

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

*К.А. Тараскин<sup>1</sup>, Е.К. Барнашова<sup>2</sup>, Е.А. Вертикова<sup>2</sup>, А.Д. Симагин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт прикладной акустики,  
Московская область, г. Дубна, Россия*

*<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,  
г. Москва, Россия*

Успешное развитие современных природоохранных технологий может в значительной степени способствовать сохранению природных богатств Большого Алтая. Важным направлением сохранения лесных массивов может считаться замена древесного сырья в промышленной технологии производства целлюлозы альтернативными источниками на основе травяных растений сельскохозяйственного назначения, значительная часть биомассы которых не находит полезного применения и безвозвратно утилизируется. В настоящем исследовании приведены данные, полученные в результате проведения полевых экспериментов, подтверждающие перспективность возделывания льна-долгунца – потенциального источника целлюлозосодержащего сырья, на посевных площадях различных регионов, при задействовании малопродуктивных типов почв и в условиях неблагоприятного воздействия климатических факторов сезонного характера. Приведены результаты эксплуатации опытной технологической установки по переработке сырья растительного происхождения; полученные результаты явились исходным материалом для проведения сравнительной оценки бисульфитного и пероксидно-щелочного методов выделения целлюлозы из соломы льна. Показана экологическая целесообразность применения промышленной технологии, при реализации которой не образуются серосодержащие сточные воды. Полученные данные могут быть использованы при планировании природоохранных мероприятий на территории Большого Алтая и других регионов Российской Федерации.

**Ключевые слова:** Экологическая безопасность, лён-долгунец, целлюлоза, переработка растительного сырья, производственные отходы.

Сохранение уникальных природных богатств Большого Алтая является задачей первостепенной важности. Значение этой проблемы многократно возрастает в условиях всеобъемлющего расширения сфер промышленного и агротехнического освоения обширных территорий, в том числе и тех, которые до недавнего времени считались малопригодными для масштабного использования. В этих условиях чрезвычайно возрастает роль новых природосберегающих технологий, минимизирующих ущерб природным биоценозам.

Наиболее серьёзный ущерб природному хозяйству Большого Алтая наносят вырубки лесов. Значительная часть древесины, предназначенной для промышленной переработки, расходуется в качестве сырьевого источника на производство целлюлозы. При анализе технологических процессов, осуществляемых на целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК), наибольшее распространение получили сульфатный, сульфитный и бисульфитный способы переработки древесины. Существенным преимуществом этих методов является возможность переработки практически любых видов древесного сырья из хвойных и лиственных пород. Известно, что в процессе деятельности наиболее крупных предприятий ЦБК, в результате осуществления технологических операций, образуются побочные отходы производства, которые загрязняют природные водоемы сточными водами с содержанием сульфитных и сульфатных щелоков, волокнами древесины, корой и прочими древесными отходами, а также, кислотами и щелочами, активным хлором, дурно пахнущими веществами. Поэтому, в экологическом отношении, наиболее перспективны окислительные методы получения

целлюлозы — кислородно-содовый или пероксидно-щелочной, при реализации которых не используются серосодержащие реагенты и образуется меньшее количество опасных отходов.

В тоже время, существуют альтернативные сырьевые источники взамен древесины [1], к числу которых могут относиться однолетние травяные растения [2, 3]. Несмотря на то, что по содержанию целлюлозы травяное сырьё несколько уступает древесине [4], необходимо учитывать следующий факт: травянистая продукция восполняется ежегодно, в то время как для полноценного вызревания древесины необходим срок не менее 20 лет. В сельскохозяйственном производстве значительная часть выращиваемой растительной биомассы остаётся невостребованной. Например, солома зерновых культур [5] используется лишь в незначительной степени в животноводстве и ряде смежных направлений, а в основной массе запахивается по окончании сезонных работ или сжигается. Аналогично, при возделывании льна масличных культур [6], востребованным является семенной материал растений – источник ценного пищевого и технического продукта – льняного масла; прочие части растений льна, составляющие порядка 80% от общей массы, как правило не находят широкого практического применения [7] и безвозвратно утилизируются.

Учитывая, что урожайность биомассы травяных культур составляет в среднем  $1,0 \div 1,5$  т/га волокна, потенциал производства целлюлозы из этих культур в стране составляет по самым скромным оценкам 40 - 50 тыс. тонн [8], что свидетельствует о целесообразности разработки этого направления. В экспериментальном варианте испытывались самые различные варианты технологической реализации процесса переработки растительного сырья с целью его делигнификации и выделения целлюлозы. Однако, производства в промышленном масштабе до сих пор не реализованы. Одной из причин такого положения можно считать отсутствие серьёзных аргументов в вопросе экологических преимуществ переработки травяного сырья по сравнению с древесным.

Цель работы: обоснование и экспериментальная оценка перспективных направлений в области агротехники и выборе технологий, обеспечивающих сохранение природных биоценозов и реализацию программ региональной экологической безопасности.

#### ***Методы и методики исследования***

К настоящему времени проведены исследования по оценке перспектив использования различных видов травяных культур в качестве сырьевых источников для получения целлюлозы. С точки зрения урожайности растительных культур, неоспоримым преимуществом обладает мискантус [9] – многолетнее травяное растение, районированное для возделывания в условиях умеренного климата. В работе [10] проведён сравнительный анализ качества целлюлозы, получаемой из мискантуса и соломы льна. Представленные данные указывают на незначительное расхождение показателей, полученных при реализации идентичной технологии делигнификации биоматериала. Исходя из этого факта, с нашей точки зрения, в качестве сырьевого источника наилучшие перспективы может иметь лён, как объект, выращиваемый, в основном, для получения масла, одновременно создающий ежегодно значительные количества побочного продукта – соломы; в отличие от мискантуса, требующего целенаправленного выращивания для получения целлюлозосодержащего сырья.

В рамках настоящего исследования производилась высадка льна в различных регионах, имеющих различия по составу почв и характеру климатических особенностей: в Саратовской и Тверской областях. Состояние почвенных ресурсов как в Тверской, так и в Саратовской областях, остаётся достаточно проблематичным с точки зрения перспектив развития высокопродуктивного землепользования. Для Тверской области основными типами почв являются: дерново-среднеподзолистые, торфяно-подзолисто-глеевые, болотные, подзолисто-болотные и аллювиальные (пойменные) дерновые. В Саратовской области почвенный покров отражает характер ландшафтно-территориального разнообразия; в зависимости от степени возрастания засушливости климата, происходящего по вектору с северо-запада области на юго-восток, существенным образом изменяются структурные признаки почвы. Кроме того, около 50% пахотных земель в зоне чернозёмов, являющихся лучшими почвами по своим агрономическим свойствам, подвержено процессами эрозийной деградации.

**Результаты и их обсуждение**

Полевые эксперименты были проведены в 2023 году. Климатические характеристики по местам высева льна в 2023 году представлены в таблице 1.

Таблица 1

Климатические характеристики в местах культивации льна в 2023 году.

Регион	Среднесуточная температура			Количество дождливых дней			Летние осадки (% от среднегодового за летний период)
	июнь	июль	август	июнь	июль	август	
Саратовская обл.	20,6	22,2	20,0	3	5	9	72,0
Тверская обл.	17,5	18,5	17,1	14	8	11	114,4

В качестве сельскохозяйственной культуры для тестирования был использован лён-долгунец сорта Универсал. Предпосевная обработка семенного материала проведена по методике [11]. Посев льна осуществляли в первой - второй декадах мая на опытных участках площадью по 16 м<sup>2</sup>. Способ высева – узкорядный, с междурядьями 7,5 см. Глубина заделки семян составляла 4 ÷ 5 см. В качестве параметров урожайности льна использовались следующие характеристики: масса полученной соломы, содержание целлюлозы в биоматериале. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика урожайности льна-долгунца на опытных участках, 2023 год

Регион	Время посева	Период вегетации, дней	Средняя урожайность соломы, кг/м <sup>2</sup>	Содержание целлюлозы в биомассе, % масс.
Саратовская обл.	4 мая	61	2,74	24,7
Тверская обл.	12 мая	74	2,70	23,9

Представленные результаты указывают на возможность получения практически идентичных показателей урожайности при возделывании льна в условиях использования малопродуктивных почв и неблагоприятных погодных влияний. Полученная в результате полевых опытов солома льна была использована для отработки технологии выделения целлюлозы с целью выявления наиболее приемлемого с экологической точки зрения метода. Для сравнения привлекали наиболее распространённую в промышленном масштабе технологию бисульфитной переработки, а также альтернативный вариант – пероксидно-щелочной процесс. Переработку соломы льна производили на специальной опытной установке, предназначенной для переработки растительного сырья, при температуре 95±0.4°С в течение 2 часов. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Составы для извлечения целлюлозы и полученные результаты

Исходный материал	Содержание компонентов в технологическом растворе, % масс.				Содержание компонентов в выделенных твёрдых образцах, % масс.			
	Гидроксид натрия	Бисульфит натрия	Пероксид водорода	Вода	Целлюлоза	Лигнин	Влага	Прочие примеси
Лён Тверской обл.	-	15,0	-	85,0	79,8	5,4	5,2	9,6
	10,0	-	10,0	80,0	77,4	7,8	5,0	9,8
Лён Саратовской обл.	-	15,0	-	85,0	76,9	5,5	5,7	11,9
	10,0	-	10,0	80,0	77,1	7,4	5,4	10,1

Таким образом, показана возможность и высокая эффективность извлечения целлюлозы из соломы льна-долгунца с применением каждого из апробированных - бисульфитного и пероксидно-щелочного технологических методов. Сточные воды, образовавшиеся при

реализации бисульфитного метода, загрязнённые серосодержащими соединениями, имеют состав, представленный в таблице 4.

Таблица 4

Состав сточных вод опытной установки переработки биоматериала						
Содержание серных примесей в сточных водах бисульфитного метода, мг/л						
Серосодержащие высокомолекулярные соединения		Серосодержащие ионы солей		Сероорганические соединения		
смолы	полимеры	сульфиты	другие	тиоалканы	тиоспирты	другие
30-70	120-140	440-490	30-45	10-15	70-90	20-60

Для очистки сточных вод от серосодержащих примесей, образующихся при реализации бисульфитного метода переработки растительного сырья, могут быть рекомендованы методы каталитической [12, 13] или сорбционной [14] очистки с применением сорбирующего материала на основе оксида кремния [15]. Результаты очистки представлены на рис. 1.

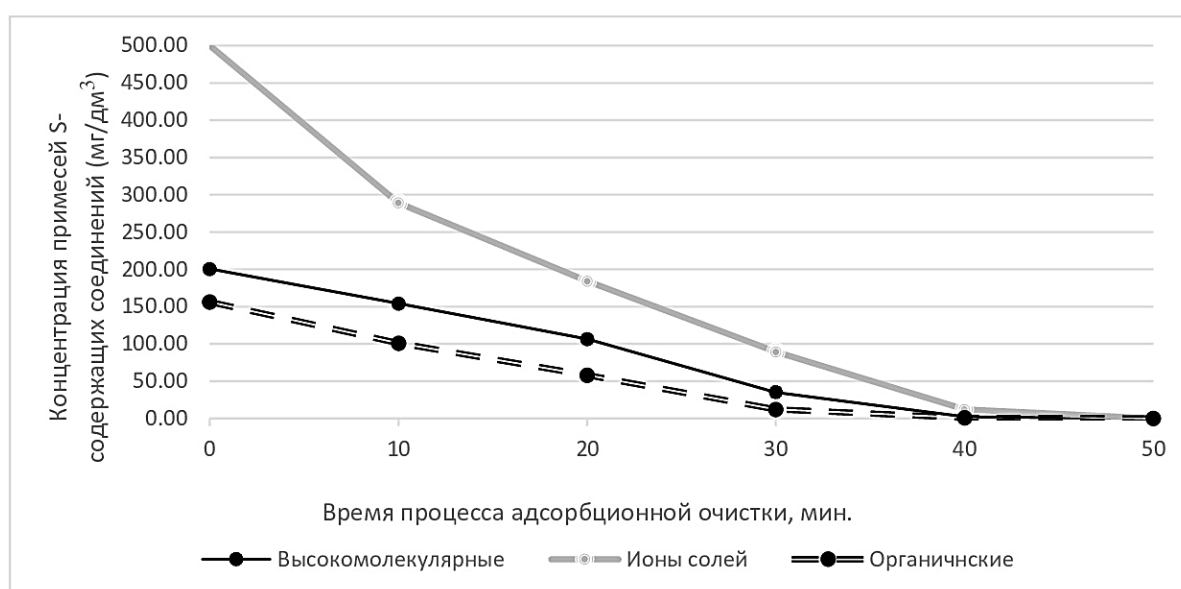


Рисунок 1. Динамика удаления примесей серосодержащих соединений из сточных вод производства переработки растительного сырья

Таким образом, показано, что при реализации бисульфитного метода выделения целлюлозы требуется проведение дополнительной очистки сточных вод от соединений серы. На этом основании может быть рекомендовано внедрение пероксидно-щелочного, экологически более целесообразного метода переработки растительного сырья.

### Заключение.

Проведены исследования, целью которых являлась оценка возможности реализации современных природоохранных технологий для обеспечения экологической безопасности региона Большого Алтая. Показано, что для обеспечения сохранности лесных ресурсов, целесообразно осуществить замену древесины в производстве целлюлозы на ежегодно возобновляемый ресурс — биоматериалы, образующиеся в значительных количествах в сельскохозяйственном производстве и не находящие полезного применения.

Рассмотренные варианты травяного сырья на основе мискантуса и льна показали, что наиболее предпочтительным является лён, при переработке которого образуется значительное количество соломы. Проведены полевые эксперименты по выращиванию льна-долгунца сорта Универсал в регионах с низкопродуктивными типами почв в условиях влияния неблагоприятных климатических воздействий и показана высокая устойчивость сортаобразца.

Полученная в результате проведения полевых опытов солома льна-долгунца перерабатывалась на технологической установке с применением бисульфитного и пероксидно-

щелочного методов; полученные результаты указывают на идентичность задействованных способов выделения целлюлозы из травяного сырья. При реализации программ экологической безопасности, предпочтение целесообразно отдать пероксидно-щелочному методу, внедрение которого способствует уменьшению образования опасных производственных отходов.

### Библиографический список

1. Будаева В.В., Скиба Е.А. и др. Химическая и биотехнологическая переработка недревесного сырья в высокостойкие продукты // *Фундаментальные исследования и практические разработки в области технической химии*. Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021. С. 220–226.
2. Крупин В.И., Демьяновская Н.В., Кудряшов В.Н. Солома – сырьё для бумажной промышленности // *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 2010. № 3. С. 50–51.
3. Барнашова Е.К., Вертикова Е.А. и др. Оценка перспектив использования льна долгунца в качестве источника для получения целлюлозы: технология и экологические проблемы // *Тезисы докладов XIII Международной научной конференции «Химия и технология растительных веществ»*. Сыктывкар. 2024. С. 25.
4. Ужахова Л.Я., Арчакова Р.Д., Китиева Л.И. Исследование свойств целлюлозы из травянистых растений // *Endless Light in Science*. 2022. № 6. С. 424–427.
5. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. Complete characterization of wheat straw // *BioResources*. 2011. Vol. 6. № 1. P. 154–177.
6. Симагин А.Д. Симагина А.С. и др. Биоресурсная коллекция льна кафедры генетики, селекции и семеноводства ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева // *Материалы 7-й Международной конференции: «Генофонд и селекция растений»*, Новосибирск: ИЦиГ СО РАН, 2024. С. 314–316.
7. Степанова Н.В. Возделывание льна масличного на семена и волокно. Минск: Издательский дом “Белорусская наука”. 2021. 136 с.
8. Миневич И.Э., Ущиповский И. В. Изучение целлюлозы, полученной из вторичного сырья лубяных культур, в качестве потенциального источника для различных отраслей индустрии // *Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал*. 2023. Т. 3. № 3 (9). С. 49–58.
9. Brosse N., Dufour A. et. al. Miscanthus: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production // *Biofuels, Bioprod., Bioref.* 2012. V. 6. I. 5. P. 580–598.
10. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Золотухин В.Н. Получение целлюлозы из мискантуса и соломы льна-межеумка азотнокислым и комбинированным способами // *Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции*. Бийск: Бийский технологический институт. 2013. С. 270–274.
11. Будник М.И., Сергеев С.Н. и др. Новый научно-методический подход к экологической обработке семян льна, повышающей всхожесть и предотвращающей слипание посевного материала // *Актуальные вопросы биологической физики и химии. «БФФХ – 2023»*: Материалы XVIII международной научной конференции, Севастополь. 2023. С. 116–117.
12. Тараскин К.А., Козырева А.В. и др. Каталитическая очистка сточных вод производства композиционных материалов от примесей сераорганических соединений. Часть 1 // *Водоочистка*. 2022. № 3. С. 16–23.
13. Тараскин К.А., Козырева, А.В. и др. Экспериментальная отработка технологии каталитической очистки производственных сточных вод, содержащих сераорганические соединения. Часть 2 // *Водоочистка*. 2022. № 4. С. 18–27.
14. Тараскин К.А., Орлов Д.С. и др. Адсорбционная очистка сточных вод производства шумоизолирующих композитных материалов от серосодержащих соединений // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2021. № 5 (161). С. 32–38.
15. Тараскин К.А., Орлов Д.С. и др. Перспективные направления использования сорбентов на основе оксида кремния в технологии очистки сточных вод производства композиционных материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2023. № 12. С. 10–18.