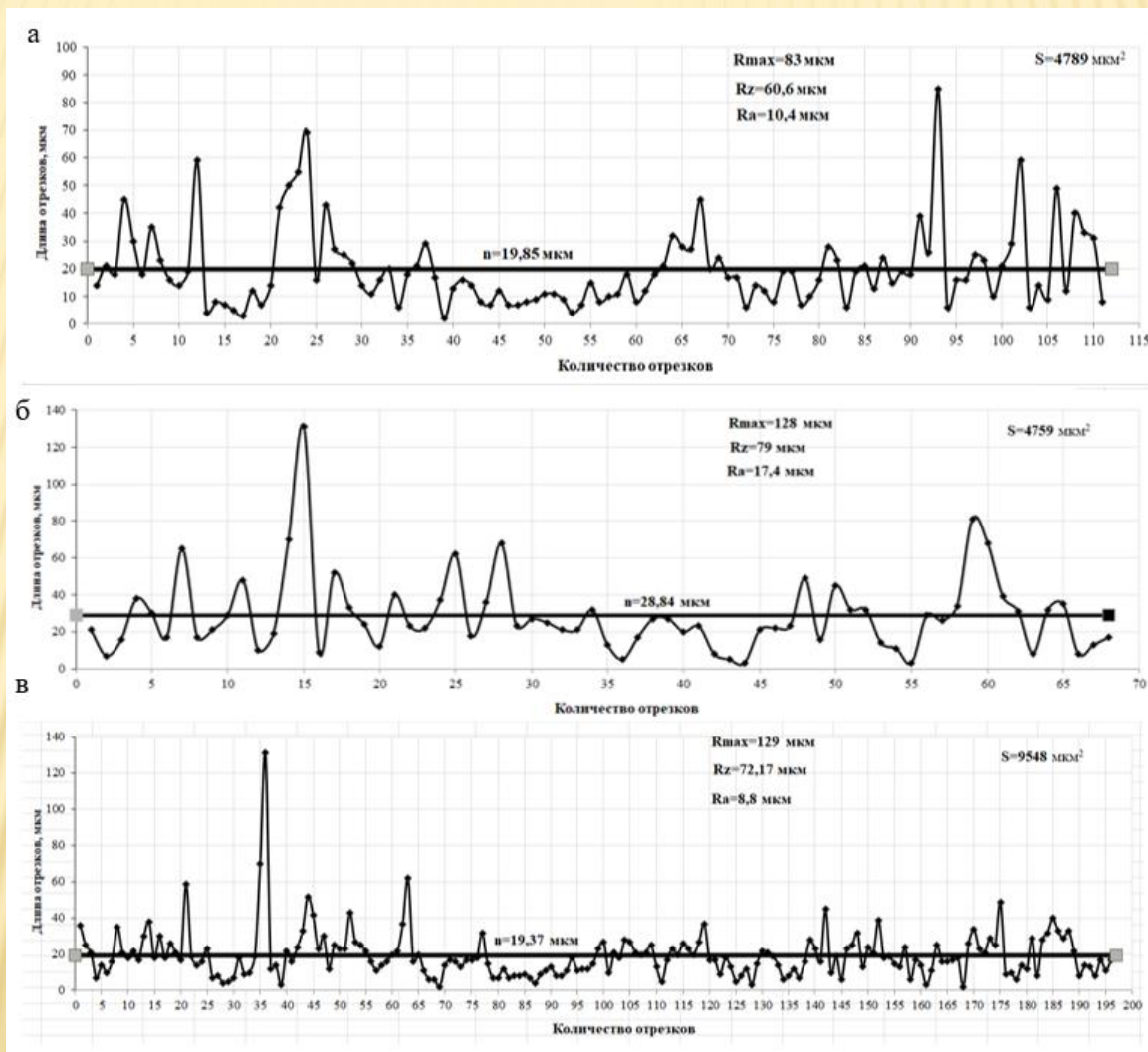
27



Равномерность распределения флокул в двухслойном картоне: 1- флокула; 2 – отрезок, соединяющий центр флокулы

# ОЦЕНКА РАВНОМЕРНОСТИ ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

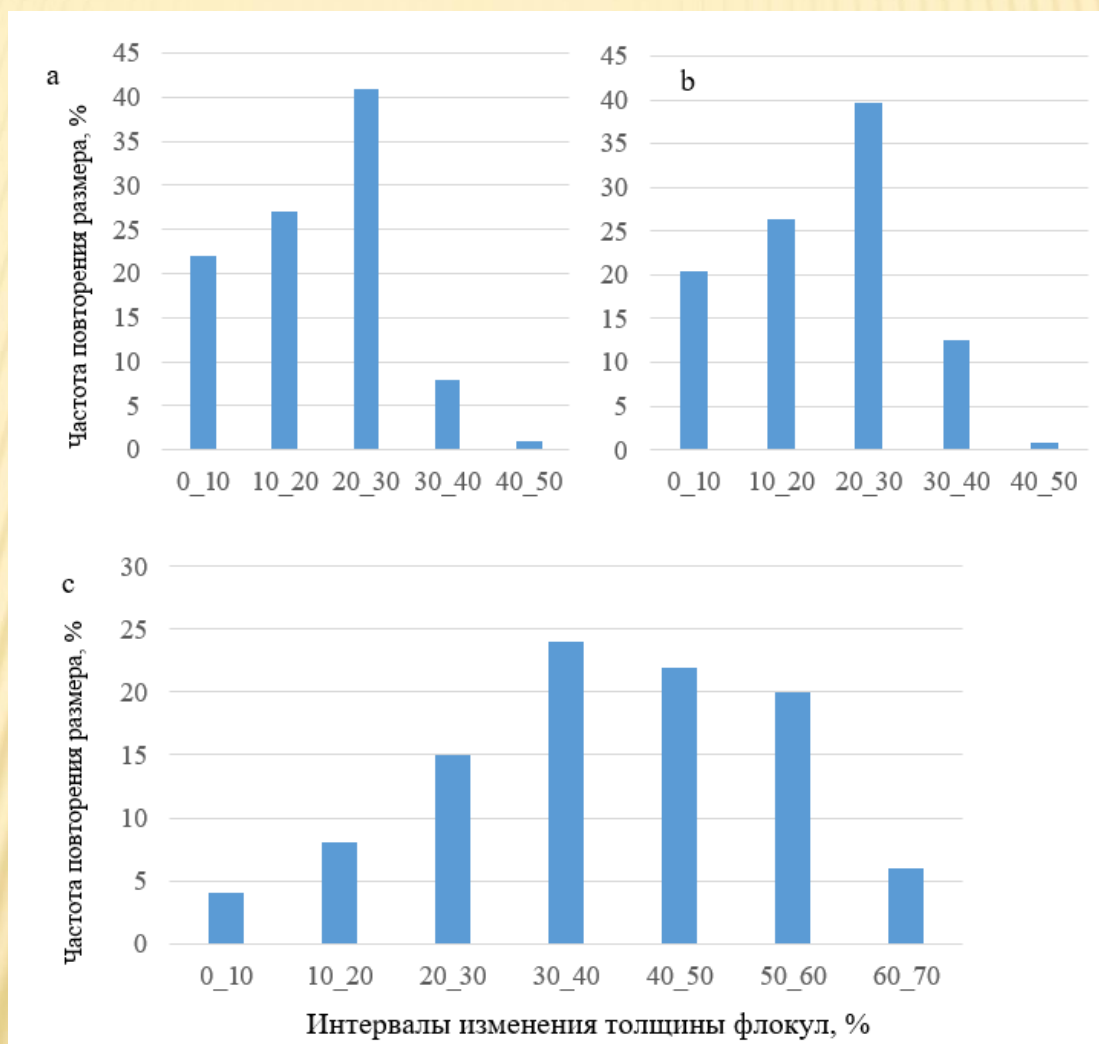
28



Равномерность распределения сгустков волокон: а – покровный слой; б – нижний слой; в – двухслойный картон;  $R_{max}$  – максимальное значение отрезка, соединяющего центры областей срезов;  $R_z$  – среднее значение пяти отрезков, соединяющих максимальные отклонения центров областей срезов;  $R_a$  – среднее отклонение отрезков, соединяющих центры областей срезов

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОРМОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО МИКРОСТРУКТУРЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА

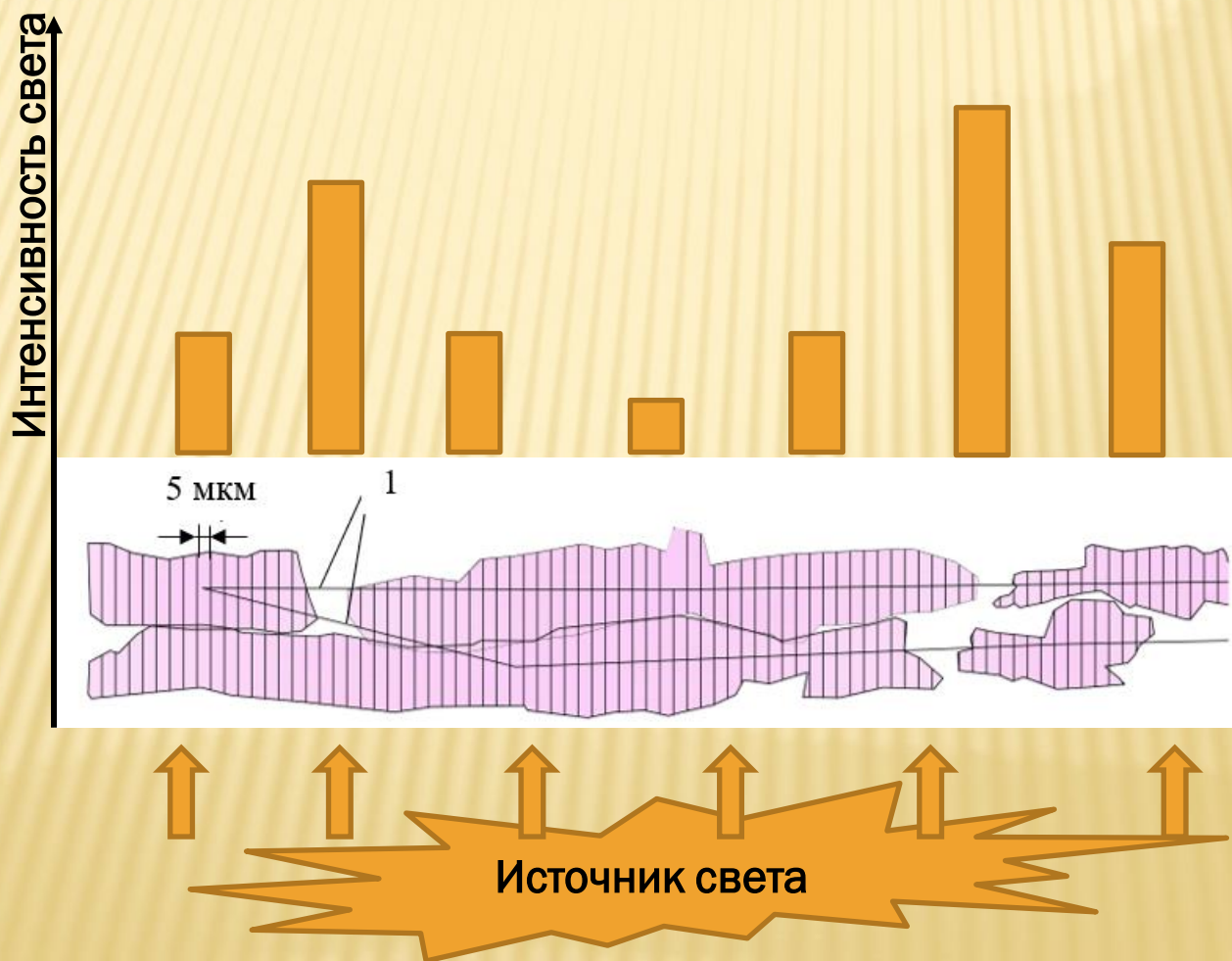
29



Распределение размеров флокул по вертикали в поперечном сечении многослойного картона: а – покровный слой; б – нижний слой; с – двухслойный картон

По аналогии с определением индекса формирования можно установить отношение между периодичностью повторения размера и разницей между максимальным и минимальным размером флокулы.

**Однако важным и принципиальным отличием является, то, что индексы на просвет обратно-пропорциональны тем показателям, которые получены по представленным диаграммам.**



---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**