

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БИОРЕФАЙНИНГА ЛИСТВЕННИЦЫ И ОСИНЫ КАК ВАЖНЫЕ ШАГИ НА ПУТИ К УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РОССИЙСКОГО ЛПК

**Э.Л. Аким<sup>1</sup>, О.В. Рыбников<sup>2</sup>, А.А. Пекарец<sup>3</sup>, О.В. Федорова, Л.Г. Махотина<sup>1</sup>,**

**П.В. Луканин<sup>1</sup>, С.З. Роговина<sup>4</sup>, А.А. Берлин<sup>4</sup>**

1. *Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД).*
2. *ОАО Светогорский ЦБК.*
3. *ООО «Лесная технологическая компания», поселок Качуг, Иркутская область.*
4. *Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН (Москва, 119991, Россия).*

*Архангельск, сентябрь 2023*

# Памяти Александра Ефимовича Шварца.

Коллектив РАО «Бумпром», ветераны целлюлозно-бумажной промышленности глубоко скорбят по поводу кончины Почетного работника лесной промышленности России Александра Ефимовича Шварца.

Александр Ефимович Шварц родился в 1946 году.

В 1970 году окончил исторический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. Историк. В этом же Университете получил второе образование журналиста. В 1970-80-е годы прошлого столетия работал на различных должностях в ряде газет и журналов. С 1980 года – главный редактор, а затем и издатель отраслевого журнала «Целлюлоза. Бумага. Картон».

Специалисты целлюлозно-бумажного рынка России и СНГ хорошо были знакомы с изданием. Журнал, под руководством Александра Ефимовича был максимально полезным для специалистов в отрасли и клиентов, обеспечивая их достоверной и своевременной информацией по всему кругу вопросов, связанных с бумажным бизнесом. Журнал постоянно расширял спектр своих изданий, становясь все более красочным и интересным.

Александр Ефимович был и автором многочисленных статей, аналитических материалов, исторических исследований по истории и проблемам развития ЦБП.



# Рукописи не горят... и не стареют...

Рецензия на книгу доктора химических наук,  
профессора Эдуарда Имериховича Чупки (1936–1994)

**«ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЛИГНИНА И УГЛЕВОДОВ ПРИ  
ЩЕЛОЧНЫХ ОБРАБОТКАХ ДРЕВЕСИНЫ»**

(Монография. Санкт-Петербург. Медиапапир. 2023. 497 стр.).

К моменту выхода этой рецензии пройдет 30 лет со времени смерти доктора химических наук, профессора Эдуарда Имериховича Чупки, но его книга, написанная свыше 30 лет назад, а опубликованная лишь в 2023 году, остается и сегодня полностью актуальной.

Прежде всего я считаю необходимым выразить огромную благодарность Александру Дмитриевичу Сергееву, Надежде Геннадьевне Сухопаровой, (Главному редактору Единой Газеты Группы Илим), ученикам, и соратникам Эдуарда Имериховича Чупки, и всем тем, кто взял на себя огромный труд по подготовке книги к изданию. Особые слова благодарности за само издание этой книги руководству Группы Илим - Захару Давидовичу Смушкину, Ксении Николаевне Сосниной\*, Александру Анатольевичу Позднякову, Сергею Николаевичу Кривошапкину.

# Релаксационные состояния полимерных компонентов древесины и их роль в жизни дерева, леса и лесного сектора

Э.Л. Аким<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А.А. Пекарец<sup>1</sup>, С.З. Роговина<sup>2</sup>, д-р хим. наук, А.А. Берлин<sup>2</sup>, академик РАН

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Санкт-Петербург, 191186, Россия);

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Москва, 119991, Россия) E-mail: s.rogovina@mail.ru

Э.Л. Аким, А.А. Пекарец, С.З. Роговина, А.А. Берлин

# Трансформация Лесной отрасли – ретроспектива и перспективы

<b>Ретроспектива – 1970 - 2022</b>	<b>Перспективы - 2022 – 2050 - 2070</b>
<b>Глобализация</b>	<b>Переход к циркулярной биоэкономике</b>
<b>Развитие биотоплива как следствие Киотского протокола и Парижского соглашения.</b>	Лесной сектор как фактор предотвращения и/или замедления глобального изменения климата Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC, 2018) определила семь стратегий улавливания углерода. <b>Куда деть углерод???</b>
1985 г. — Диоксины обнаружены в выбросах целлюлозно-бумажной промышленности (Швеция, США) <b>Бесхлорная отбелка целлюлозы – ECF, TCF</b>	<b>Создание глобальной системы космического мониторинга лесов, лесных пожаров, баланса углекислого газа, потоков лесной продукции</b>
Плانتации ускоренного роста (эвкалипт, сосна, черный тополь)	Мусорная проблема – сколько сегодня сжигается вторичной древесины – в мире и в России?
<b>Китай и Вторичное волокно</b>	Пластик и микропластик в океане. Полный переход на био-разлагаемую и циркулирующую тару и упаковку.
Новые виды продукции: Древесные композиты, волокнистые полуфабрикаты, бумага и картон (офисная бумага, санитарно-гигиенические виды – для медицины) и др.	<b>Многоэтажное деревянное строительство.</b>

# Изменения за 50 лет...

- Глобализация
- Смена лидеров
- Слияния и поглощения
- Переход в ЦБП мира к бесхлорной отбелке
- Скачок использования вторичного волокна – переход к циркулярной био-экономике
- Плантации ускоренного роста (эвкалипт, сосна, черный тополь)
- Отказ от не древесного растительного сырья
- Реструктуризация ассортимента
- Переход мира к биоразлагаемой упаковке
- Переход к биорефайнингу и расширение ассортимента лесохимии
- Появление биотоплива второго поколения – пеллет и брикетов
- Появление новых древесных композитов

# Бесхлорная отбелка

В 1955 году в Лесотехнической Академии

**Г.Л. Аким и В.М. НИКИТИН** открыли отбелку целлюлозы молекулярным кислородом.

После выявления в семидесятых годах прошлого века высокой токсичности и мутагенности образующихся при хлорной отбелке целлюлозы хлорорганических соединений (диоксинов и др.), отказ от использования при отбелке древесной целлюлозы хлора и гипохлорита стал важнейшей экологической проблемой ЦБП мира. Сегодня свыше 90% производимой в мире беленой целлюлозы производится с использованием кислородной ступени и во всем мире признается, что кислородная отбелка открыта Акимом и Никитиным...

# Проблемы бесхлорной отбели

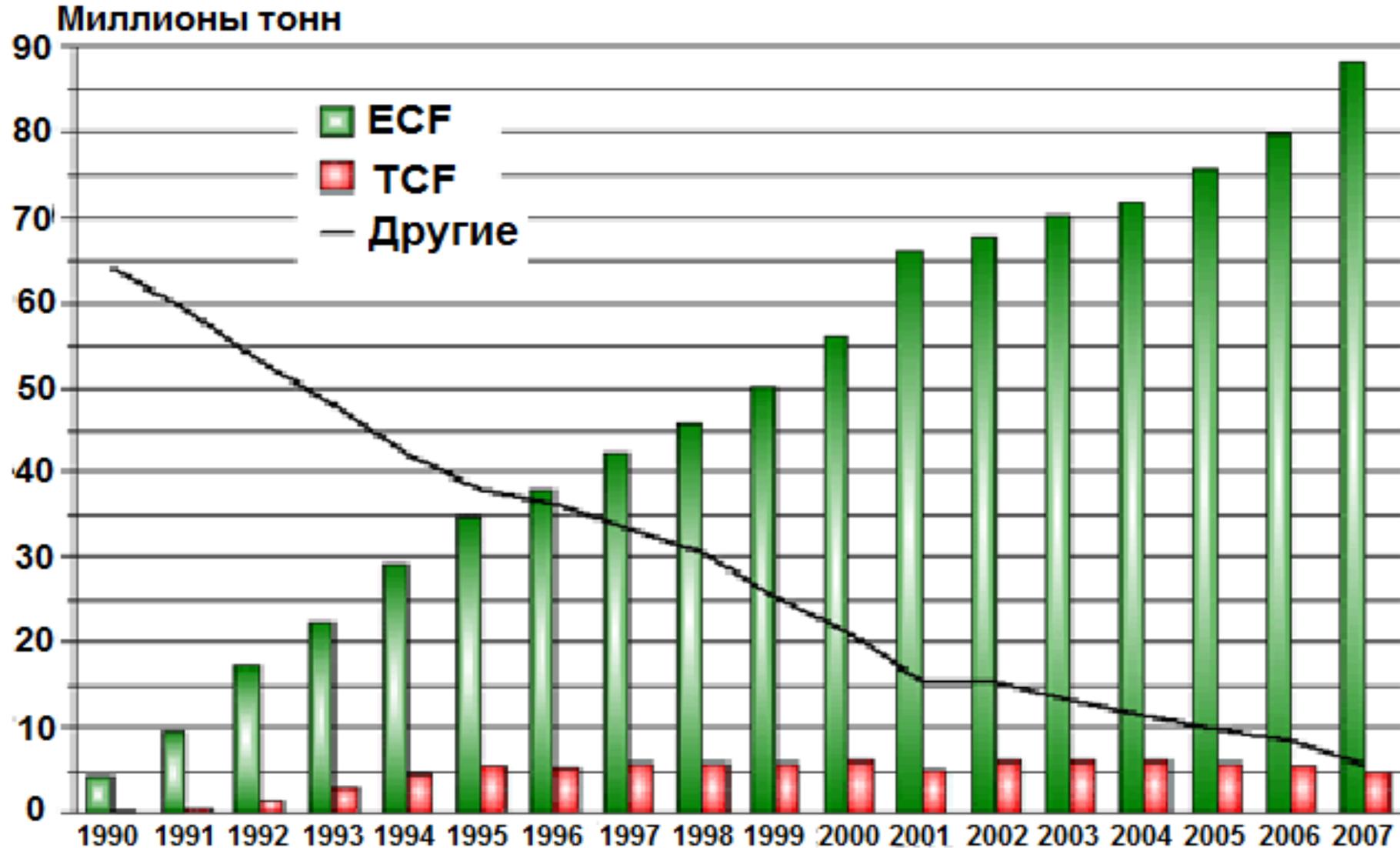
**Суть проблемы. Как известно, древесина состоит из трех основных компонентов – целлюлозы (45-55%), гемицеллюлоз (20-30%) и лигнина (20-30%).**

**Целлюлоза и гемицеллюлозы относятся к классу углеводов, лигнин – к классу ароматических соединений, для которых характерна легкость образования с молекулярным хлором высокотоксичных хлорорганических соединений - диоксинов.**

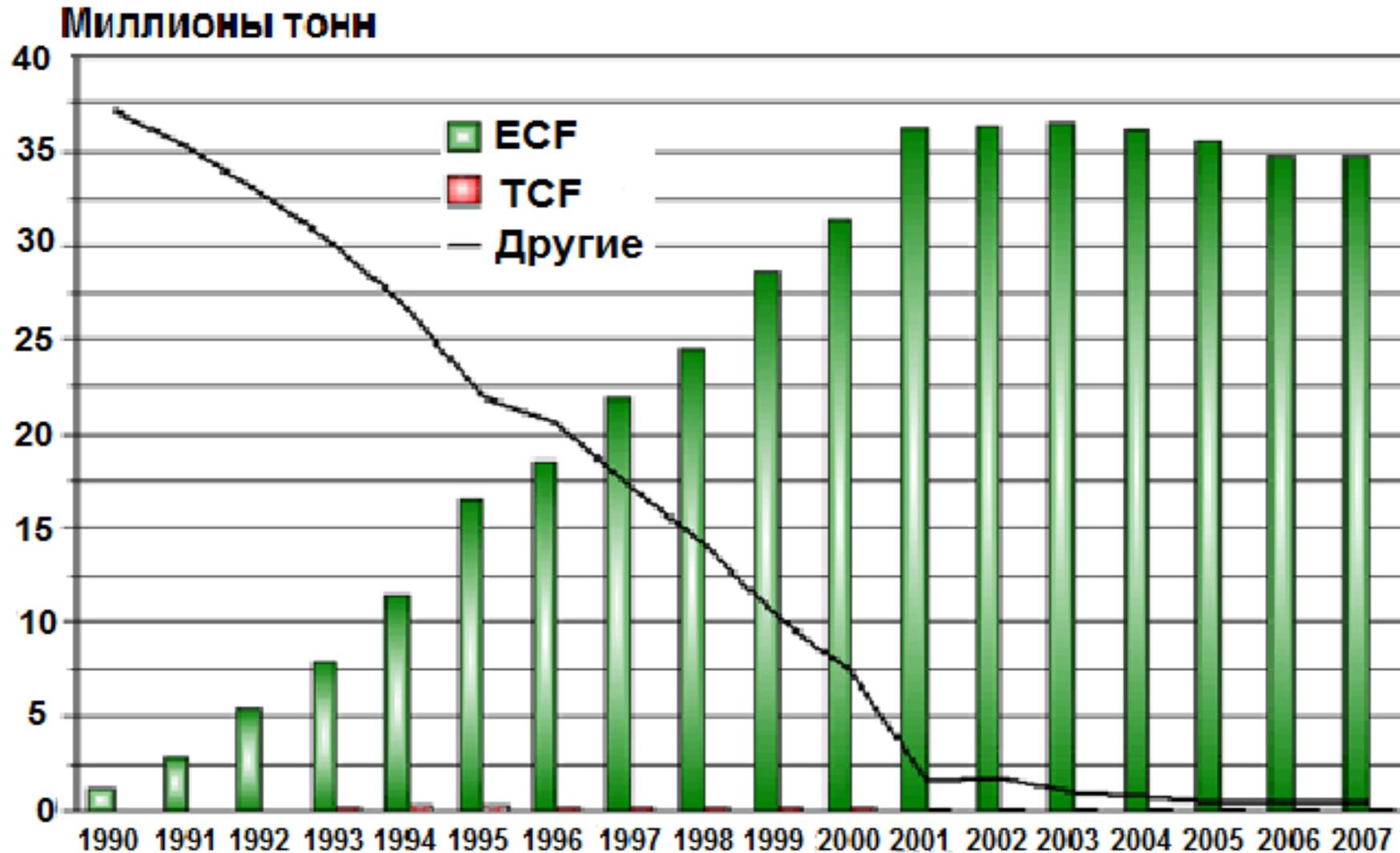
**Использование кислородной отбели позволяет исключить применение молекулярного хлора и гипохлорита, осуществить удаление остаточного лигнина из небеленой целлюлозы путем окисления кислородом под давлением в щелочной среде.**

**Именно это открыли в 1955 году Г.Л. Аким и В.М. Никитин.**

## Общемировой профиль производства белой целлюлозы



# Производство белой целлюлозы в Северной Америке в 1990-2007 годы



ДЛЯ ТЕХ, КТО ХОЧЕТ РАЗВИВАТЬСЯ И ЛИДИРОВАТЬ



Промышленный реактор кислородно-целлюлозной отбелки восточной сульфатной целлюлозы в Коряжме



Александр Кокшаров и инженер Елена Звездина у лабораторного реактора кислородно-целлюлозной отбелки целлюлозы в отделе научно-исследовательской работы

## **Забудьте про элементарный хлор - дышите глубже кислородом**

О том, как в Коряжме избавились от элементарного хлора, рассказывает руководитель отдела по научной работе службы главного технолога Александр Кокшаров

но дальше этого дело не пошло. То ли не убедились в успехе, то ли денег не нашлось. Кстати, я тогда уже работал в лаборатории и после знакомства с Гарри Львовичем проходил аспирантуру именно у него.

К началу двухтысячных, когда комбинат вошел в компанию «Илим Палп», сотрудники научной лаборатории комбината попытались убедить руководство в том, что нужно переходить к более экологичным методам отбеливания целлюлозы. Для этого лабораторией были проведены испытания, составлены отчеты, которые оказались достаточным аргументом для внедрения КЦО.

Кислородная станция, закупленная ранее, была в полной сохранности. Кислородный реактор, вопреки общей практике, решили не закупать за границей, а заказали отечественным производителям – предприятию «Севмаш» в Северодвинске. И вот 30 сентября 2000 года на комбинате в Коряжме успешно запустили линию по отбеливанию сульфатной целлюлозы без применения элементарного хлора.

Запуск прошел довольно удачно. Уже через несколько недель качество отбеливания целлюлозы было сравнимо с прежней, хлорной. Тут надо отдать должное бывшему тогда начальнику производства сульфатной беленой целлюлозы **Павлу Дмитриевичу Ядрихинскому**, который относился к проекту с большим энтузиазмом и приложил для запуска новой линии немало сил.

И до настоящего времени оборудование этого потока работает стабильно. А сам процесс постоянно совершенствуется. Мы постоянно взаимодействуем с производителями. Подбираем более оптимальную температуру, корректируем состав реагентов. А вот на предприятиях, где комплексы кислородно-щелочной отбеливания закупаются у зарубежных

## Мы очень серьезно разочаровали пессимистов

Юрий Николаевич Заяц, бывший на ту пору генеральным директором ОАО «Котласский ЦБК», добавил по нашей просьбе деталей к рассказу Александра Кокшарова



мощь и специалисты лесотехнической академии.

А вот подбором оборудования для нового проекта занималась великолепная тройка – **Игорь Ярмолинский, Сергей Трубин, Павел Ядрихинский**. Дело оказалось не из легких. Средств отпущено не так много, а технологическое оборудование было довольно сложным, причем часть его нужно было закупать за границей и как-то привязывать импортную составляющую к отечественной.

Кислородная станция, закупленная еще в 80-е годы, оказалась в плачевном состоянии. Хотели обратиться за помощью к изготовителю, но это производство уже закрылось. Все же нашли специалистов, которые практически собрали её заново.

Мы взялись за дело с оптимизмом, но не все его разделяли. Ведь попытки освоить технологию кислородной отбеливания в нашей стране уже были – на Амурском комбинате и в Усть-Илимске. Но ничего не получилось. Такая технология работала в Светогор-

Компания «Илим Палп» при... директором КЦБК, на совете дирек...

# Биорефайнинг и «Принцип каскадирования»

«Принцип каскадирования» описывается в документах ФАО ООН как: «последовательное использование ресурсов, например, древесины, путем их повторного использования, переработки и, возможно, конечного производства энергии, для сохранения своего материального статуса и твердого углерода, насколько это практически возможно, совместимого с рыночными механизмами и логистикой». Из этого принципа вытекает, что именно использование древесины в виде биотоплива является наиболее эффективной заключительной стадией жизненного цикла древесины. Рыночные стимулы считаются решающими, и также важна «циркулярная, круговая» роль изделий из древесины с более коротким сроком службы, которые могут быть повторно использованы или переработаны.

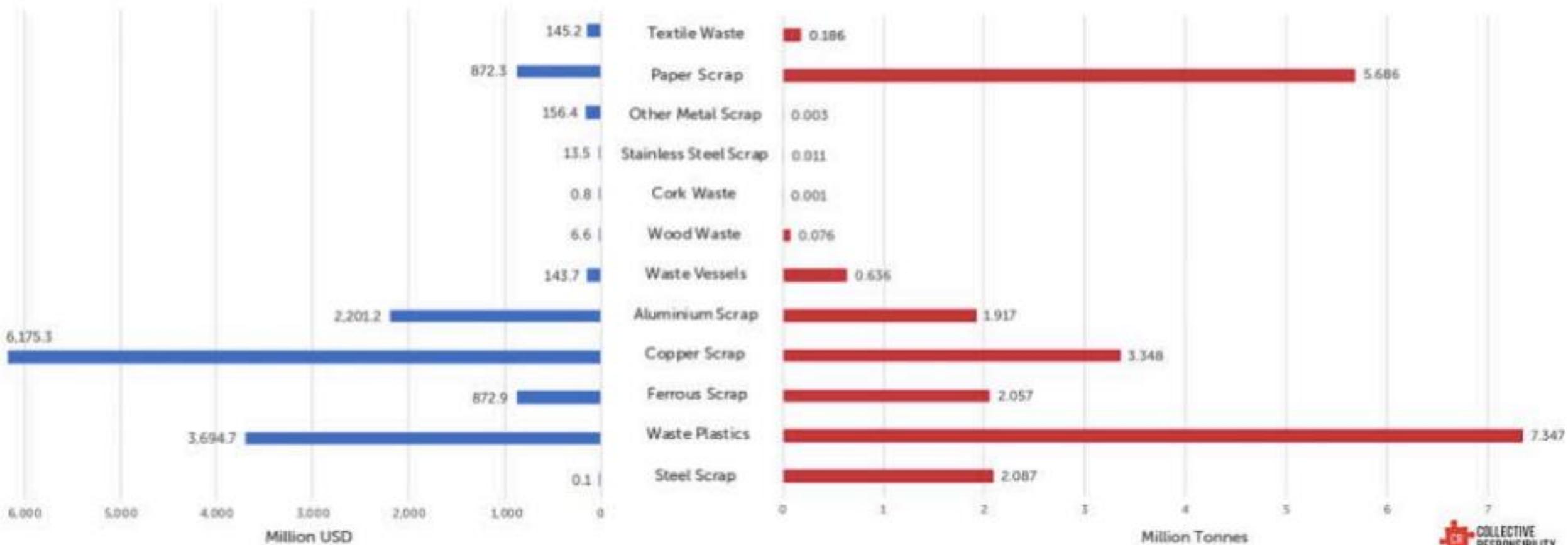


# A Global Perspective on the Circular Bioeconomy

Peggy Liu, Chairperson, JUCCCE | @shanghaipeggy | peggyliu@jucce.org



## China's Total Waste Imports in 2016



Source: UN Comtrade

## Loess Plateau - reforestation and permaculture in the size of France



# Биорефайнинг древесины и циркулярная экономика

Теория циркулярной экономики непрерывно развивается и поэтому целесообразно транслировать это развитие на биорефайнинг древесины и другого растительного мира, при обязательном сохранении био-разнообразия.

# «3R» -подход и «9R»-подходы

Несмотря на большое разнообразие элементов того, что многие считают циркулярностью, в большинстве определений циркулярной экономики основное внимание уделяется использованию материалов и преобразованию системы:

а) определения, в которых акцент делается на использование материалов, обычно строятся на трех основополагающих принципах, каковыми являются: **сокращение (reducing)** (использование минимального объема сырья), **повторное использование (reusing)** (максимальное повторное использование продукции) и **рециркуляция (recycling)** (высококачественное повторное использование рекуперированного сырья). Эти принципы также называют тремя «R» устойчивости или **«3R»-подходом**; Перепрофилирование (Repurpose), Рециркуляция (Recycle) и Рекуперация энергии (Recover).

б) определения, в которых акцент делается на преобразование системы, предполагают замыкание производственных циклов при одновременном использовании возобновляемых источников энергии и применении системного мышления - **«9R»-подход**.

- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of **114 definitions**. Resources, Conservation and Recycling 127, 221-232.
- <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>.

# Циркулярная экономика – принцип 3R

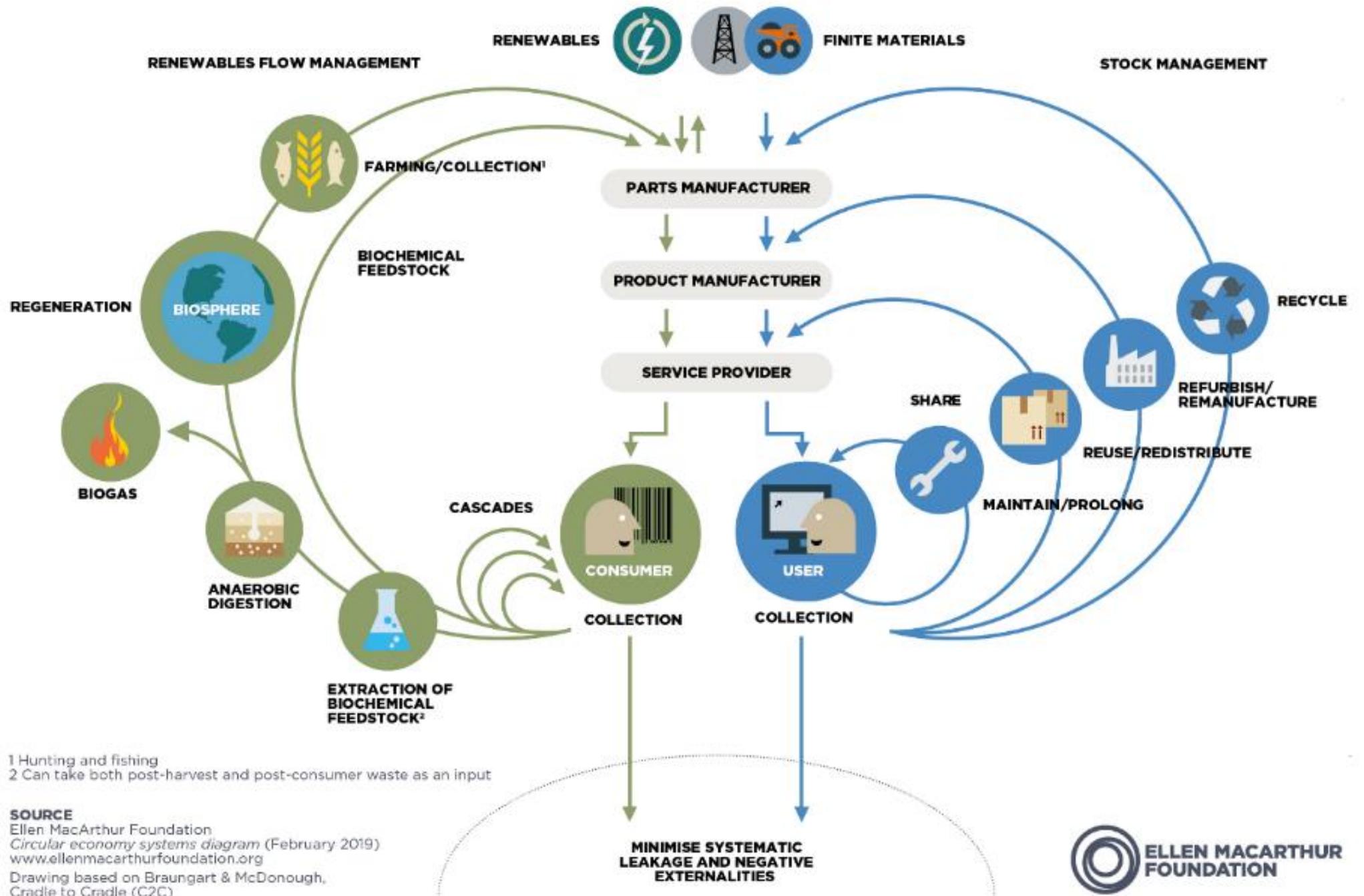
Три основополагающими принципами, тремя «R» устойчивости, которые больше относятся к экономике повторного использования являются:

**сокращение – reducing** - использование минимального объема сырья;

**повторное использование – reusing** - максимальное повторное использование (продукции);

**рециркуляция – recycling** - высококачественное повторное использование (рекуперированного сырья).

Однако в системе замкнутого цикла необходимо обеспечивать не только надлежащую рециркуляцию материалов, но и высокое качество получаемой продукции и сырья. Количество и последовательность элементов в «R»-подходе, соответственно, изменились и появился **принцип 9R**.



1 Hunting and fishing  
 2 Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input

**SOURCE**  
 Ellen MacArthur Foundation  
*Circular economy systems diagram* (February 2019)  
[www.ellenmacarthurfoundation.org](http://www.ellenmacarthurfoundation.org)  
 Drawing based on Braungart & McDonough,  
 Cradle to Cradle (C2C)

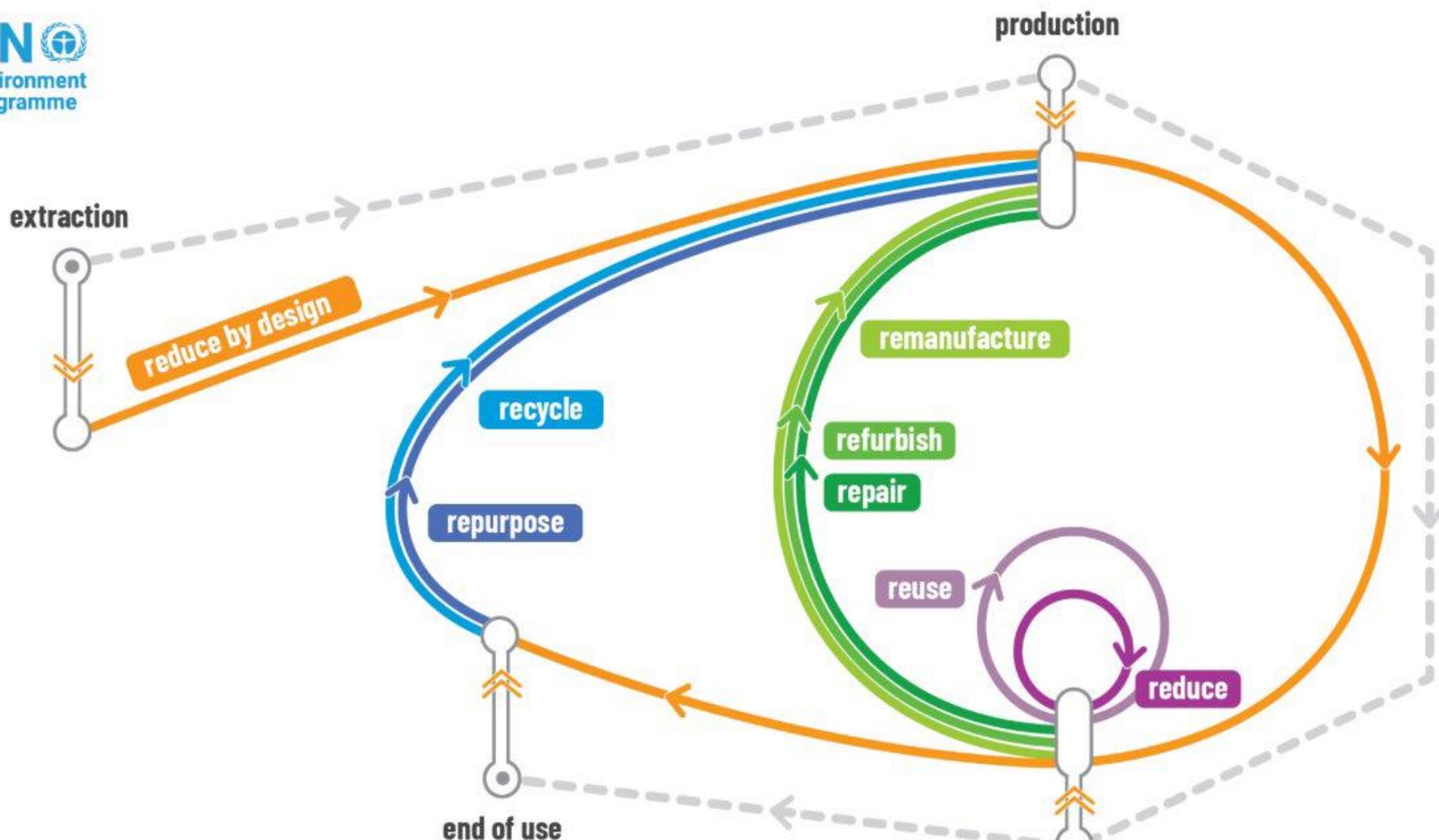
# Циркулярная экономика - 9«R»-подход

9«R»-подход в рамках которых акцент делается и на использование материалов, и на преобразование системы.

1. Отказ
2. Переосмысление
3. Сокращение
4. Повторное использование
5. Ремонт
6. Восстановление
7. Использование для производства аналогичной продукции
8. Перепрофилирование
9. Рециркуляция и Рекуперация энергии

Девятью «R» являются:

1. Refuse
2. Rethink
3. Reduce
4. Re-use,
5. Repair
6. Refurbish
7. Remanufacture
8. Repurpose
9. Recycle Recover



**Circular economy processes**

**yellow** Guiding principle

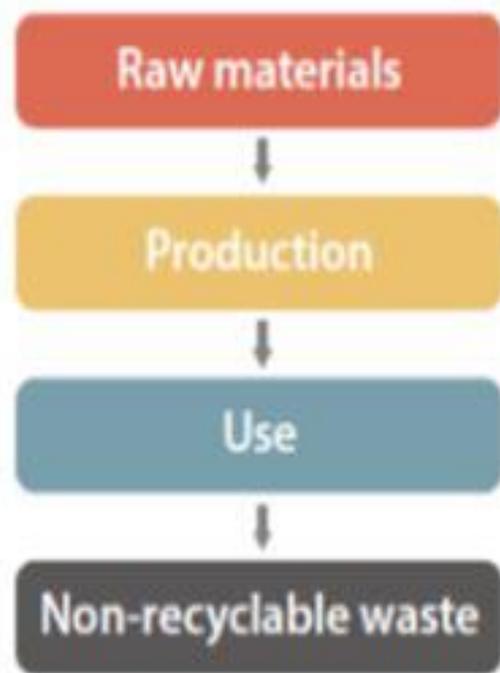
**blue** Business to business

**green** User to business

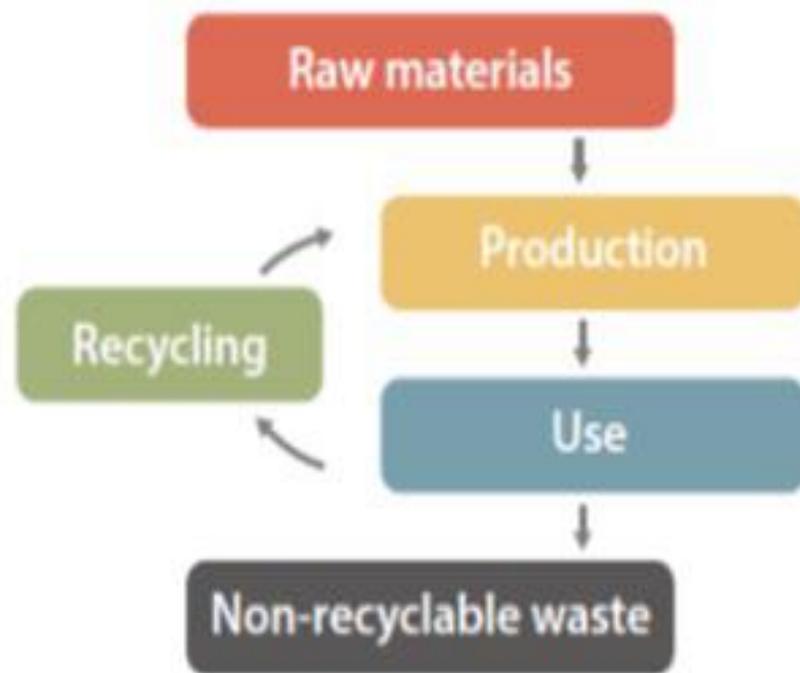
**purple** User to user

**grey** Linear economy model

## LINEAR ECONOMY



## REUSE ECONOMY



## CIRCULAR ECONOMY



## Влияние воды на температуру стеклования целлюлозы (Аким, Докторская диссертация, 1971 г.)

Для сухой целлюлозы температура стеклования лежит выше температуры ее разложения и составляет 220 °С.

**Вода пластифицирует целлюлозу и снижает ее температуру стеклования ниже 0 °С.**

Аналогично снижается и температура стеклования гемицеллюлоз и лигнина.

**Биосинтез целлюлозы в природе осуществляется в среде воды, т.е. когда целлюлоза находится в высокоэластическом состоянии. Поэтому для целлюлозы высокоэластическое состояние является первичным, высушенное стеклообразное состояние – вторичным.**

Для целлюлозы и материалов на ее основе переход из мокрого состояния в сухое имеет особое значение. Мокрая целлюлоза находится в высокоэластическом состоянии, а сухая застеклована.

Выделение целлюлозы из растительных тканей, ее переработка в бумагу и эфиры целлюлозы осуществляется также в среде воды. Биосинтез целлюлозы в природе происходит при обязательном участии воды, т.е. целлюлоза рождается в воде.

Выделение технической целлюлозы из древесины и другого растительного сырья осуществляется в водных средах.

# Из доклада на Конференции, посвященной 100-летию Американского Химического общества, США, 1977

E. Akim. Cellulose Chemistry and Technology, ACS, Symposium Series, Washington, 48, 1977, 153-172

E. Akim. «Cellulose-Bellwether or old hat». «Chemtech», November, 1978, 676-682

**«Высокоэластическое состояние – это то состояние, благодаря которому существует жизнь на Земле...»**

**Высокоэластическое состояние – это то состояние, в котором целлюлоза синтезируется в процессах биосинтеза, выделяется из растительных тканей и перерабатывается в бумагу и картон».**

**А сегодня можно добавить «...и то состояние, в котором целлюлоза участвует в «циркулярной» экономике...»**

## **Комплекс «арабиногалактан-вода» как эвтектический растворитель и эвтектический пластификатор в природной лиственнице**

**Показано, что усталостная прочность древесины лиственницы обеспечивается в живом дереве природным глубоким эвтектическим растворителем и эвтектическим пластификатором – жидкой системой «арабиногалактан-вода», заполняющей капиллярно-пористую структуру древесины.**

***ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ХИМИЯ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, 2020, том 491, с. 73–76***

- УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ И РЕЛАКСАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ ЕЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ**
- © 2020 г. Э. Л. Аким, С. З. Роговина, академик РАН А. А. Берлин**

# Биорефайнинг лиственницы и осины

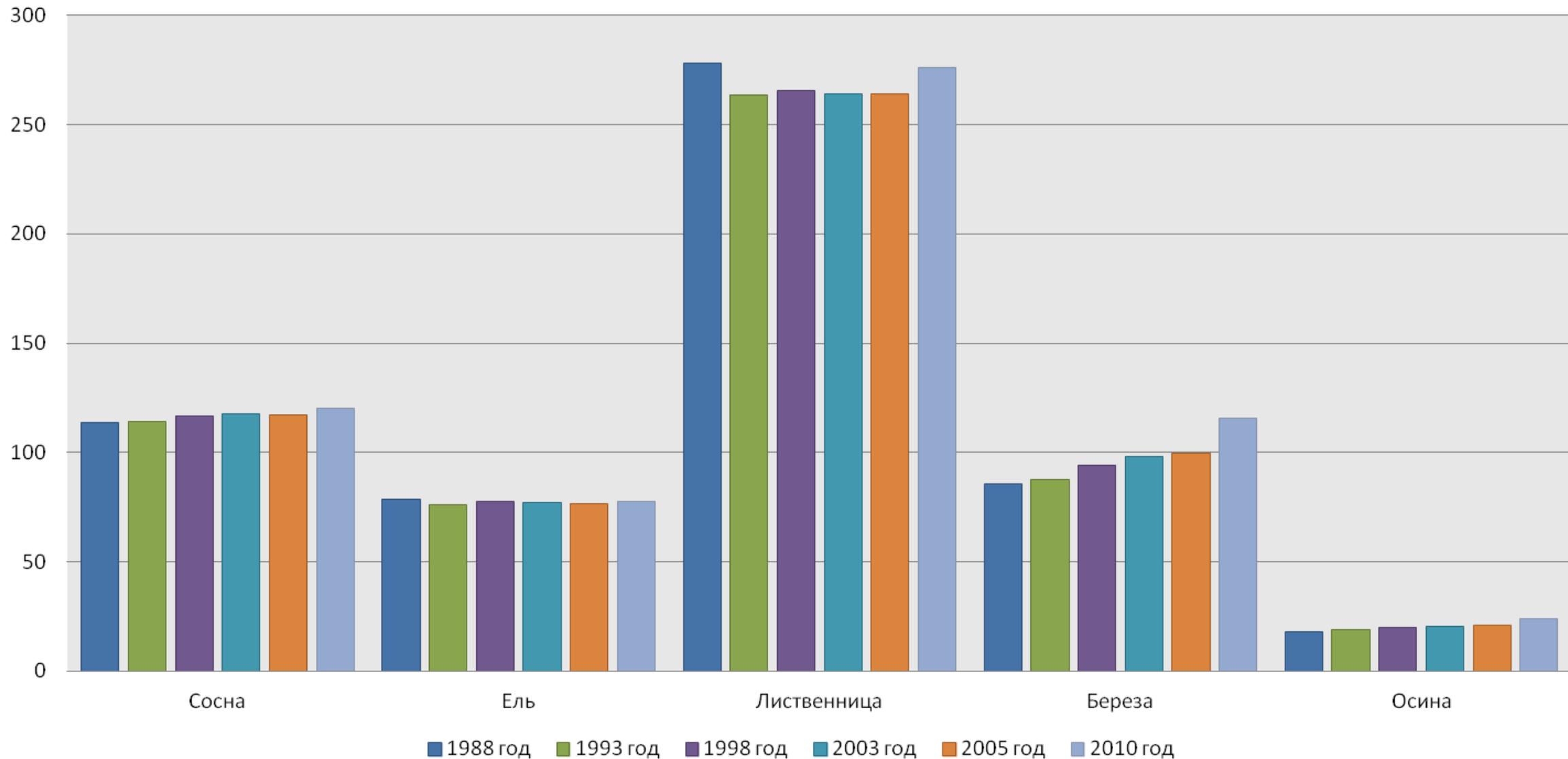
За последние годы Кафедра технологии целлюлозы и композиционных материалов Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД выполнила и реализовала ряд проектов по биорефайнingu лиственницы и осины, являющихся важными шагами на пути к углеродной нейтральности российского ЛПК.

Это - прежде всего, инновационные технологии:

- **биорефайнинга лиственницы**, легшие в основу Проекта «Лиственница» (по Постановлению Правительства РФ №218);
- **биорефайнинга осины**, легшие в основу ряда технологий на Светогорском ЦБК, включая создание принципиально-нового вида офисной бумаги –  
Бумаги «Эко» и «Эко2»;
- **твердого биотоплива третьего поколения;**
- **по созданию новых видов биоразлагаемой упаковки** в рамках Программы «Приоритет 2030».

Остановимся на фундаментальных основах новых технологий, а также подведем некоторые промышленные итоги этих работ.

## Площади основных лесообразующих пород в России (млн. га) данные 2010 года



# «От идеи к реализации. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218».

В 2021 году ООО «Инконалт К» выпустило книгу «От идеи к реализации. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218». (ООО «Инконалт К» - это российская консалтинговая компания, которая осуществляла сопровождение разработок в сфере научных исследований, инноваций и новых технологий по Постановлению № 218. Эту книгу можно рассматривать как официальные итоги работ, выполненных Университетами по данному Постановлению).

Среди 362 проектов, выполненных в рамках 1-12 очередей по Постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218, именно проект **«Разработка инновационной технологии комплексной переработки древесины лиственницы (с выводом на мировые рынки нового вида товарной целлюлозы)»** (Проект «Лиственница») первым подробно описан на стр. 26-31 данной книги.

Проект «Разработка инновационной технологии комплексной переработки древесины лиственницы (с выводом на мировые рынки нового вида товарной целлюлозы)»,

Предприятие - АО «Группа «Илим»; Исполнитель НИОТКР - Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД; Начало реализации проекта – 2010; Субсидия (млн руб.) - 144,2; Собственные средства (млн руб.) - 178,5 на момент начала коммерциализации (2014 г.).

ИДЕИ

РЕАЛИЗАЦИИ

# Впервые установлено, что арабиногалактан содержится в лиственнице не в чистом виде, а в виде его комплекса с водой.

Группа «Илим» занималась вопросом освоения лиственницы в промышленных целях на протяжении 25 лет; специфические особенности лиственничной древесины ограничивали ее использование при варке до 10-15%. Совместный проект Группы «Илим» и ВШТЭ СПбГУГД, реализованный в рамках исполнения постановления Правительства РФ №218 в период 2010-2014 гг., позволил создать промышленную технологию получения качественной целлюлозы из лиственницы и ее смесей с другими породами. Использование лиственницы для этих целей прежде было неэффективным; она имеет высокую плотность и содержит значительное количество гемицеллюлозы - арабиногалактана, которое затрудняет технологический процесс.

В ходе проекта впервые в мире было установлено, что арабиногалактан содержится в лиственнице не в чистом виде, а в виде его комплекса с водой. **Было установлено также, что комплекс «АГ-вода» является эвтектическим низкотемпературным пластификатором древесины. Было установлено также, что данный комплекс может быть удален из древесины в полимерной форме.**

# В 2017 году фактический объем продаж превысил 60 миллиардов рублей.

Разработка новой технологии стала настоящим прорывом в отрасли. Созданные в рамках сотрудничества Группы «Илим» и СПбГУПТД способы получения целлюлозы не имеют мировых аналогов и защищены 19 патентами. Реальные объемы продаж новой продукции значительно превысили прогнозные. В 2014 году, когда начался этап коммерциализации проекта, при запланированных 1102 млн рублей продаж фактический показатель составил 2 620,8 млн рублей. **В 2017 году при плане продаж на уровне 12672 млн рублей фактический объем достиг 61 513 млн рублей.**

# ЕЭК ООН о проекте «Лиственница».

ЕЭК ООН в 2012 г. выпустила отдельную книгу по проекту «Лиственница» - **«Инновационные технологии в российском лесном секторе - Путь к “зеленой” экономике».**

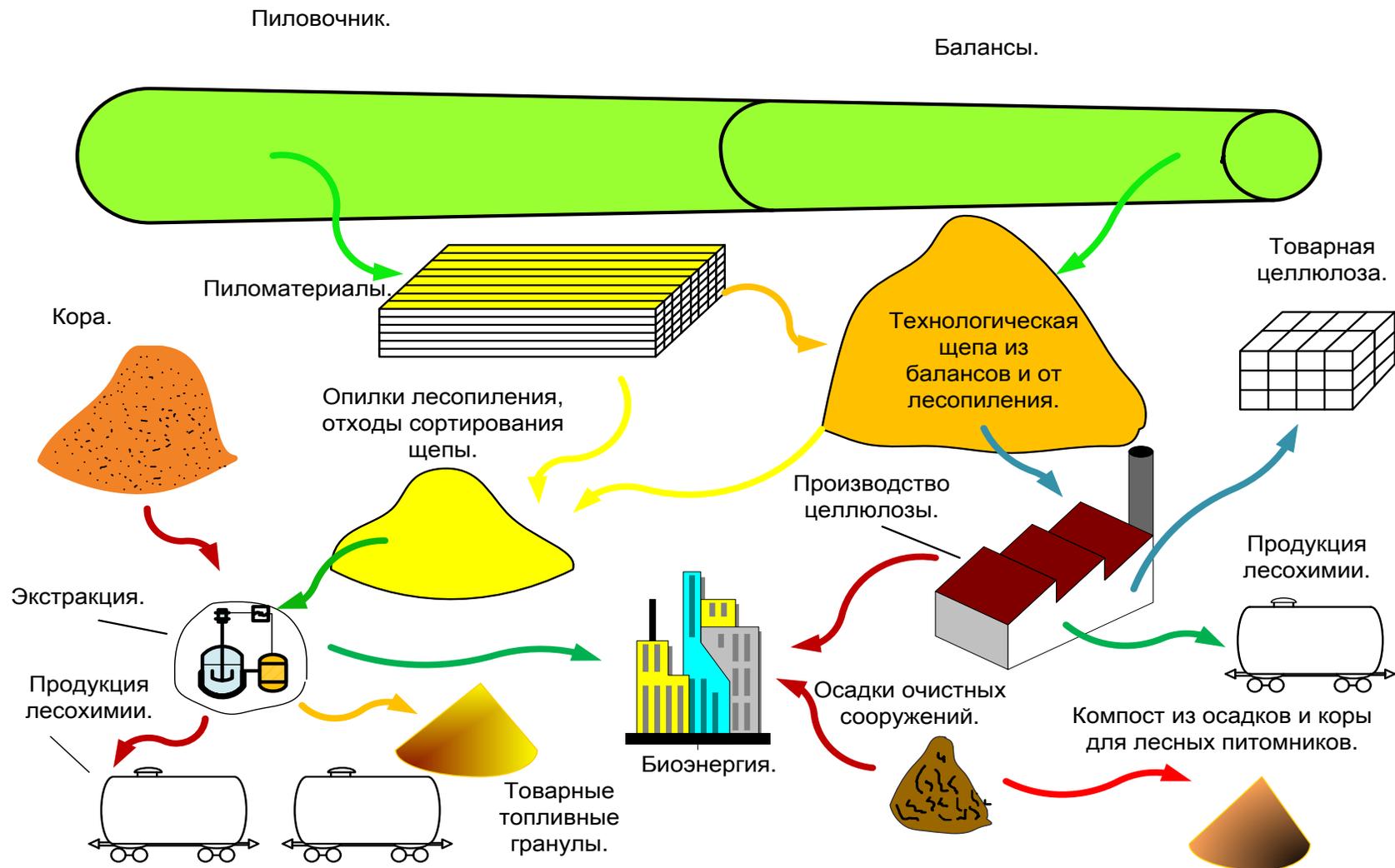
Во вступительном слове Свен Алкалай, Исполнительный секретарь ЕЭК ООН, писал: *«Настоящая публикация рассматривает новый подход к комплексной переработке биомассы лиственницы в качестве примера инновационной разработки. ЕЭК ООН выявляет и изучает лучшие практики внедрения новых технологий и инновационных решений. Совместная работа ОАО Группы «Илим» и Университета является первым примером государственно-частного партнерства в области производства целлюлозы и бумаги в Российской Федерации».*

# «Усть-Илим 23» - продолжение проекта «Лиственница»?

В сентябре 2023 года Группа «Илим» готовится ввести в эксплуатацию целлюлозно-картонный комбинат (ЦКК) в Усть-Илимске Иркутской области. Объем инвестиций в строительство составил 93 млрд рублей. После выхода ЦКК на проектную мощность 600 тыс. т крафтлайнера в год, общий годовой объем производства «Илима» достигнет 4,3 млн т.

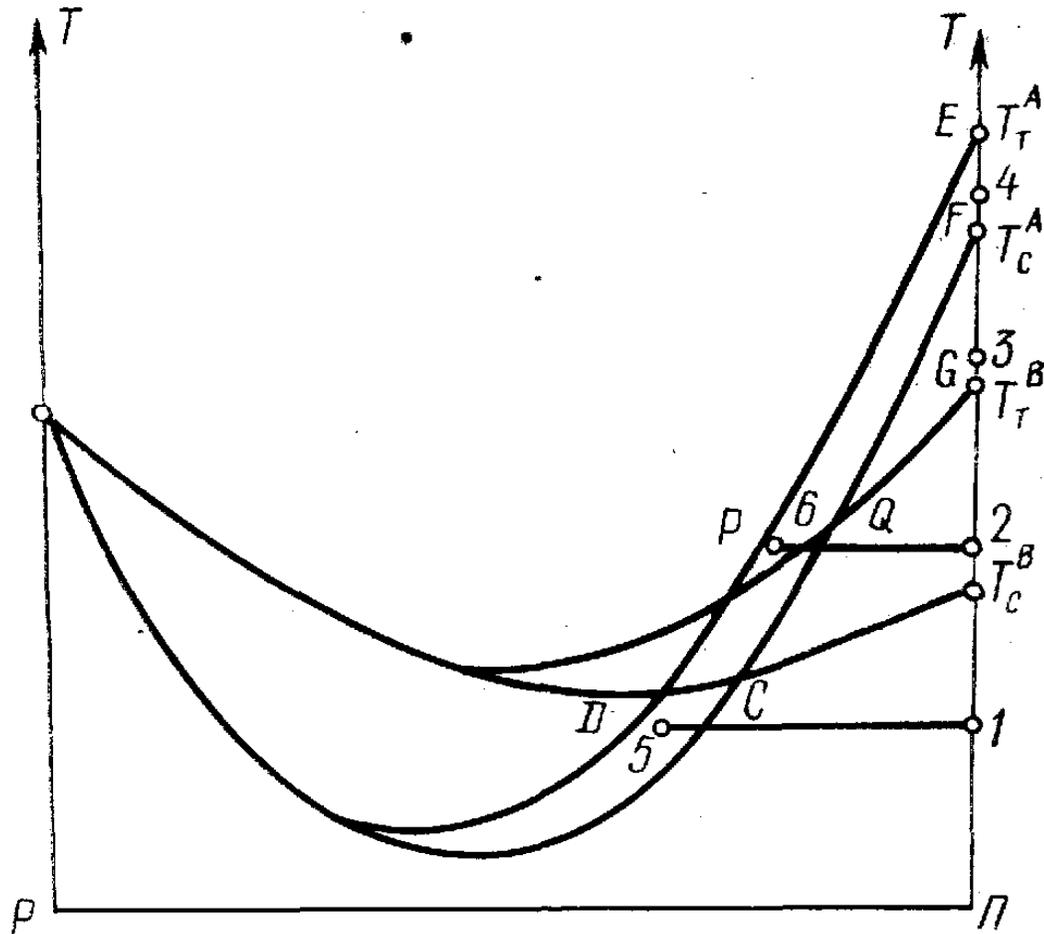
В лесосырьевой базе Группы «Илим» в Сибири на долю лиственницы приходится свыше 35%. Поэтому Усть-Илимский ЛПК практически будет использовать все научные и технологические разработки, созданные в результате проекта «Лиственница»

# Био-рефайнинг древесины лиственницы

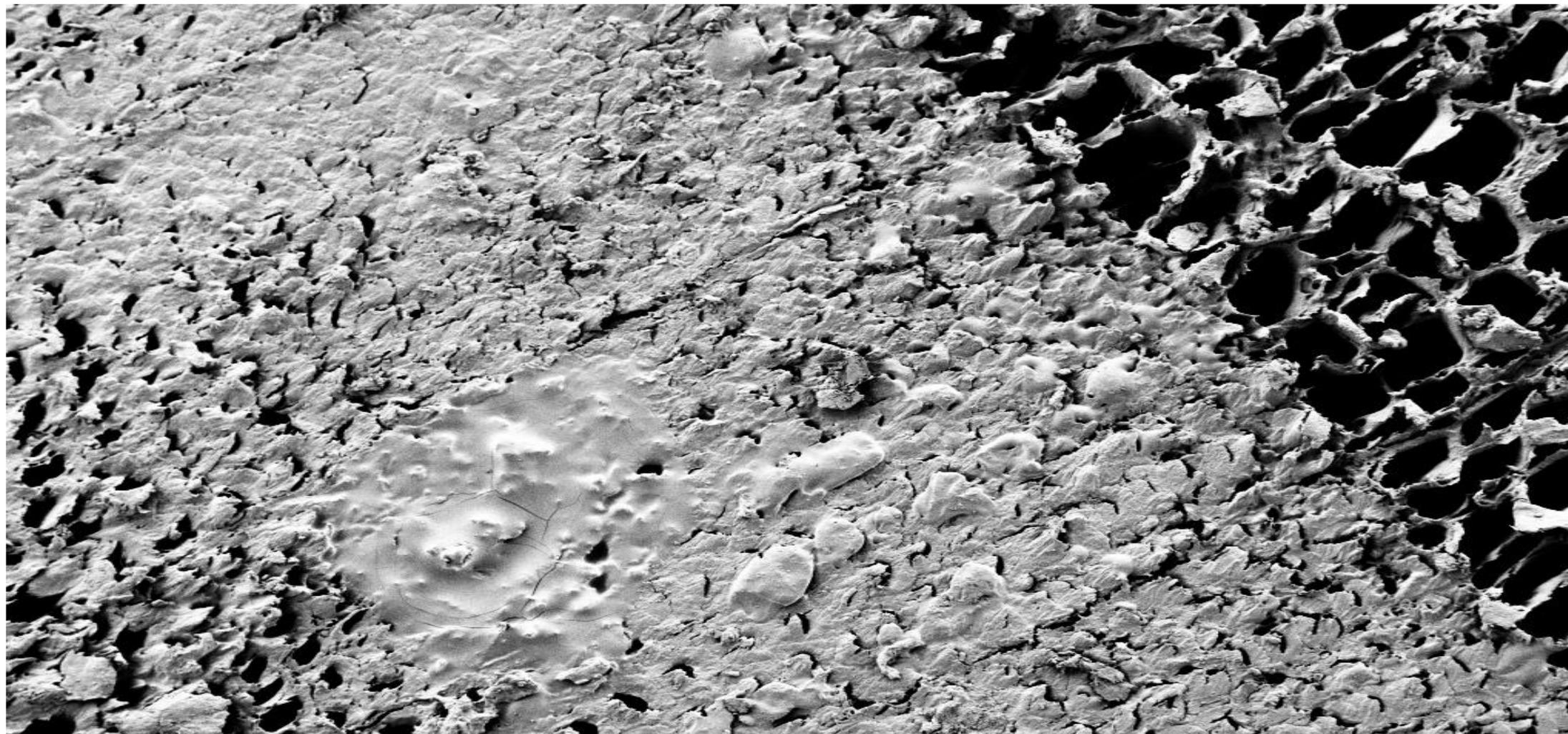


# Диаграмма релаксационных состояний системы полимерных компонентов древесины лиственницы

EPQF — область взаимодействия арабиногалактана, находящегося в вязкотекучем состоянии, с расстеклованной целлюлозой



# Пленка арабиногалактана на поверхности древесины



Mag = 500 X

20  $\mu$ m

WD = 8.1 mm

EHT = 3.00 kV

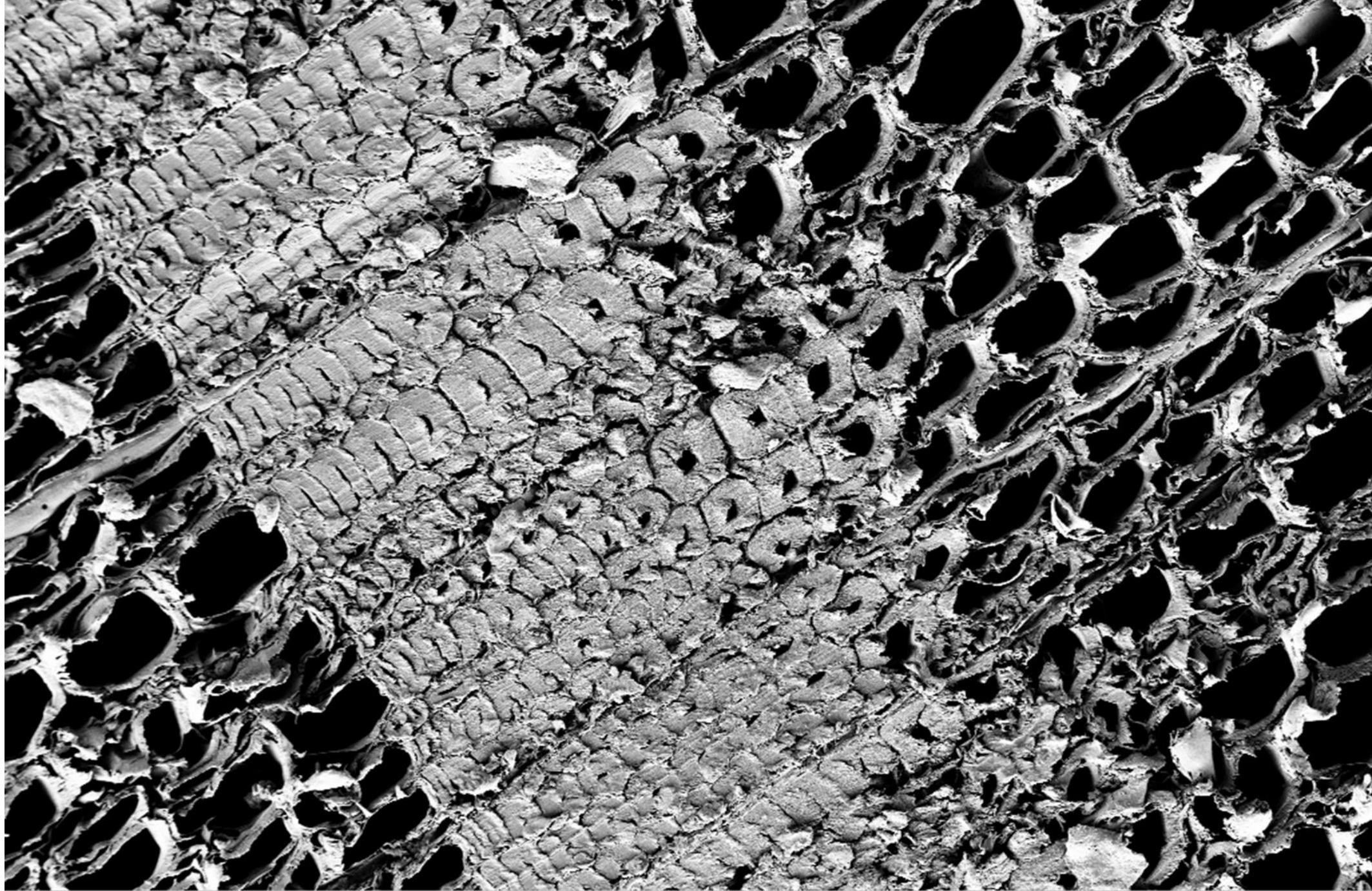
File No = 2244

Aperture Size = 30.00  $\mu$ m

Signal A = SE2

Date :1 Apr 2011 Time :13:03:13

Noise Reduction = Line Int. Done Chamber Status = Pumping (



Mag = 500 X

20  $\mu\text{m}^*$

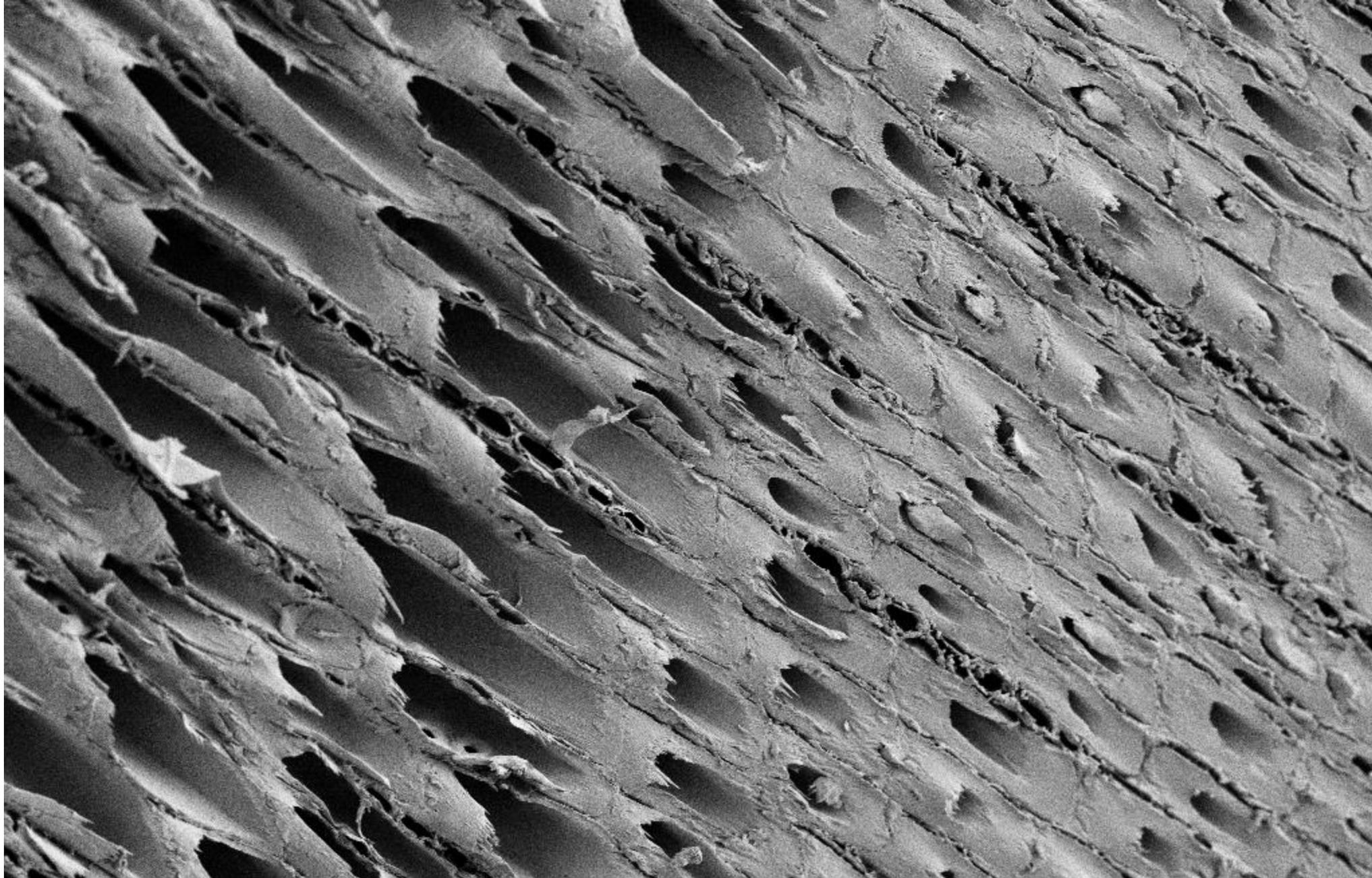
WD = 9.2 mm

System Vacuum =  $3.94\text{e-}006$  mbar

Signal A = SE2

Date :25 Mar 2011

Time :16:38:15



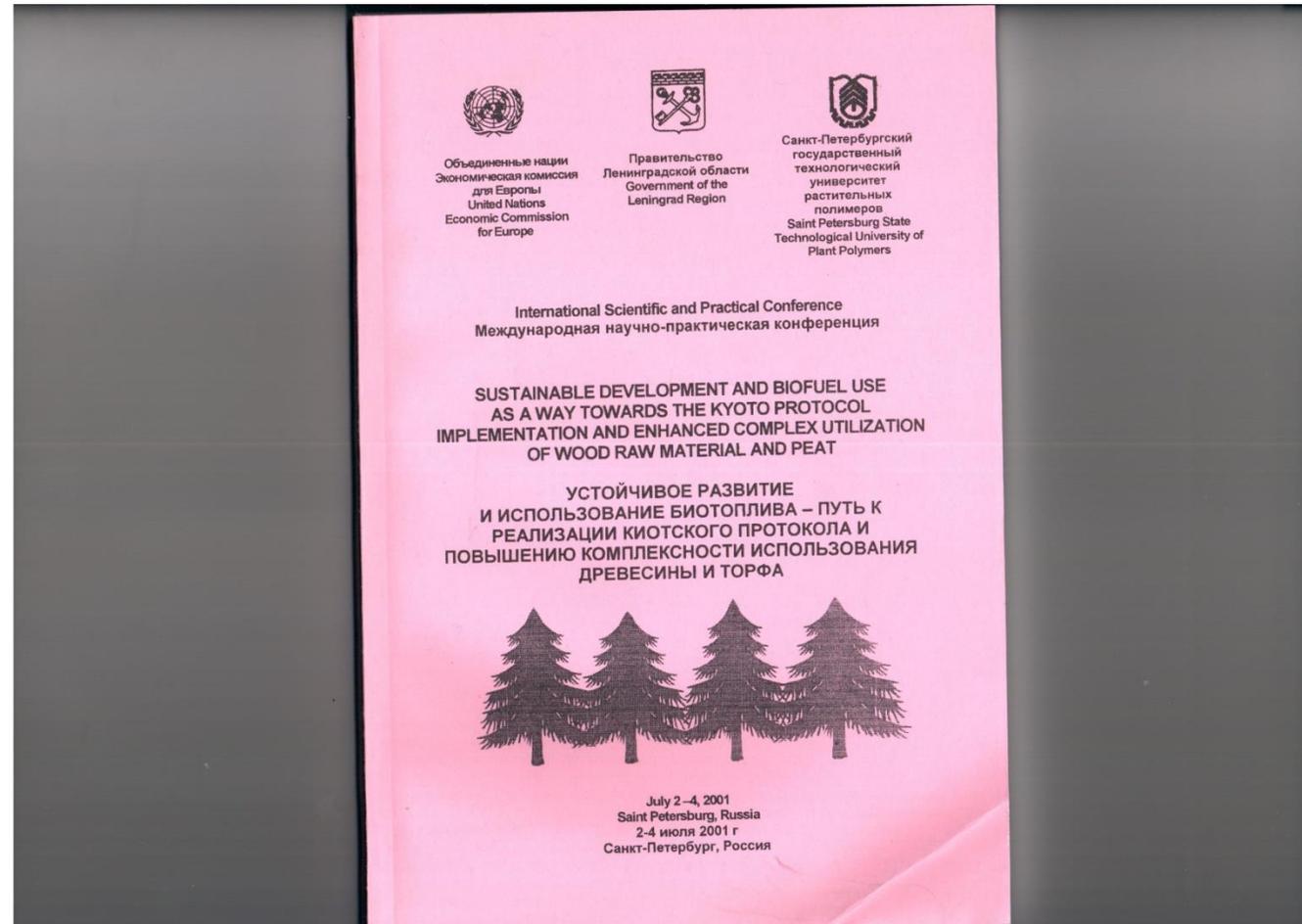
Mag = 500 X  20  $\mu$ m

WD = 4.4 mm EHT = 3.00 kV  
Aperture Size = 20.00  $\mu$ m

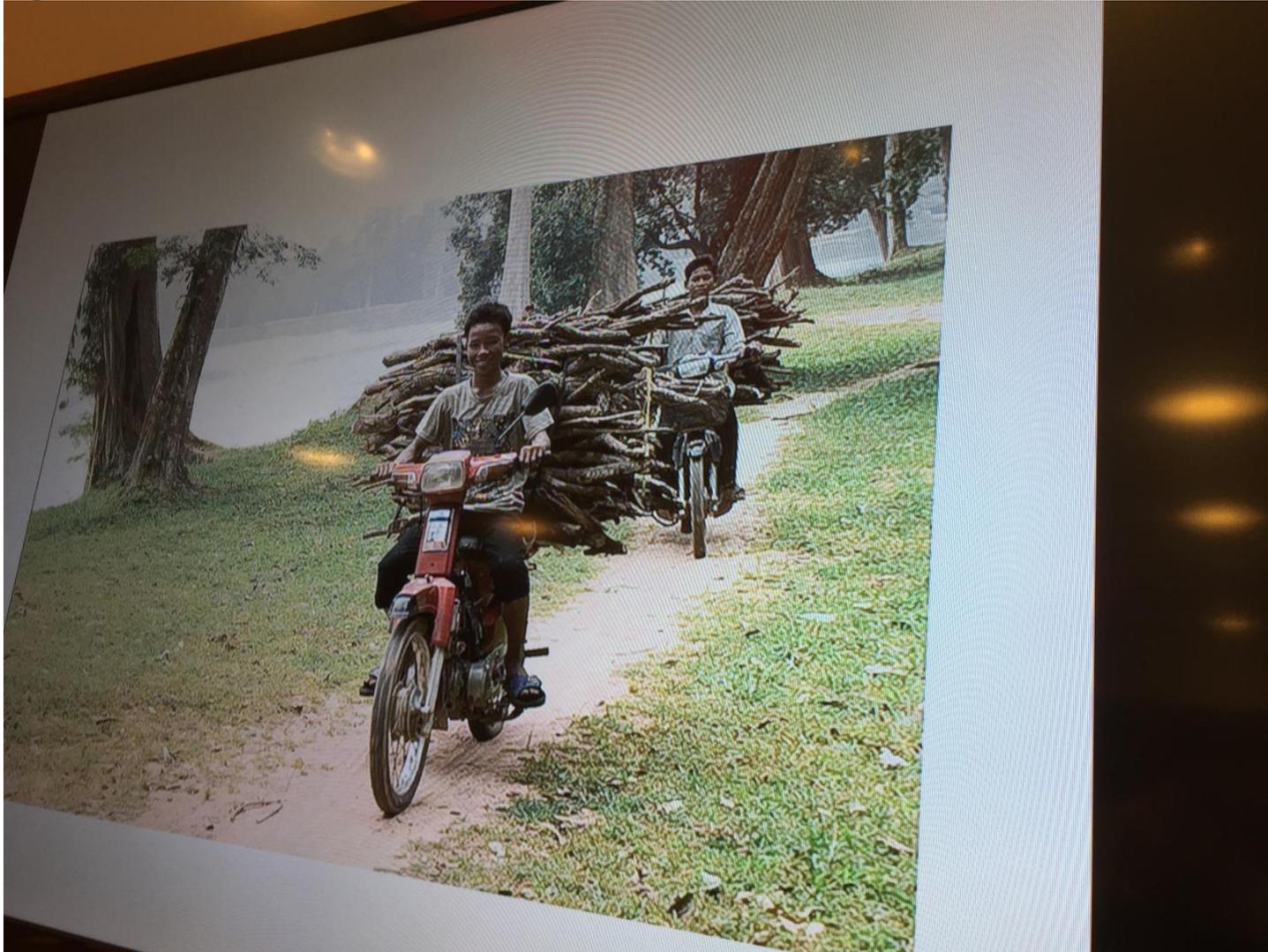
File No = 3471

Signal A = SE2 Date :13 May 2011 Time :12:51:22  
Noise Reduction = Line Int. Done Chamber Status = Pumping (

# Отрасль био-топлива и в России и в мире создана за последние 15-20 лет



Свыше двух миллиардов людей на Земле используют дрова как основной источник энергии...



# Доклады Э.Л. Акима и А.А. Пекарца в Женеве на Европейской неделе Леса (05.11.2019)



## Релаксационное состояние древесины и получение целлюлозных композитов энергетического назначения — древесных брикетов и пеллет

*Рассмотрены изменения релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на основных стадиях производства целлюлозных композитов энергетического назначения — древесных пеллет и брикетов. Показана возможность перехода **к энергосберегающей технологии за счет осуществления диспергирования в условиях направленного хрупкого разрушения опилок** при их превращении в порошок и обеспечения экструдированности порошка при последующем паровом увлажнении. Обнаружена аномалия кажущейся вязкости древесной системы в экструдере из-за совместного воздействия паров воды, газообразных продуктов пиролиза, температуры и сдвиговых напряжений.*

ВСЕ МАТЕРИАЛЫ. Энциклопедический справочник. 2020, №9, с.3-8

Э. Л. Аким, А. А. Пекарец, С. З. Роговина, А. А. Берлин, академик РАН

# Биорефайнинг лиственницы – переработка опилок

На основе переработки опилок лиственницы нами разработана и внедрена **новая технология производства целлюлозных композитов энергетического назначения - древесных брикетов плотностью до 1300-1320 кг/м<sup>3</sup>.**

Технология основана на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины на основных стадиях производства. Переход на энергосберегающую технологию осуществляется за счет хрупкого разрушения опилок, высушенных в аэродинамических условиях практически до нулевой влажности, и их диспергирования - превращения в порошкообразный материал.

Экструдирруемость порошка обеспечивается последующим увлажнением паром. Аномалия кажущейся вязкости древесной системы в экструдере обеспечивается совместным действием паров воды, газообразных продуктов пиролиза, а также температурных и сдвиговых напряжений.

В результате прессования получают древесные брикеты плотностью до 1300-1320 кг/м<sup>3</sup>. Обладая высокой плотностью, эти брикеты могут подвергаться торрефикации и карбонизации с образованием высококалорийных гидрофобных продуктов – торрефицированных брикетов (ТБ) и карбонизированных брикетов (КБ), пригодных как для сжигания, так и для депонирования углерода. При этом в состав брикетов вместе с древесными отходами могут входить и сульфатный лигнин, и отходы синтетических полимеров (доклад В.А. Рыжикова и др. 14.09.23.), и солома риса (презентация Е. Ламбрианиди и др.- 15.09.23) .

Россия в 2021 г. экспортировала 2,3 млн тонн пеллет и брикетов.

# Основные стадии инновационной технологии биотоплива третьего поколения и его сжигания

1. Хрупкое разрушение древесины.
2. Экструзия в режиме минимальной ньютоновской вязкости
3. Торрефикация в условиях доминирующего рекуператора.

Многоступенчатое сжигание:

- Газификация в условиях недостатка кислорода (лямбда-датчики);
- Вихревое сжигание в смеси со вторичным воздухом;
- Охлаждение отходящих газов ниже точки росы.

# Промышленная реализация и перспективы

В настоящее время в России успешно работают 5 линий по производству древесно-угольных брикетов. Первая линия запущена 01 июля 2015 года. Производительность линии - 60-75 т/сут. Работает на смешанных опилках (свежих и хранящихся на отвалах). В прошлом, 2022 году в Риге, Латвия, открылся цех по производству оборудования. **Производительность цеха - 10-15 линий/год.** Древесные брикеты высокой плотности, торрефицированные и карбонизированные брикеты и пеллеты фактически являются биотопливом третьего поколения.

На наш взгляд, разработанная нами технология – торрефикации рисовой соломы, с последующим сжиганием в котлах с кипящим слоем, представляет большой интерес для **Индии, в которой, после уборки риса в некоторых штатах образуется около 30 млн т растительных остатков, из них 19 млн т — в Пенджабе.** Почти половина из них сжигается на полях, создавая огромную экологическую проблему [[https:// energy. economic times. com / news / coal / cpcb - plans - to - subsidise - pellet - manufacturing - for - green - fuel /94749466? redirect =1](https://energy.economic-times.com/news/coal/cpcb-plans-to-subsidise-pellet-manufacturing-for-green-fuel/94749466?redirect=1)].

Центральное правительство Индии намерено продвигать использование зеленого топлива для уменьшения загрязнения окружающей среды.



# Гора опилок в Качуге – типичная картина для ЛПК



Гора опилок – типичная картина для всех предприятий лесопромышленного комплекса



## Задача мирового уровня

Обеспечение углеродной нейтральности и реализация стратегии низкоуглеродного развития, переход к циркулярной био-экономике.

## Актуальность для Российской Федерации

Россия обладает крупнейшими в мире площадями природных лесов. Лесопромышленный комплекс России заготавливает в год свыше 200 млн. кубометров древесины, свыше 75% из нее превращает в отходы, при био-разложении которых образуется углекислый газ.

## Деятельность научной школы ВШТЭ

Создание производства твердого био-топлива третьего поколения (и эффективных методов его сжигания) в на базе переработки всех видов древесных отходов.

## Результат деятельности научной школы

Новый, более эффективный способ снижения природных и производственных выбросов диоксида углерода, а также реализация нового направления секвестирования углерода.

## Инновационный задел

Реализованная в опытно-промышленных масштабах инновационная технология получения древесных брикетов сверхвысокой плотности. Фундаментальная концепция об определяющей роли релаксационных состояний полимерных компонентов древесины в природе и при ее переработке. Многочисленные патенты, диссертации и реализованные технологии.

# Создание производства твердого **БИО-ТОПЛИВА** третьего поколения и эффективных методов его сжигания.

Биотопливо 1-го поколения

## **ДРОВА**

**Плотность** 200-300 кг/м<sup>3</sup>  
**Теплотворная способность**  
4000-5000 ккал/кг



Биотопливо 2-го поколения

## **ПЕЛЛЕТЫ**

**Плотность** 600-800 кг/м<sup>3</sup>  
**Теплотворная способность**  
до 6000 ккал/кг



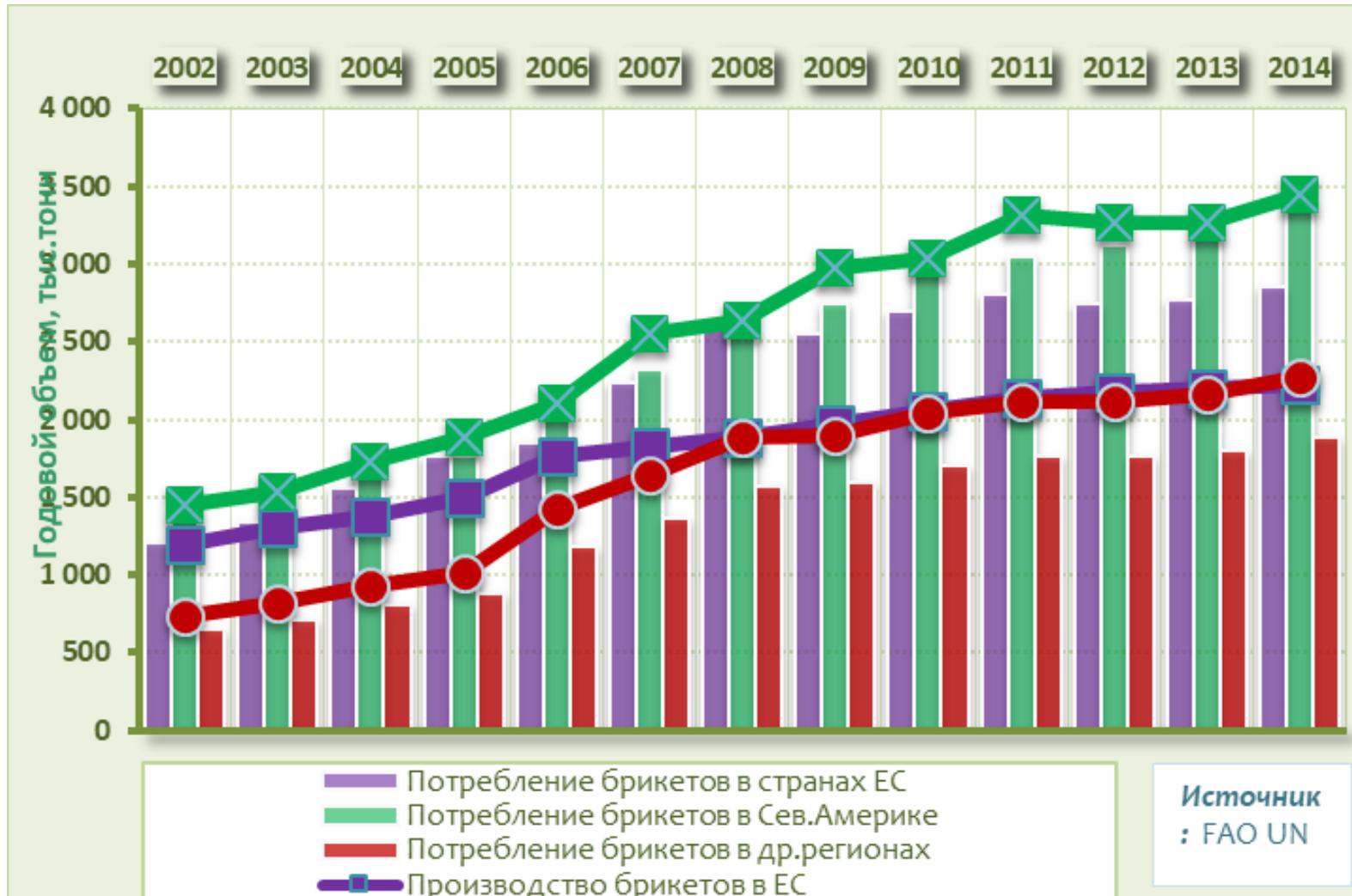
Биотопливо 3-го поколения

## **ТОРРЕФИЦИРОВАННЫЕ БРИКЕТЫ**

**Плотность** ~1200 кг/м<sup>3</sup>  
**Теплотворная способность**  
8000-9000 ккал/кг



# Динамика потребления и производства древесных топливных брикетов в Европе с 2002 по 2014 год, тыс. тонн. (по данным С. Передерия)



**Настройки нижнего поля**

**Гидростанция**

- Катушка Y1:
- Катушка Y2:
- Давление:
- Темп. ОК:
- Уровень:

**Поддерживать уровень!**

**Настроить уровень**

4 Hz

7 A

55.0 Hz 2.1 A

25.0 Hz 4.0 A

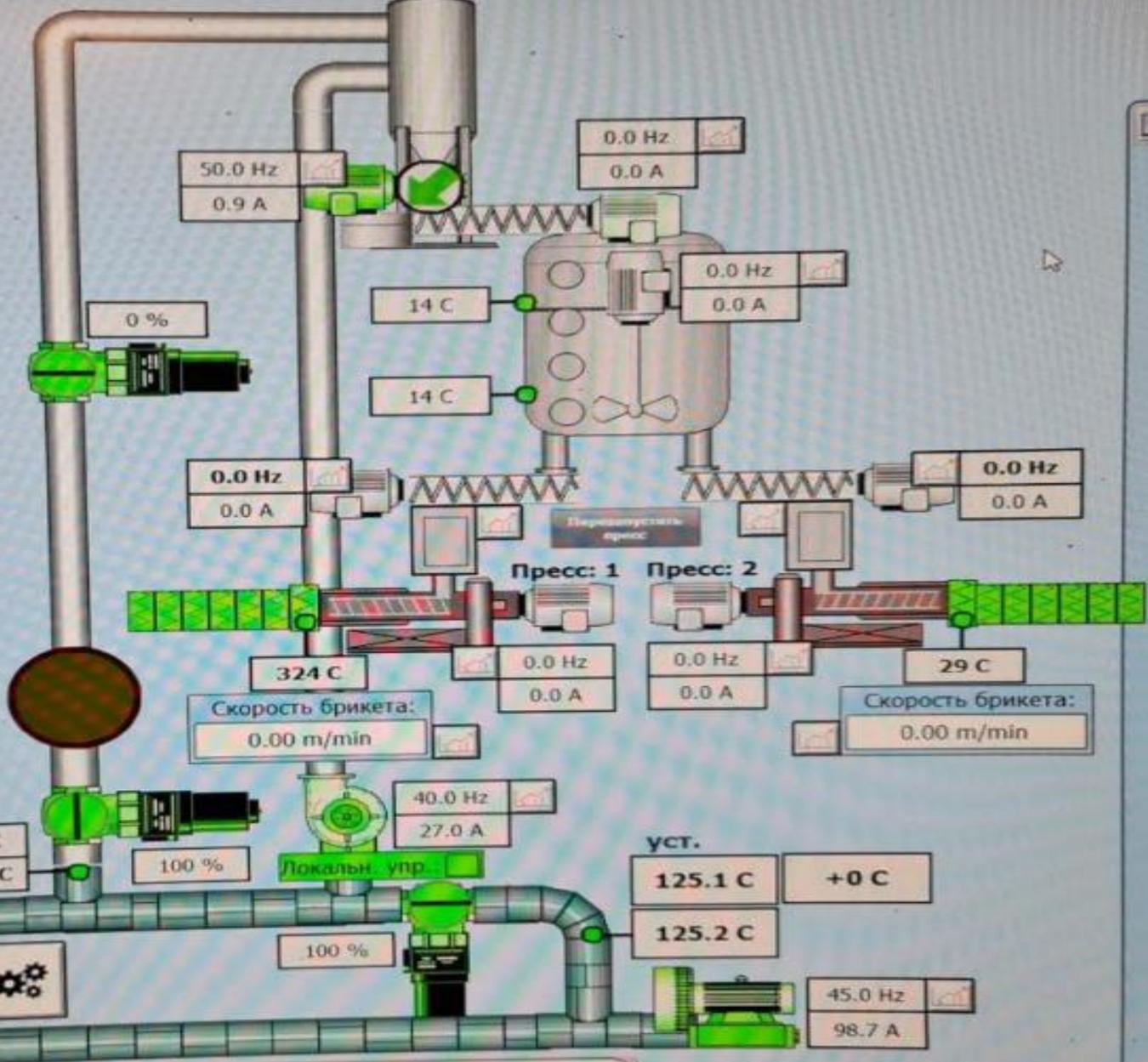
19.1 Hz 6.3 A

50.0 Hz 1.0 A

**Настройки коллайдера**

**Нажать выключение**

**Автоматический режим**



**Газ в печь** 0 %

**Запустить пироканнеру 1!**

**Тепло из печи**

**Запустить пироканнеру 2!**

**Газ в печь** 0 %



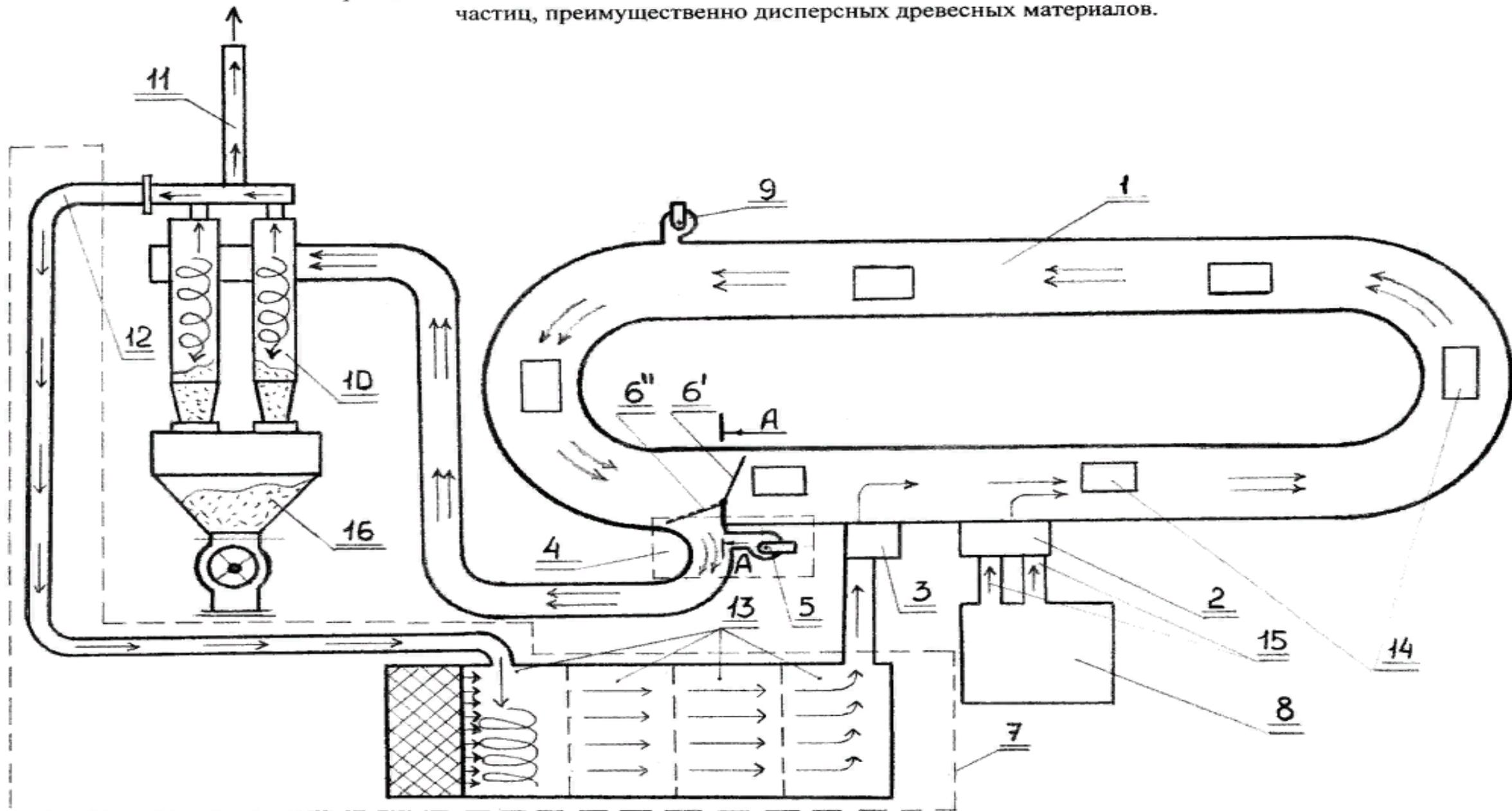
# Вид на Коллайдер на заводе в Латвии



# Коллайдер в работе



Принципиальная схема комплекса для непрерывной термообработки твердых мелких частиц, преимущественно дисперсных древесных материалов.



ФИГ. 1

# Сжигание лесосечных отходов в Иркутской области



# Физико-химические аспекты био-рефайнинга древесины

Целлюлозные фибриллы являются армирующим элементом древесины и других растений. Построенная из высоко ориентированных элементов надмолекулярная структура целлюлозы обеспечивает высокую прочность целлюлозных волокон, сохраняет свои армирующие функции в бумаге и картоне.

Основные физико-химические аспекты био-рефайнинга:

Какова прочность целлюлозных фибрилл в древесине лесных плантаций ускоренного роста и в северных хвойных лесах?

**До какого уровня надо «разбирать» «архитектуру», надмолекулярную структуру природного композита – древесины – нано-структуры, морфологической структуры?**

**Какие структурные изменения происходят с полимерными компонентами древесины?**

**Как создать оптимальную структуру новых материалов и композитов?**

Как решить задачу максимальной реализации прочности целлюлозных фибрилл древесины?

# Совместная карбонизация брикетов и горбыля



Независимая Газета Печатная версия

11.09.2023 17:55:00

# Древесина и декарбонизация в условиях санкций Как трансформировать небольшой сегмент лесопереработки в полноценный сегмент энергетики

Михаил Аким    Эдуард Аким

Об авторе: Михаил Эдуардович Аким – доктор философии (PhD), профессор Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ, Эдуард Львович Аким – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ВШТЭ СПбГУПТД, почетный член Консультативного Комитета ФАО ООН по устойчивости лесного сектора.

# ТВЕРДОЕ БИОТОПЛИВО И НИЗКОУГЛЕРОДНАЯ ЭКОНОМИКА в России и мире

## Аким Эдуард Львович

заведующий кафедрой технологии целлюлозы и композиционных материалов СПб ГУПТД, Почетный Член Консультативного Комитета ФАО ООН по устойчивости Лесного сектора, Член научного совета РАН по лесу, профессор, д.т.н.

## Пекарец Александр Андреевич

доцент кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов СПб ГУПТД, Научный руководитель Лесной Технологической Компании, к.т.н.

## Аким Михаил Эдуардович

профессор Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ, РНД, MBA

## Луканин Павел Владимирович

Первый проректор СПб ГУПТД, Директор Высшей школы технологии и энергетики, профессор, д.т.н.

## Федорова Олеся Вячеславовна

доцент кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов СПб ГУПТД, проректор по дистанционному обучению СПб ГУПТД, к.т.н.

## Роговина Светлана Захаровна

ведущий научный сотрудник Института Химической Физики им. Н.Н. Семенова РАН, д.х.н.

## Берлин Александр Александрович

Академик РАН – Научный руководитель Института Химической Физики им. Н.Н. Семенова РАН

ЗА ДВАДЦАТЬ ПЯТЬ ЛЕТ В МИРЕ РОДИЛАСЬ И БЫСТРЫМИ ТЕМПАМИ РАЗВИВАЕТСЯ ПРАКТИЧЕСКИ НОВАЯ ПОДОТРАСЛЬ ЛЕСНОГО СЕКТОРА – ТВЕРДОЕ БИОТОПЛИВО ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ – ПЕЛЛЕТЫ И БРИКЕТЫ. В 2022 ГОДУ МИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНЫХ ПЕЛЛЕТ ДОСТИГЛО 50 МЛН ТОНН; В 2021 ГОДУ РОССИЯ ПОСТАВИЛА НА МИРОВЫЕ РЫНКИ 2,3 МЛН ТОНН ДРЕВЕСНЫХ ПЕЛЛЕТ, ПРИБЛИЗИВ СВОЮ ДОЛЮ К 5%. В НЕДАВНО ОПУБЛИКОВАННОМ НОВОМ ОТЧЕТЕ BRITISH PETROLEUM – REPORT 2023, ПРОГНОЗИРУЕТСЯ УТРОЕНИЕ ТЕМПОВ РОСТА БИОТОПЛИВА ДО 2050 ГОДА

*IN TWENTY-FIVE YEARS, A NEW SUB-SECTOR OF THE FORESTRY industry HAS BEEN BORN AND IS RAPIDLY DEVELOPING IN THE WORLD, NAMELY THE PRODUCTION OF PELLETS AND BRIQUETTES, WHICH IS A SECOND-GENERATION SOLID BIOFUEL. IN 2022, THE GLOBAL PRODUCTION OF WOOD PELLETS REACHED 50 MILLION TONS; IN 2021, RUSSIA SUPPLIED 2.3 MILLION TONS OF WOOD PELLETS TO WORLD MARKETS, BRINGING ITS SHARE CLOSER TO 5%. BRITISH PETROLEUM'S RECENTLY RELEASED NEW 2023 REPORT PREDICTS A TRIPLING OF BIOFUEL GROWTH RATES BY 2050*

Ключевые слова: биотопливо, пеллеты, изменение климата, древесина, антропогенные выбросы.

## Россия – экспортер пеллет и брикетов

В 2019–20 году Россия экспортировала 2,32 млн тонн древесных пеллет – 6% от мирового объема производства пеллет. (ФАО 2019 – Древесные пеллеты и прочие агломераты – 46 миллионов тонн). В первом полугодии 2021 года производство топливных пеллет увеличилось на 19%, цены на гранулы прибавили 17%.

В значительной степени рождение и быстрые темпы развития твердого биотоплива второго поколения – пеллет и брикетов обусловлено тем,

что они как правило производятся из опилок, т.е. многотоннажных отходов переработки древесины, и тем самым решается проблема их утилизации. Кроме того, благодаря использованию современных систем сжигания резко увеличивается энергоэффективность.

При этом, если весь объем производства пеллет в России изготавливался на импортном оборудовании и по зарубежным технологиям, то производство брикетов осуществляется по разработанной в России инновационной энергосберегающей технологии – древесных брикетов,

с плотностью до 1300–1320 кг/м³ [5–10]. Нами разработаны не только описываемые далее научные основы и принципы этой технологии, но и сама технология; она запатентована и реализована в России на 5 технологических линиях, производящих древесные, древесно-угольные и торрефицированные брикеты. Все эти линии работают на опилках и древесных отходах. Кроме того, в Латвии, в Риге не только запущено аналогичное производство брикетов, но и организован выпуск оборудования и самих технологических линий малыми сериями – до 10-15 линий в год. Эта технология обеспечивает получение твердого биотоплива высокой плотности (HDSBF) – целлюлозных композитов энергетического назначения — древесных брикетов, с плотностью до 1300–1320 кг/м³ [5–10], в то время как плотность кристаллических областей целлюлозы – около 1500 кг/м³. Такая высокая плотность качественно меняет многие свойства как самих брикетов, так и их поведение при дальнейшей торрефикации и карбонизации. Именно это позволяет называть их «твердым биотопливом третьего поколения». По инновационной технологии биотоплива третьего поколения – твердого биотоплива высокой плотности (HDSBF) – целлюлозных композитов энергетического назначения, из отвалов гидролизного лигнина (Станция Зима) получены топливные брикеты со свойствами торрефицированных брикетов. Основы инновационной технологии были представлены на многих международных конференциях, включая доклад в Женеве на Международной лесной неделе ФАО ООН/ЕЭК ООН [10].

## МГЭИК и биотопливо

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) 20 марта 2023 г. опубликовала Шестой доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [11]. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) – это орган Организации Объединенных Наций, ответственный за оценку состояния научных знаний, связанных с изменением климата. Она была учреждена в 1988 году Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) и

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) для предоставления политическим лидерам регулярных научных оценок, касающихся изменения климата [12]. В МГЭИК, являющейся ведущим международным органом по оценке изменения климата, входят 195 государств-членов, которые являются членами ООН или ВМО. Цель МГЭИК, созданного при Организации Объединенных Наций – прежде всего обобщить наиболее устоявшуюся и тщательно проверенную совокупность знаний об изменении климата. Опубликованное исследование является серьезнейшим документом, качество которого обеспечивается вовлечением лучших ученых из 65 стран. В трех рабочих группах, принимавших участие в отчете, 782 ученых (и еще сотни авторов), проанализировали более 66 000 исследований. Таким образом, нет оснований ставить под сомнение результаты данного исследования, так как аргументированно опровергать представленные в нем сценарии можно было бы только на основании сопоставимых по масштабам исследований. На данный момент это самый большой, наиболее хорошо проверенный массив научных знаний, который преобразуется в полезную и эффективную политику на уровне государств и компаний.

Обобщающий доклад МГЭИК, утвержденный в ходе недельной сессии в Интерлакене (Швейцария) – это первый всеобъемлющий отчет климатической группы ООН после Парижского соглашения 2015 года, который знаменует собой заключительную главу шестого цикла оценки группы. Ожидается, что его результаты послужат руководством по преодолению чрезвычайной климатической ситуации [13].

В связи с публикацией Шестого доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) Генеральный секретарь ООН Антониу Гутерриш охарактеризовал отчет как «настоятельный призыв к массовому усилению усилий по борьбе с изменением климата каждой страной, каждым сектором и в любой период времени». В отчете, опубликованном Межправительственной группой экспертов ООН по изменению

климата (МГЭИК) ведущие ученые-климатологи призывают к корректировке курса по борьбе с климатическими изменениями: текущих или даже запланированных мер недостаточно; в нем говорится, что мир, вероятно, не достигнет в течение десятилетия своей самой амбициозной климатической цели – ограничения потепления на 1,5 °C выше доиндустриального уровня. МГЭИК заявила, что беспрецедентная проблема удержания глобального потепления стала еще более серьезной в последние годы из-за неуклонного увеличения глобальных выбросов парниковых газов. Эксперты считают, что глобальные выбросы должны быть сокращены почти вдвое к 2030 году. Температурный порог в 1,5 °C признан критически важным, поскольку за пределами этого уровня более вероятны так называемые переломные моменты, то есть пороги, при которых небольшие изменения могут привести к резким сдвигам во всей системе жизнеобеспечения Земли. «Внедрение эффективных и справедливых мер по борьбе с изменением климата не только сократит потери и ущерб для природы и людей, но и принесет более широкие выгоды», – считает председатель МГЭИК Ли Хуосун [11].

В Шестом докладе МГЭИК изложены краткосрочные действия и поэтапный отказ от ископаемого топлива, необходимые для поддержания повышения температуры ниже 1,5 °C. Показано, что существует огромный потенциал для расширения реальных решений, включая меры по сокращению спроса на энергию, для быстрого сокращения, необходимого для удержания повышения температуры ниже 1,5 °C.

## Древесина и ЦУР – смена концепций?

Для начала отметим те события (исключая политические), которые произошли на планете Земля за последние месяцы.

- Население нашей планеты превысило восемь миллиардов человек и продолжает расти.
- Индия стала самой многочисленной страной мира, обогнав Китай.

# Био-рефайнинг древесины ОСИНЫ

# Необходимая и достаточная белизна офисной бумаги.

На протяжении десятилетий экологические движения по всему миру требовали снизить белизну копировальной бумаги до уровня, необходимого и достаточного для того, чтобы она функционировала как средство хранения информации.

Большинству пользователей этой бумаги подойдет существенно более низкий уровень, так как жизненный цикл многих видов бюрократической документации (квитанции, счета, справки и т.д.) очень короткий, и чем дешевле они стоят, тем лучше. Чрезмерная белизна бумаги с оптическими отбеливателями даже вредна для глаз человека (по санитарным нормам ISO белизна школьных тетрадей не должна превышать 80).

Стандарт белизны бумаги класса С в США до середины 2000-х годов составлял 84.

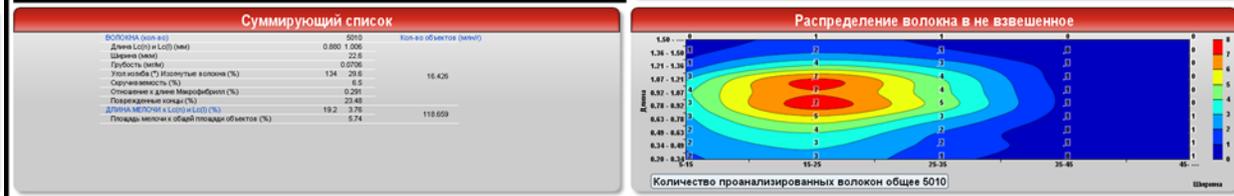
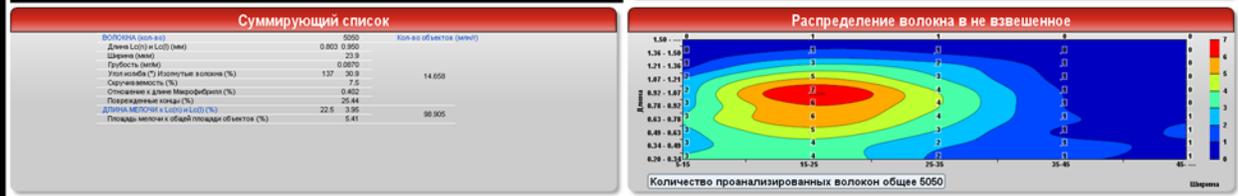
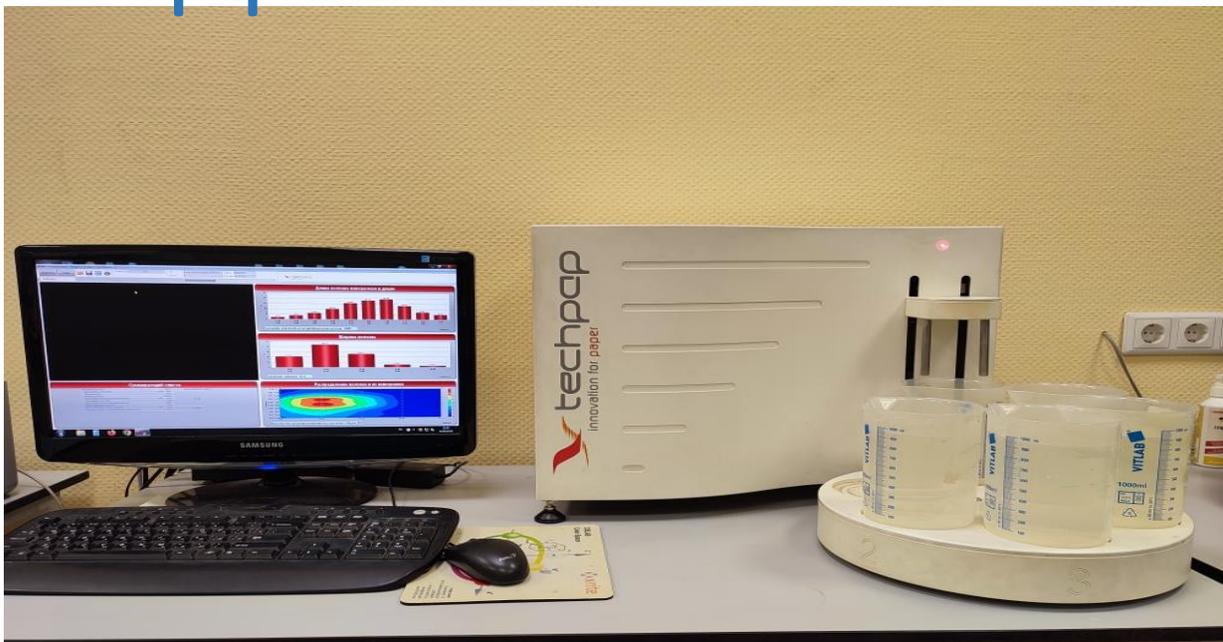
# Проблемы с офисной бумагой в РФ в 2022г.

Зимой 2022 года в связи с санкционной политикой ряд стран прекратили импорт белой бумаги в РФ, а некоторые иностранные производители объявили о прекращении поставок химикатов, в том числе используемых для отбеливания целлюлозы.

Базируясь на ранее проведенных Светогорским ЦБК и Кафедрой ТЦКМ совместных научно-исследовательских работах по био-рефайнингу осины и поэтапной эколого-технологической реконструкции ЦБК, в кратчайшие сроки (всего за две недели) был решен ряд сложных технологических задач и запущено производство эко-бумаги ТCF с использованием частично беленой лиственной целлюлозы, БХТММ и минеральных наполнителей. Качество такой бумаги соответствует всем требованиям, предъявляемым к офисным бумагам. Была создана и запущена в производство принципиально новая марка офисной бумаги – копировальная бумага ЭКО, не содержащая в своем составе хвойной беленой целлюлозы. Разработана и внедрена в промышленном масштабе технология ТCF-отбеливания для новой копировальной бумаги ЭКО, состоящей из лиственной целлюлозы (после щелочно-кислородной обработки) и беленой осинового БХТММ.

Это позволило решить важнейшие социальные задачи по обеспечению бесперебойной работы системообразующего предприятия, а также выполнить Государственную задачу по своевременному проведению ЕГЭ 2022 года в России. Изменение № 1 к ГОСТ Р 57641-2017 «Бумага ксерографическая для оргтехники. Общая спецификация» была разработана для нового продукта. Увеличено количество марок ксерографической бумаги (с трех до четырех) за счет введения новой марки «С», применение которой соответствует действующей редакции ГОСТ Р 57641-2017. Это открывает возможность продвигать этот сорт бумаги для государственных закупок. В 2022 году произведено более 100 000 тонн бумаги ЭКО; она рекомендована для государственных и муниципальных закупок [5].

# Морфология волокон осины и березы и их смеси



# В 2022 году Светогорский ЦБК выпустил 100 тысяч тонн бумаги Эко.

Эксплуатационные свойства бумаги ЕСО соответствуют всем требованиям к копируемой бумаге класса С, а эластичность и релаксационные свойства соответствуют требованиям ко всем сортам копируемой бумаги. Это позволяет использовать бумагу ЕСО во всех типах принтеров. Углеродный след новой копируемой бумаги ЭКО примерно в 1,2-1,5 раза ниже по сравнению с марками А и В. Переход на производство новой офисной бумаги ЭКО резко снижает воздействие предприятия на окружающую среду.

# Визуальное сравнение классической и эко офисной бумаги



# Примерная композиция различных марок офисной бумаги (%),

Марки	А	В	С	Эко	Эко2
	<b>Компоненты</b>				
Хвойная беленая целлюлоза (ECF)	33,5	33,5	33,5	0	0
Хвойная полу беленная целлюлоза (TCF)	0	0	0	0	33,5
Лиственная беленая целлюлоза <b>*полу беленная лиственная целлюлоза</b>	63,5	56,5	51,5	70*	51,5*
БХТММ	3,0	10,0	15,0	30,0	15,0
Мел, химически осажденный, кг/т	206	207	207	163	207
Скорость БДМ, м/мин	1200	1200	1200	900	1200