

Научная статья
УДК 504.054+631.45

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЧВОГРУНТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОСАДКОВ ШЛАМ-ЛИГНИНА (ОТХОДОВ БАЙКАЛЬСКОГО ЦБК) НА ВЫСШИЕ РАСТЕНИЯ

© СС ВУ Шатрова А. С.¹, Богданов А. В.²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: shatrova.irk@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8054-1680

² Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: bogdanovav@istu.edu; ORCID: 0000-0002-7519-1126

Поступила в редакцию 12.10.2024

После доработки 18.12.2024

Принята к публикации 05.02.2025

Аннотация

Цель. Оценка воздействия почвогрунтов из лигнинсодержащих коллоидных осадков ОАО «Байкальский ЦБК» на высшие сосудистые растения — редька масличная, овёс посевной, плодово-ягодные культуры (малина и клубника), а также оценка динамики рекультивационной сукцессии при её интенсификации вымороженными лигнинсодержащими осадками и полученными из них почвогрунтами.

Процедура и методы. Проведены исследования воздействия почвогрунтов из вымороженных лигнинсодержащих осадков ОАО «Байкальский ЦБК» на высшие сосудистые растения. Вымороженные лигнинсодержащие осадки образуются в ходе реализации природоподобной технологии их переработки посредством интенсификации естественных процессов вымораживания и осушения. В работе представлена оценка как острой, так и хронической фитотоксичности. Для оценки возможности использования полученного субстрата в выращивании сельскохозяйственной продукции было изучено содержание тяжёлых металлов — кадмия, ртути, меди, цинка и мышьяка в ягодах клубники и малины, выращенных на опытных делянках, сформированных на Солзанском полигоне ОАО «Байкальский ЦБК». Для оценки эффективности применения полученных субстратов из лигнинсодержащих осадков при рекультивации нарушенных земель проведена оценка динамики рекультивационной сукцессии. В период с 2019 по 2024 г. осуществлены исследования по изменению химического и агрохимического состава отвалов изучаемых лигнинсодержащих осадков, а также почвогрунтов на их основе.

Результаты. Проведённая оценка воздействия почвогрунтов из лигнинсодержащих осадков на высшие растения выявила отсутствие как острой, так и хронической токсичности. Было выявлено, что полученный субстрат интенсифицирует активный рост и развитие растений, вследствие наличия в своём составе питательных компонентов (калия, фосфора, азота). Элементный анализ ягод плодово-ягодных культур, выращенных на полученном почвогрунте, не выявил превышения нормативов по кадмию, ртути, меди, цинку и мышьяку.

Теоретическая и/или практическая значимость. Разработанная природоподобная технология получения почвогрунтов из лигнинсодержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности может быть успешно внедрена при ликвидации накопленного экологического вреда ОАО «Байкальский ЦБК».

Ключевые слова: рекультивационная сукцессия, фитотоксичность, промышленные отходы, природоподобные технологии, Байкальский регион

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-53-66

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SOILS OBTAINED FROM SLUDGE-LIGNIN SEDIMENTS (WASTE FROM THE BAIKAL PULP AND PAPER MILL) ON HIGHER PLANTS

© CC BY A. Shatrova, A. Bogdanov

¹*Irkutsk National Research Technical University*

Irkutsk, Russian Federation

e-mail: shatrova.irk@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8054-1680

²*Irkutsk National Research Technical University*

Irkutsk, Russian Federation

e-mail: bogdanovav@istu.edu; ORCID: 0000-0002-7519-1126

Received 12.10.2024

Revised 18.12.2024

Accepted 05.02.2025

Abstract

Aim. Evaluation of the impact of soils from lignin-containing colloidal sediments of Baikal Pulp and Paper Mill on higher vascular plants — oil radish, oats, fruit and berry crops (raspberries and strawberries), as well as an assessment of the dynamics of reclamation succession during its intensification by frozen lignin-containing sediments and soils obtained from them.

Methodology. The impact of soils from frozen lignin-containing sediments of Baikal Pulp and Paper Mill on higher vascular plants has been studied. Freezed lignin-containing sediments are formed during the implementation of a nature-like technology for their processing by intensifying the natural processes of freezing and drainage. The paper presents an assessment of both acute and chronic phytotoxicity. To assess the possibility of using the obtained substrate in growing agricultural products, the content of heavy metals — cadmium, mercury, copper, zinc and arsenic — in strawberries and raspberries grown on experimental plots formed at the Solzansky landfill of Baikal Pulp and Paper Mill was studied. To assess the effectiveness of using the obtained substrates from lignin-containing sediments in the reclamation of disturbed lands, an assessment of the dynamics of reclamation succession was carried out. In the period from 2019 to 2024. Research was carried out to change the chemical and agrochemical composition of the waste heaps of the studied lignin-containing sediments, as well as the soils based on them.

Results. The assessment conducted of the impact of soils from lignin-containing sediments on higher plants revealed the absence of both acute and chronic toxicity. It was found that the substrate obtained intensifies active growth and development of plants due to the presence of nutritious components (potassium, phosphorus, nitrogen) in its composition. Elemental analysis of berries of fruit and berry crops grown on the obtained soil did not reveal excess of standards for cadmium, mercury, copper, zinc and arsenic.

Research implications. The developed nature-like technology for obtaining soils from lignin-containing sediments of the pulp and paper industry can be successfully implemented in the elimination of accumulated environmental damage at Baikal Pulp and Paper Mill.

Keywords: reclamation succession, phytotoxicity, industrial waste, nature-like technologies, Baikal region

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-53-66

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых экологических проблем в Российской Федерации является стремительный рост образования отходов. Согласно данным Росприроднадзора¹ в 2023 г.

образовалось 9,279 млрд тонн отходов, что на 3% больше, чем в 2022 г. (9,017 млрд тонн), при этом 98% из общей массы составляют отходы промышленности. Утилизировано в 2023 г. 3,946 млрд тонн отходов, что составляет менее 50% образовавшихся отходов, тогда

¹ Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производ-

ства и потребления // Росприроднадзор: [сайт]. URL: <https://clck.ru/3Mm2mL/> (дата обращения: 03.12.2024).

как размещено на специальных площадках (хранение, захоронение) порядка 60% всех образовавшихся за год отходов. При этом Иркутская область входит в десятку субъектов РФ по объёму образованных отходов за 2023 г. и находится на 7-м месте по темпам прироста их образования — прирост за год составил 306,3 млн тонн. Также стоит отметить, что на конец 2023 г. в Иркутской области накоплено более 1,8 млрд тонн отходов производства и потребления.

Одной из самых актуальных экологических задач Иркутской области и, в частности, Байкальского региона, по-прежнему остаётся утилизация отходов и устранение нанесённого ранее вреда окружающей среде вследствие деятельности ОАО «Байкальский ЦБК». Осадки шлам-лигнина объёмом более 6 млн м³ [7], накопленные в период работы комбината располагаются на Солзанской промплощадке и являются потенциальной социально-экологической угрозой для всего Южного Прибайкалья и оз. Байкал (рис. 1–2).

Начиная с 2013 г. и по настоящее время, в рамках Нацпроекта «Экология» (1 октября 2018 — 31 декабря 2024 гг.) ведётся поиск решений этой проблемы. При этом уже сменено 3 исполнителя работ — это ВЭБ-Инжиниринг,

АО «Росгеология», ООО «ГазЭнергоСтрой», а в настоящее время единственным исполнителем назначен ФГУП «Федеральный экологический оператор» (Росатом). Ввиду своей специфичности и больших объёмов накопленных отходов, комплексная концепция их ликвидации так и не была разработана. Учитывая специфику объекта, необходим поиск альтернативных технологий, которые могли бы позволить переработать многотоннажные отходы без использования дорогостоящих и импортных средств. В настоящее время уделяется особое внимание концепции природоподобных технологий [2], а в 2023 г. президент России подписал указ от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации».

В ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» на кафедре обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды имени С. Б. Леонова ведутся камеральные и полевые исследования по разработке комплексной природоподобной технологии переработки коллоидных лигнин-содержащих осадков целлюлозно-бумажной промышленности. Природоподобная технология основана на создании условий интенсификации протекания природных процессов в холодный и тёплый периоды времени года [7].



Рис. 1 / Fig. 1. Солзанская промплощадка ОАО «Байкальский ЦБК», карты-накопители № 1–7 / Solzan industrial site of “Baikal Pulp and Paper Mill”, storage maps no. 1–7

Источник: Геотехпроект: [сайт]. URL: <https://geotehproekt.ru/> (дата обращения: 20.07.2024).



Рис. 2 / Fig. 2. Космический снимок Солзанской промплощадки БЦБК, на которой расположены карты-накопители № 1–10 / Satellite image of the Solzanskaya industrial site of the BPPM, on which storage cards no. 1–10 are assigned

Источник: космоснимки Google

Вымораживание в холодный период основано на кристаллизации воды из гидрофильного коллоидного осадка и золя при воздействии устойчивых отрицательных температур с последующей коагуляцией лигнинных веществ, образующих крупные устойчивые мицеллы [18]. В процессе оттаивания в тёплом периоде времени года происходит отделение свободной влаги от осадка, который становится фильтрующим слоем, вследствие чего мелкодисперсные частицы удерживаются внутри его слоя [11]. Технологический цикл представленной технологии состоит из 5 основных этапов [7]:

1. осушение карт-накопителей в тёплый период времени года;
2. вымораживание осадков в холодное время года посредством прокладки траншей¹;

3. подсушивание и отвод талых вод в тёплый период времени года;
4. повторное вымораживание, только траншеи выбираются на месте ранее складированного осадка;
5. рекультивационная сукцессия отвалов вымороженных осадков или их использование в качестве почвогрунтов и удобрений.

В период 2019–2024 гг. ФГБОУ ВО «ИРНИ-ТУ» был организован ряд натурных и опытно-промышленных испытаний (рис. 3–4), в ходе которых было подтверждено, что разработанная технология позволяет уменьшить объём и влажность осадков до 40% и 60% соответственно, а также снизить класс опасности отходов до V (практически неопасные отходы). При осуществлении разработанной природоподобной технологии можно получать субстрат, отвечающий требованиям нормативных документов, регламентирующих использование осадков очистных сооружений в качестве сырья для рекультивации нарушен-

¹ Патент № 2717520 С1 Российская Федерация, МПК C02F 11/20, C02F 103/28. Способ вымораживания коллоидных осадков шлам-лигнина посредством прокладки траншей: № 2019129421: заявл. 17.09.2019; опубл. 23.03.2020 / А. В. Богданов, О. В. Алексеева, А. С. Шатрова [и др.].



Рис. 3 / Fig. 3. Планировка площадки вымораживания осадка на Солзанской промплощадке ОАО «Байкальский ЦБК», февраль 2019 г. / Layout of the sludge freezing site at the Solzan industrial site of Baikal Pulp and Paper Mill, February 2019

Источник: фото авторов



Рис. 4 / Fig. 4. Формирование опытных делян почвогрунта, полученного из вымороженных лигнинсодержащих осадков на Солзанской промплощадке ОАО «Байкальский ЦБК», май 2019 г. / Formation of experimental plots of soil obtained from frozen lignin-containing sediments at the Solzan industrial site of Baikal Pulp and Paper Mill, May 2019

Источник: фото авторов

ных земель и удобрений (ГОСТ 54534-2011¹, ГОСТ Р 54651-2011²) [7].

Однако, несмотря на соответствие полученного в результате реализации разработанной природоподобной технологии почвогрунта требованиям ГОСТ 54534-2011, ГОСТ Р 54651-2011, важно дать оценку его фактического воздействия на рост и развитие высших растений.

ПРИРОДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СОЛЗАНСКОГО ПОЛИГОНА ОАО «БАЙКАЛЬСКИЙ ЦБК»

Климатические условия района расположения карт-накопителей Солзанского полигона ОАО «Байкальский ЦБК» относительно мягкие [6], что обусловлено влиянием водных масс озера Байкал.

Солзанская промплощадка располагается в пределах аллювиальной предгорной впадины, образованной конусам выноса рек и состоящей из аллювиальных, аллювиально-пролювиальных и селевых осадков четвертичного и неоген-четвертичного возраста. Мощность рыхлых отложений — от первых десятков до сотен метров. Южнее полигона впадина переходит в отроги хр. Хамар-Дабан, сложенного архейскими метаморфическими образованиями.

В геологическом строении данной территории в пределах глубин до 30 м принимают участие сверху вниз: техногенные грунты, отсыпанные галечниковыми грунтами с песчаным и супесчаным заполнителем и аллювиальные отложения, песок гравелистый малой степени водонасыщения средней плотности, валунный грунт. Вечномерзлые грунты до глубины 30 м не встречены [1].

Стоит отметить, что Солзанский полигон находится в сейсмоактивной области Байкальской рифтовой зоны (юг оз. Байкал) с расчётной величиной возможных землетрясений — от 10 до 11 баллов по 12-балльной шкале.

¹ ГОСТ 54534-2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. Введ. 2013-01-01. М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.

² ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. Введ. 2013-01-01. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОЙ И ХРОНИЧЕСКОЙ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ВЫМОРОЖЕННЫХ ЛИГНИНСОДЕРЖАЩИХ ОСАДКОВ ШЛАМ-ЛИГНИНА, А ТАКЖЕ ПОЛУЧЕННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ ПОЧВОГРУНТОВ

Исследование острой фитотоксичности вымороженных лигнинсодержащих осадков шлам-лигнина, а также почвогрунтов на их основе в отношении высших растений осуществлялось согласно МР 2.1.7.2297—07 «Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности».

Для проведения исследований был выбран тест-объект, непосредственно рекомендованный в МР 2.1.7.2297—07 — овёс посевной (лат. *Avena sativa*). Для того, чтобы оценить наличие острой фитотоксичности рассматривалось биологическое воздействие водной вытяжки из исследуемых образцов. Водная вытяжка готовилась следующим образом: 10 г образца заливалось дистиллированной водой до 100 мл, затем полученная масса встряхивалась 24 часа. Далее фильтровальную бумагу помещали в чашки Петри и выкладывали 25 семян используемого тест-объекта, затем в чашки приливалось 5 мл тестируемой профильтрованной водной вытяжки. Пробы термостатировались 7 суток, после чего замерялась длина корней каждого проростка в пробках.

В таблице 1 приведены результаты исследований острой фитотоксичности в вымороженных лигнинсодержащих осадках и почвогрунтах на их основе согласно МР 2.1.7.2297—07.

Как видно из таблицы, подверженные воздействию отрицательных температур лигнинсодержащие осадки и почвогрунт на их основе не обладают острым токсическим действием, поскольку фитотоксический эффект составляет менее 20%. Также установлено, что полученный почвогрунт стимулирует рост овса посевного.

Исследование хронической фитотоксичности вымороженных лигнинсодержащих осадков шлам-лигнина и получаемых из них почвогрунтов осуществлялось согласно ГОСТ Р ИСО 22030—2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений».

ГОСТ Р ИСО 22030—2009 позволяет оценить качество почв и грунтов разнообразного состава, в который могут входить неизвестные

Таблица 1 / Table 1

Оценка острой фитотоксичности исследуемых образцов в отношении *Avena sativa* / Evaluation of acute phytotoxicity of the studied samples in relation to *Avena sativa*

№ семян	Длина корней проростков, мм		
	Дистиллированная вода	Вымороженные лигнинсодержащие осадки	Полученный почвогрунт
1	10,8	12,0	14,4
2	11,2	11,7	11,8
3	10,7	10,2	15,3
4	12,3	14,5	10,7
5	11,4	13,6	13,5
6	13,5	10,1	12,1
7	14,5	10,0	14,1
8	12,8	8,4	14,7
9	15,1	7,9	14,0
10	13,4	13,3	12,1
11	14,6	12,4	13,5
12	11,3	7,9	9,8
13	13,5	12,5	11,7
14	10,7	11,3	15,1
15	11,8	14,4	12,9
16	14,4	13,1	14,3
17	12,7	10,5	13,5
18	10,1	12,2	12,8
19	10,1	14,4	11,7
20	13,7	13,2	14,4
21	13,5	11,3	11,7
22	14,2	12,5	13,7
23	12,1	14,4	12,5
24	11,3	11,7	13,1
25	0,0	0,0	14,8
Средняя длина корней, мм	12,0	11,3	13,1
Отклонение от контроля (дистиллированная вода) – фитоэффект (ЕТ), %	-	5	-9,2

Источник: данные авторов (по результатам лабораторных исследований)

загрязнители. В ГОСТ Р ИСО 22030–2009 предлагается использование редьки масличной (лат. *Brassica rapa CrGC syn. Rbr*) и овса посевного (лат. *Avena sativa*). Редька масличная – однолетнее растение, которое применяют в качестве сидерата [5], а также для борьбы с вредителями и сорняками [13]. Овёс посевной – злаковое растение, которое неприхотливо классифицируется как солеустойчивое растение и считается одним из растений-фиторемедиантов для улучшения засоленных почв [16].

В ходе эксперимента тест-объекты высаживали в пластиковые контейнеры в количестве 10 семян и через 2 недели в каждом контейнере оставляли по 4 растения (табл. 2). Контейнеры помещались в термостат с контролируемой температурой и освещением, при необходимости образцы увлажнялись дистиллированной водой. В качестве контроля была взята фоновая проба почвы, отобранная возле территории Солзанской промплощадки ОАО «Байкальский ЦБК», на которую не влияли техногенные факторы.

Таблица 2 / Table 2

Оценка хронической фитотоксичности исследуемых образцов в отношении *Avena sativa* и *Brassica rapa* / Evaluation of chronic phytotoxicity of the studied samples in relation to *Avena sativa* and *Brassica rapa*

Параметры оценки хронической токсичности	Фоновая проба		Полученный почвогрунт		Вымороженные лигнинсодержащие осадки	
	<i>Avena sativa</i>	<i>Brassica rapa</i>	<i>Avena sativa</i>	<i>Brassica rapa</i>	<i>Avena sativa</i>	<i>Brassica rapa</i>
Количество проросших семян, шт	10	9	10	9	10	9
Количество живых растений на 14-й день, шт	9	8	10	9	9	8
Средняя длина побега на 14-й день (на 1 растение), см	18,1	14,6	26,5	17,1	21,7	15,4
Средняя сырая масса растений на 14-й день (на 1 растение), г	0,22	0,26	0,29	0,38	0,24	0,31
Средняя сухая масса растений в конце опыта (на 1 растение), г	0,057	0,073	0,10	0,11	0,079	0,093
Среднее количество цветков в конце опыта (на 1 растение), шт	34	14	42	24	38	16

Источник: данные авторов (по результатам лабораторных исследований)

Как видно, вымороженные осадки шлам-лигнина и полученный из них почвогрунт не обладают острой токсичностью¹, т. к. гибель овса посевного и редьки масличной не превышает 20% по сравнению с фоновой пробой. При этом в образцах полученного почвогрунта наблюдается прирост биомассы и увеличение длины побегов на 14-е сутки в 1,5 и 1,2 раза выше фоновой пробы почвы по *Avena sativa* и *Brassica rapa* соответственно. Полученный почвогрунт также способствует активному размножению тест-растений — среднее количество цветков на конец опыта показало их увеличение в 1,2 (*Avena sativa*) и 1,8 (*Brassica rapa*) раз по отношению к фоновой пробе. Данный эффект объясняется более бедным составом фоновой пробы почвы на питательные элементы по сравнению с полученным почвогрунтом. При этом подверженные воздействию отрицательных температур деструктированные лигнинсодержащие осадки не проявляют хроническую токсичность, т. к. за весь период проведения исследования (52 дня) угнетения роста и развития растений не выявлено.

¹ Под острой токсичностью в данном случае понимается способность химических веществ за короткий промежуток времени оказывать негативное воздействие на растения и вызывать их повреждение или гибель более чем на 20% по сравнению с контрольным образцом.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫМОРОЖЕННЫХ ЛИГНИНСОДЕРЖАЩИХ ОСАДКОВ ШЛАМ-ЛИГНИНА, А ТАКЖЕ ПОЛУЧЕННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ ПОЧВОГРУНТОВ НА ПЛОДОВО-ЯГОДНЫЕ КУЛЬТУРЫ

Исследования проводились следующим путём: на опытных делянках почвогрунта, сформированных на Солзанском полигоне ОАО «Байкальский ЦБК» были высажены плодово-ягодные культуры.

Выбор плодово-ягодных культур был обусловлен тем, что малина является одной из самых адаптивных кустарных культур, которые устойчивы к негативным условиям окружающей среды [15], а также не требует особого ухода. Выбор клубники обусловлен климатическими особенностями региона «холодных тропиков», которые позволяют выращивать и собирать её богатые урожаи. Поэтому клубника является популярной плодово-ягодной культурой для этого региона. Так, уже более 10 лет в городе ежегодно проходит региональный фестиваль клубники «Виктория» [3].

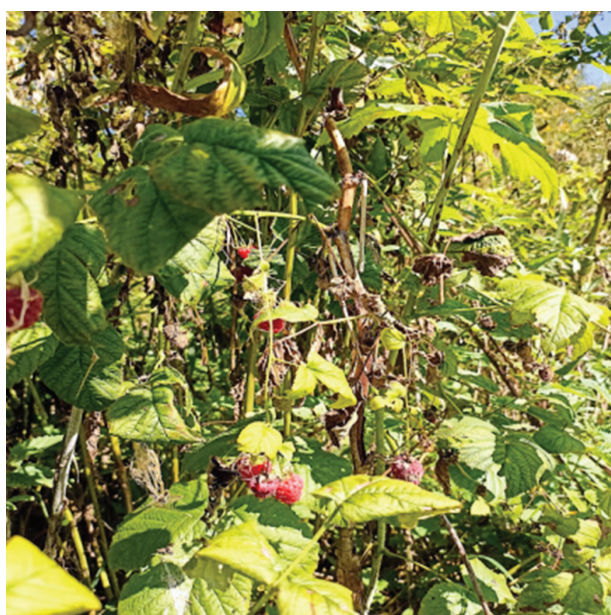
В ходе эксперимента проводилась визуальная оценка состояния высаженных культур, также был проведён элементный анализ отобранных образцов плодов малины и клубники на содержание тяжёлых металлов и мышьяка методом спектрометрии с индуктивно-связ-

занной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98). Особое внимание уделялось тяжёлым металлам (кадмию, ртути, меди, цинку) и мышьяку, т. к. их высокие концентрации ведут к различным морфологическим нарушениям и даже могут вызвать гибель растений [10; 14; 17].

Визуальная оценка воздействия вымороженных лигнинсодержащих осадков шлам-лигнина и полученных из них почвогрунтов на плодово-ягодные культуры (клубнику, малину) за период 2019–2024 гг. показала активное зарастание почвогрунта кустами малины (рис. 5). При этом визуально растения не имели физиологических отклонений.

В таблице 3 представлены результаты количественного химического анализа образцов плодов малины и клубники на содержание в них тяжёлых металлов (кадмия, ртути, меди, цинка) и мышьяка. В качестве нормативных концентраций были приняты значения, указанные в СанПиН 42-123-4089-86 «Предельно допустимые концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах».

Согласно данным концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в ягодах малины и клубники, которые выращены на изучаемом субстрате, не превышают предельно-допустимые концентрации.



А. Август 2022 г.



Б. Октябрь 2023 г.

Рис. 5 / Fig. 5. Малина, высаженная на опытной деляне в 2022 и 2023 гг. / Raspberries planted in an experimental plot in 2022 and 2023

Источник: фото авторов

Таблица 3 / Table 3

Тяжёлые металлы и мышьяк в ягодах культур, выращенных на исследуемом почвогрунте / Heavy metals and arsenic in berries of crops grown on the studied soil

Компонент	Клубника	Малина	Предельно-допустимые концентрации, мг/кг
Cd, мг/кг	0,008	0,01	0,03
As, мг/кг	0,05	0,09	0,2
Hg, мг/кг	0,005	0,008	0,02
Cu, мг/кг	0,9	2,1	5,0
Zn, мг/кг	3,6	6,2	10,0

Источник: данные авторов (результаты лабораторных исследований) и СанПиН 42-123-4089-86 «Предельно допустимые концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах». М.: Министерство здравоохранения СССР, 1986. 22 с.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РЕКУЛЬТИВАЦИОННОЙ СУКЦЕССИИ ПРИ ЕЁ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЫМОРОЖЕННЫМИ ЛИГНИНСОДЕРЖАЩИМИ ОСАДКАМИ И ПОЛУЧЕННЫМИ ИЗ НИХ ПОЧВОГРУНТАМИ

Опытно-промышленные испытания по проведению рекультивационной сукцессии берут своё начало в 2019 г. Тогда были сформированы деляны с почвогрунтом, полученным из вымороженных лигнинсодержащих осадков вблизи карты-накопителя № 2 Солзанской промплощадки ОАО «Байкальский ЦБК». На деляне были высажены растения-сидераты: фацелия (лат. *Phacelia*), овёс посевной (лат. *Avena sativa*) и горчица (лат. *Sinapis*).

С 2019 по 2024 г. проводилась оценка эффективности протекания процессов самозаращения на отвалах вымороженных лигнинсодержащих осадков и почвогрунтах в естественных для Южного Прибайкалья климатических условиях [9]. Проводилась визуальная оценка изменения биоразнообразия высших растений, а также изучался агрохимический и химический состав исследуемых образцов в каждый вегетативный период. В качестве интегрального показателя уровня воздействия

исследуемых образцов на живые организмы определялся их класс опасности посредством проведения биотестирования с применением культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) и дафний *Daphnia magna* Straus. Все исследования проводились в аккредитованной лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» (РОСС RU.0001.518897).

Визуальное обследование экспериментальной площадки показало, что в течение 6 вегетационных периодов (2019–2024 гг.) протекают активные процессы самозаращения с увеличением видового разнообразия высших растений [7; 9]. В полученном почвогрунте по сравнению с исходными отвалами вымороженных лигнинсодержащих осадков самозаращение проходит более интенсивно, что связано с большим количеством питательных биогенных веществ – калия, фосфора и азота (табл. 4), а также с высадкой в почвогрунт сидератов, улучшающих структуру почвы и угнетающих рост сорняков [8; 12].

В таблице 4 представлены основные токсичные компоненты, входящие в состав исследуемых образцов (тяжёлые металлы и мышьяк), а также основные агрохимические показатели в 2019, 2021 и 2024 гг.

Таблица 4 / Table 4

Основные химические и агрохимические показатели отвалов вымороженных лигнинсодержащих осадков и полученного почвогрунта в 2019, 2021 и 2024 гг. / Main chemical and agrochemical indicators of frozen lignin-containing sediment dumps and obtained soil in 2019, 2021 and 2024

Показатели	Отвалы вымороженных лигнинсодержащих осадков			Полученный почвогрунт		
	2019	2021	2024	2019	2021	2024
Никель валовый, мг/кг	15,2	63	65	15,4	68	79
Медь валовая, мг/кг	54	144	152	74	181	172
Цинк валовый, мг/кг	61	154	171	191	263	271
Свинец валовый, мг/кг	5,2	29	28	9,8	49	46
Мышьяк валовый, мг/кг	1,6	16	15	1,2	13	12
Ртуть валовая, мг/кг	1,3	0,8	0,7	1,0	0,6	0,5
K ₂ O подвижный, мг/кг	187	145	184	363	54,2	62,1
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	80,4	96,3	120	157	488	476
Водородный показатель солевой вытяжки	6,1	5,9	6,4	5,9	5,8	5,6
Водородный показатель водной вытяжки	7,0	6,5	7,2	6,0	6,5	6,9
Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	2,25	1,34	1,23	3,96	1,50	1,37
Органическое вещество, %	47,4	44,2	43,8	35,8	31,4	30,9
Азот общий, %	2,4	1,5	1,2	2,5	1,4	1,4
Класс опасности	IV	IV	V	IV	V	V

Источник: данные авторов (результаты лабораторных исследований)

Как видно из таблицы, с 2019 по 2021 гг. в исследуемых образцах происходило увеличение содержания тяжёлых металлов, что может быть связано с изменением соотношения органической и минеральной части образцов — массовая доля органического вещества и азота снизилась из-за их активного потребления растениями в первые 2 года протекания сукцессии. С 2021 по 2024 г. наблюдается стабилизация содержания тяжёлых металлов, т. к. снижения количества органической части не происходит вследствие её привнесения в качестве свежих отмерших растительных остатков. При этом в субстрате, полученном из лигнинсодержащих осадков, происходит более

резкое снижение органического вещества и питательных элементов по сравнению с отвалами лигнинсодержащих осадков. Это может быть связано с более активным поглощением растениями веществ, необходимых для их роста и развития, т. к. изначально исследуемые почвогрунты имели большее видовое разнообразие фитоценоза. Однако в 2021 г. фиксируется увеличение содержания массовой доли подвижного фосфора, что может говорить о его поступлении от перегнивших ранее растений, но низким его потреблении.

На рисунке 6 представлены отвалы вымороженных осадков шлам-лигнина в разные годы.



А. 2019 г.



Б. 2023 г.



В. 2024 г.

Рис. 6 / Fig. 6. Отвалы вымороженных лигнинсодержащих осадков в 2019, 2023 и 2024 гг. / Dumps of frozen lignin-containing sludge in 2019, 2023 and 2024

Источник: фото авторов

В течение 5 лет сукцессии (рис. 6) произошёл переход от безжизненного субстрата до многолетних растений, в т. ч. деревьев первой генерации, которые представлены тополем душистым (лат. *Populus suaveolens*) и берёзой повислой (бородавчатой) (лат. *Bétula péndula*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования (оценка острой и хронической фитотоксичности, влияние на плодово-ягодные культуры, оценка динамики рекультивационной сукцессии) показали, что лигнинсодержащие осадки ОАО «Байкальский ЦБК» и почвогрунты на их основе не обладают острым и хроническим токсическим действием в отношении высших сосудистых растений, а также способствуют увеличению их биомассы вследствие наличия питательных элементов (калия, фосфора, азота). При этом элементный состав ягод малины и клубники свидетельствует о том, что применение почвогрунтов из вымороженных лигнинсодержащих осадков не приводит к аккумуляции тяжёлых металлов в плодах ягодных культур.

Визуальная оценка динамики рекультивационной сукцессии показала, что в почвогрунтах из лигнинсодержащих осадков процессы самозарастания происходит активнее, чем в отвалах вымороженных осадков шлам-лигнина. Однако во всех исследуемых образцах наблюдается интенсификация самозарастания. За 6 вегетационных периодов (2019–2024 гг.) произошла стабилизация агрохимических характеристик отвалов вымороженных лигнинсодержащих осадков и полученного из них почвогрунтов.

Разработанная технология переработки коллоидных лигнинсодержащих осадков, основанная на создании условий интенсификации протекания природных процессов в холодный и тёплый период времени года может быть отнесена к категории природоподобных технологий, ведь она соответствует следующим принципам: малоотходность, ресурсосбережение, взаимосвязанность всех компонентов технологии, направленность на восстановление окружающей среды, использование природных процессов. При этом решается не только проблема ликвидации отходов ОАО «Байкальский ЦБК», но и проблема нехватки сырья для рекультивации нарушенных земель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джантимиров Х. А., Валиев И. Ф. Рекультивация промзоны БЦБК и прилегающей территории побережья оз. Байкал с применением геотехнических технологий. Краткая концепция // Вестник НИЦ Строительство. 2019. Т. 22. № 3. С. 69–78.
2. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С. Природоподобные технологии — новые возможности и новые угрозы // Индекс безопасности. 2016. Т. 22. № 3–4. С. 103–108.
3. Корюхина И. Ю., Боярских Е. Г. Клубничное дело в Байкальске: смыслы и противоречия // Крестьяноведение. 2023. Т. 8. № 2. С. 116–139. DOI: 10.22394/2500-1809-2023-8-2-116-139
4. Лапердин В. К. Мероприятия по утилизации и хранению лигнинсодержащих промышленных и жидких бытовых отходов в бассейне оз. Байкал // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 3. С. 77–85.
5. Смуров С. И., Попова Т. И. Оценка различных видов культур и их сочетаний в качестве парозанимающих сидератов // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 11. С. 74–77.
6. Способы утилизации и применения содержимого шламовых накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для нужд нефтегазового комплекса Восточной Сибири / А. Г. Вахромеев, С. А. Щербин, О. А. Брагина, Д. С. Евдокименко, С. А. Сверкунов, И. Д. Ташкевич // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30. № 4. С. 354–363. DOI: 10.15372/KhUR2022390
7. Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов / А. С. Шатрова, А. В. Богданов, А. И. Шкрабо, О. В. Алексеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 153–162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658
8. Харитонов В. В., Шахов С. С. Оценка влияния сидератов на агрохимические показатели почвы // Агрохимический вестник. 2016. № 3. С. 39–43.
9. Шатрова А. С. Исследование процессов сукцессии на вымороженных лигнинсодержащих осадках ОАО «Байкальский ЦБК» и почвогрунтах на их основе // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 5. С. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-5-40-45
10. Ambika A., Mohnish P., Kumar N. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview // International

- Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2016. Vol. 5. № 3. P. 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204
11. Dirksen J., Ring T. Fundamentals of crystallization: kinetic effects on particle size distributions and morphology // *Chemical Engineering Science*. 1991. Vol. 46. № 10. P. 2389–2427. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.11.013
 12. Fageria N. K., Baligar V., Bailey B. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2005. Vol. 36. P. 19–20. DOI:10.1080/00103620500303939
 13. Haramoto E., Gallandt E. Brassica cover cropping for weed management: A review // *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2004. Vol. 19. № 04. P. 187–198. DOI: 10.1079/RAFS200490
 14. Muhammad A., Farouk N. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review // *MOJ Ecology & Environmental Sciences*. 2018. Vol. 3. № 4. P. 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098
 15. Ozherelieva Z. E., Lupin M. V., Bogomolova N. I. Study of Raspberry Genotypes by Biologically Valuable Traits under Conditions of Central Russia // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 630. DOI: 10.3390/agronomy12030630
 16. Potential application of oat for phytoremediation of salt ions in coastal saline-alkali soil / Lipu Hana, Huitao Liua, Shuhui Yua, Wenhui Wanga, Jintong Liua // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61. Part A. P. 274–281. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2013.09.034
 17. Sperdouli I. Heavy Metal Toxicity Effects on Plants // *Toxics*. 2022. Vol. 10. № 12. P. 1–4. DOI: 10.3390/toxics10120715
 18. Tanaka K., Kimura Y. Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019. Vol. 21. P. 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g
 - uid household waste in the Lake Baikal basin. In: *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 3, 77–85. (In Russ.)
 5. Smurov S. I., Popova T. I. (2015). Evaluation of various types of crops and their combinations as steam-absorbing green manure. In: *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*, 29, 11, 74–77. (In Russ.)
 6. Vakhromeev A. G., Shcherbin S. A., Bragina O. A., Evdokimenko D. S., Sverkunov S. A., Tashkevich I. D. (2022). Methods of utilization and use of the contents of sludge storage tanks of the Baikal Pulp and Paper Mill for the needs of the oil and gas complex of Eastern Siberia. In: *Chemistry for Sustainable Development*, 30, 4, 354–363. DOI: 10.15372/KhUR2022390 (In Russ.)
 7. Shatrova A. S., Bogdanov A. V., Shkrabo A. I., Alekseeva O. V. (2022). Technology of processing pulp and paper industry waste into soils using natural processes In: *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources engineering*, 333, 8, 153–162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658 (In Russ.)
 8. Kharitonov V. V., Shakhov S. S. (2016). Evaluation of the influence of green manure on agrochemical parameters of the soil. In: *Agrochemical Bulletin*, 3, 39–43. (In Russ.)
 9. Shatrova A. S. (2023). Study of succession processes on frozen lignin-containing sediments of OJSC Baikal Pulp and Paper Mill and soils based on them. In: *Ecology and Industry of Russia*, 27, 5, 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-5-40-45 (In Russ.)
 10. Ambika A., Mohnish P., Kumar N. (2016). Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview. In: *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 5, 3, 56–66. DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204
 11. Dirksen J., Ring T. (1991). Fundamentals of crystallization: kinetic effects on particle size distributions and morphology. In: *Chemical Engineering Science*, 46, 10, 2389–2427. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.11.013
 12. Fageria N. K., Baligar V., Bailey B. (2005). Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 19–20. DOI:10.1080/00103620500303939
 13. Haramoto E., Gallandt E. (2004). Brassica cover cropping for weed management: A review. In: *Renewable Agriculture and Food Systems*, 19, 04, 187–198. DOI: 10.1079/RAFS200490
 14. Muhammad A., Farouk N. (2018). The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. In: *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 3, 4, 265–268. DOI: 10.15406/mojes.2018.03.00098
 15. Ozherelieva Z. E., Lupin M. V., Bogomolova N. I. (2022). Study of Raspberry Genotypes by Biologically Valuable Traits under Conditions of Central

REFERENCES

1. Dzhamtimirov Kh. A., Valiev I. F. (2019). Reclamation of the BPPM industrial zone and the adjacent territory of the Lake Baikal coast using geotechnical technologies. Brief concept. In: *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*, 22, 3, 69–78. (In Russ.)
2. Kovalchuk M. V., Naraykin O. S. (2016). Nature-like technologies — new opportunities and new threats. In: *Security Index*, 22, 3-4, 103–108. (In Russ.)
3. Koryukhina I. Yu., Boyarskikh E. G. (2023). Strawberry business in Baikalsk: meanings and contradictions. In: *Peasant Studies*, 8, 2, 116–139. DOI: 10.22394/2500-1809-2023-8-2-116-139 (In Russ.)
4. Laperdin V. K. (2018). Measures for the disposal and storage of lignin-containing industrial and liq-

- Russia. In: *Agronomy*, 12, 3, 630. DOI: 10.3390/agronomy12030630
16. Lipu Hana, Huitao Liua, Shuhui Yua, Wenhui Wang, Jintong Liua (2013). Potential application of oat for phytoremediation of salt ions in coastal saline-alkali soil. In: *Ecological Engineering*, 61, Part A, 274–281. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.034
17. Sperdouli I. (2022). Heavy Metal Toxicity Effects on Plants. In: *Toxics*, 10, 12, 1–4. DOI: 10.3390/toxics10120715
18. Tanaka K., Kimura Y. (2019). Theoretical analysis of crystallization by homogeneous nucleation of water droplets. In: *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21, 2410–2418. DOI: 10.1039/c8cp06650g

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шатрова Анастасия Сергеевна — кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета;
e-mail: shatrova.irk@gmail.com

Богданов Андрей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета;
e-mail: bogdanovav@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia S. Shatrova — PhD (Engineering), Research Associate, Laboratory of Environmental Monitoring of Natural and Man-Made Environments, Irkutsk National Research Technical University;
e-mail: shatrova.irk@gmail.com

Andrei V. Bogdanov — Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Mineral Processing and Engineering Ecology, Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University;
e-mail: bogdanovav@istu.edu

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шатрова А. С., Богданов А. В. Оценка воздействия почвогрунтов, полученных из осадков шлам-лигнина (отходов Байкальского ЦБК) на высшие растения // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1. С. 53–66.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-53-66

FOR CITATION

Shatrova A. S., Bogdanov A. V. Assessment of the impact of soil obtained from lignin sludge deposits (waste from the Baikal Pulp and Paper Mill) on higher plants. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2025, no. 1, pp. 53–66.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-53-66