

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6543

УДК 630*3

Статья

Сравнительный анализ трёх вариантов рекультивации загрязнённых лесных территорий

Графова Елена Олеговна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), grafova.elena.karelia@gmail.com

Сюнёв Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), siounev@petrsu.ru

Получена: 30 июня 2022 / Принята: 26 сентября 2022 / Опубликовано: 30 сентября 2022

Аннотация: Восстановление загрязнённых лесных территорий требует применения экономически эффективных и экологически щадящих методов восстановления, продиктованных: природно-климатическими условиями, степенью повреждения и загрязнения, а также ландшафтно-геохимической характеристикой нарушенных земель. При разработке мероприятий по восстановлению использованных земель, включая нарушенные, необходимо учитывать особенности северных регионов: высокая ранимость, продолжительные периоды самовосстановления, труднодоступность удалённых территорий лесных массивов, короткий период положительных температур, необходимость восстановления санитарно-гигиенического состояния нарушенных территорий с целью предотвращения развития отрицательного воздействия на окружающую среду. Для определения степени загрязнения рассмотрен вариант картирования участка, проведена оценка степени загрязнения. Отбор проб воды в зоне загрязнения свидетельствует об интенсивных процессах разложения, наблюдается превышение ПДК в 20—500 раз, отмечается гибель растительности и древостоя. Глубина проникновения загрязнений достигает 95 см. На некотором расстоянии от источника фрагментарно сохранилась травянистая растительность. По мере удаления от источника загрязнения проективное покрытие осок возрастает и появляются сплошные заросли осоки вздутой (*Carex Rostrata*), среди неё также встречаются осоки струннокоренная (*C. Chordorrhiza*) и магелланская (*C. Paupercula*), сабельник (*Comarum Palustre*), пушица (*Eriophorum Vaginatum*). Рассматриваются три варианта рекультивации загрязнённой лесной территории:

механизированный, частичная выемка и обработка загрязнений в выносных ёмкостях различным номиналом от 9 до 40 м³ и двухэтапная обработка микроэнзимами. Исследования проводились в двух режимах: естественный процесс биоразложения и дополнительная аэрация. Исследованиями подтверждена эффективность ускорения процесса разложения органических загрязнений до 9 суток с применением оптимальной дозы 15 г препарата на 1 л загрязнений. Результатом обработки является повышение рН среды от кислой к нейтральной. Высота слоя органического поверхностного загрязнения снижается до значения 0,3 мм за 9 дней при аэрации смеси. Второй этап также подтверждается снижением концентрации азота в 1,5—2 раза в обрабатываемой пробе, что указывает на эффективность применения второго препарата. Прозрачность раствора повышается в 2—2,5 раза. По результатам сравнения трёх вариантов рекультивации, использование новой технологии двухэтапной биодеструкции в 9 раз дешевле применения механизированного способа, затраты по времени в 2 раза меньше и составляют до 14 дней.

Ключевые слова: рекультивация; биодеструкции; биообработка; биопрепараты; восстановление почв; органические загрязнения; загрязнение лесов; промышленное загрязнение лесов

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6543

Article

Comparative analysis of three options for reclamation of polluted forest areas

Elena Grafova

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
grafova.elena.karelia@gmail.com*

Vladimir Syunev

*Doctor of engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
siounev@petsu.ru*

Received: 30 Jun 2022 / Accepted: 26 September 2022 / Published: 30 September 2022

Abstract: Restoration of contaminated forest areas requires the use of cost-effective and environmentally friendly restoration methods due to natural and climatic conditions, the degree of damage and pollution, and the landscape and geochemical characteristics of disturbed lands. When developing measures for the restoration of used lands, including the disturbed ones, it is necessary to take into account the features of the northern regions: high vulnerability, long periods of self-restorability, inaccessibility of remote forest areas, a short period of positive temperatures, the need to restore the sanitary and hygienic state of disturbed territories to prevent the development of a negative impact on the environment. To determine the degree of pollution, a variant of mapping the site was considered and the degree of pollution was estimated. Water sampling in the contaminated zone testified to intensive processes of decomposition organic matter exceeding the MAC by 20-500 times. The death of vegetation and forest stands was noted. The penetration depth of pollution reached 95 cm. Herbaceous vegetation was fragmentarily preserved at a distance from the source of pollution. As the distance from the source of pollution increased, the projective cover degree with sedge also increased, and continuous thickets of beaked sedge (*Carex Rostrata*) appeared with some plants of string-rooted sedge (*C. Chordorrhiza*) and Magellanic sedge (*C. Ppaupercula*), marsh cinquefoil (*Comarum Palustre*) and cotton grass (*Eriophorum Vaginatum*). The authors considered three options for the reclamation of a polluted forest area: a mechanized method, a method including partial excavation and treatment of polluted matter in containers of various volume (from 9 to 40 cubic meters), and a two-stage treatment with microenzymes. The studies were performed in two modes: the natural process of biodegradation and additional aeration. Studies have confirmed the effectiveness of

accelerating the process of decomposition of organic contaminants up to 9 days using the optimal dose of 15 g of the agent per 1 liter of contaminants. The treatment increased the pH of the medium from acidic to neutral one. The height of organic surface contamination layer was reduced to 0.3 mm in 9 days when the mixture was aerated. The second stage resulted in a decrease in the nitrogen concentration by 1.5–2 times. The effectiveness of the second agent was also confirmed by a decrease in the nitrogen concentration in the treated sample. The transparency of the solution increased by 2 - 2.5 times. According to the results of comparing three options for reclamation, the use of the new technology of two-stage biodegradation is 9 times cheaper than the use of a mechanized method, the time expenditure is 2 times less and amounts to 14 days.

Keywords: reclamation; biodegradation; biotreatment; biological products; soil restoration; organic pollution; forest pollution; industrial forest pollution

1. Введение

Довольно продолжительное время в процессе проверок контролирующими организациями хозяйственной деятельности предприятий лесной промышленности фиксируются случаи недобросовестного лесопользования, связанные с загрязнением арендуемых лесных участков. В результате подобных нарушений достаточно большие территории лесов становятся «горячими экологическими точками». Источниками возникновения таких объектов могут служить результаты инфраструктурного сервиса, сопутствующего производственным процессам лесозаготовок и лесобработки, организованные на верхних складах и в лесных посёлках. Одним из условий реализации производственной деятельности является обеспечение рабочих необходимыми условиями для проживания, питания, инженерными коммуникациями [1]. Лесные посёлки в прошлом строились на несколько десятилетий. Следует отметить, что отсутствие законодательных требований к содержанию лесных посёлков привело к образованию многочисленных несанкционированных свалок и загрязнённых окрестных территорий, не пригодных для повторного использования. В настоящее время на смену стационарным лесным посёлкам приходят мобильные формы проживания и работы с использованием передвижных или некапитальных разборных жилищных комплексов и соответствующей инфраструктуры [3]. После завершения этапа лесозаготовительных работ на арендованном участке территория должна быть рекультивирована в соответствии с требованиями действующего законодательства [2].

Рекультивация — это комплекс работ, направленных на восстановление хозяйственной ценности нарушенных и загрязнённых земель, а также улучшение условий окружающей природной среды. Сброс органических загрязнений и складирование пищевых отходов при условии продолжительного накопления приводят к возникновению свалок пищевых отходов и продуктов их разложения, которые со временем расширяют зону негативного воздействия на природные территории. Негативное воздействие на почвы и почвенный покров, флору и фауну, поверхностные и подземные воды описано во множестве работ [5], [6], [8—13]. Восстановление проводится с учётом местных природно-климатических условий, степени повреждения и загрязнения, ландшафтно-геохимической характеристики нарушенных земель. При разработке мероприятий по восстановлению использованных земель, включая нарушенные, необходимо учитывать особенности северных регионов: высокая ранимость, продолжительные периоды самовосстановления, труднодоступность удалённых территорий лесных массивов, короткий период положительных температур, необходимость восстановления санитарно-гигиенического состояния нарушенных территорий с целью предотвращения развития отрицательного воздействия на окружающую среду. Таким образом, технология рекультивации должна обеспечивать экономический эффект и включать экологически щадящие методы восстановления, реализация которых не усугубит текущие нарушения.

2. Материалы и методы

Пилотным объектом для исследований послужил реальный загрязнённый участок, обнаруженный в ходе инспекции территорий ГКУ РК «Сегежское центральное лесничество». Площадь нарушенной территории составляет 6603 м². Климат в исследуемой местности влажный, умеренный. Территория относится к зоне избыточного увлажнения, где сумма осадков превышает количество испарений влаги. Среднее многолетнее количество осадков за год составляет 590 мм. В течение года осадки выпадают неравномерно, бóльшая их часть приходится на тёплый период года. Устойчивый снежный покров устанавливается 13 декабря и длится до 23 апреля. Средняя продолжительность зимнего периода составляет 207 дней. Наиболее низкие температуры отмечаются в январе и достигают $-40,7^{\circ}\text{C}$, наиболее высокие — в июле — августе, до $+32,4^{\circ}\text{C}$. Период с устойчивыми положительными температурами составляет 3 месяца.

При обследовании участка и определении степени загрязнения проведено картирование, описание почвенного покрова, определён тип почв, глубина загрязнений, в шести точках проведён отбор проб загрязнённой жидкости (рисунок 1).

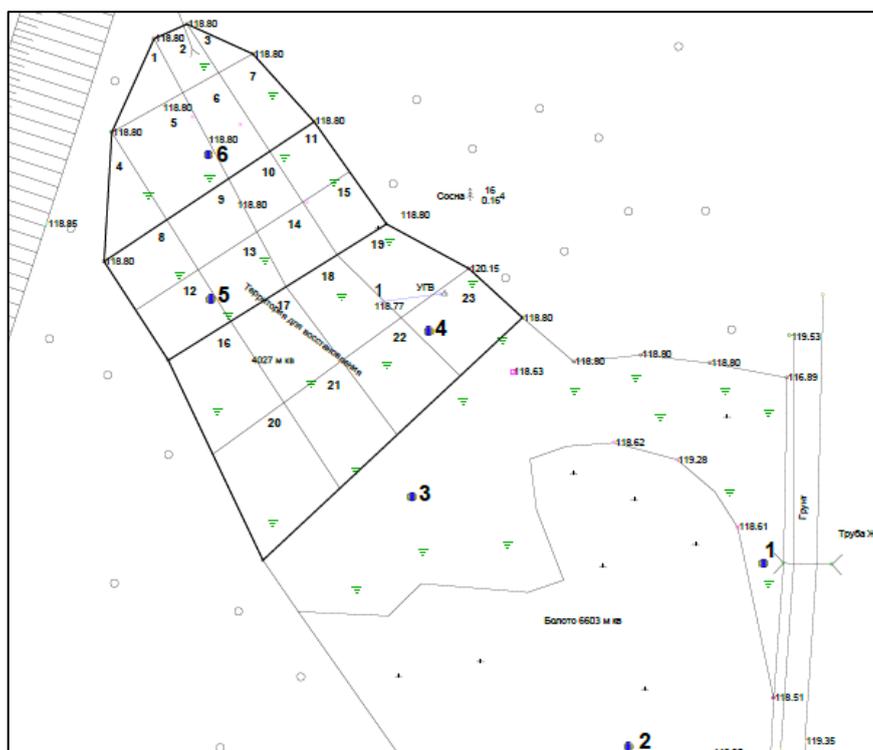


Рисунок 1. Картирование учёта загрязнений нарушенного участка с указанием точек отбора проб

Figure 1. Pollution accounting map of the disturbed area with indication of sampling points

На отобранных пробах загрязнений проведено исследование по технологии EX SITU. В лабораторных условиях проведено исследование по биодеструкции загрязнений с привнесением в обрабатываемую среду биодобавок — специализированных микроэнзимов. Биоремедиация загрязнённых почв предусматривает использование биопрепаратов на основе иммобилизованных на питательном субстрате, специально подобранных штаммов микроорганизмов, что способствует повышению скорости и степени разложения органических загрязнений, повышению активности аборигенной микрофлоры. Биопрепараты состоят из микроорганизмов (бактерий) и вспомогательных веществ (ферменты, питательные вещества, отдушки, ПАВ и т. д.). Как правило, в одном биопреparate находится от 4 до 24 различных видов (штаммов) бактерий. Селективность в питании каждого штамма позволяет устранять только определённый вид загрязнений. Комбинирование штаммов позволяет получать биопрепараты с заданными свойствами [7]. Так, на сегодняшний день известны бактерии, питающиеся стиралами, диоксидами, гербицидами, силикатами, жирами, нефтепродуктами и т. д. Действия биодеструктора: комплексная очистка загрязнений, снижение объёма и массы загрязнений, уменьшение и локализация неприятных запахов, естественное отмирание избыточной биомассы после разложения. Конечным продуктом переработки органических загрязнений является лёгкий минерализованный осадок, состоящий из отдельных мельчайших частиц, не образующий твёрдой корки при любом сроке хранения, не застывающий при отрицательных температурах, не подвергающийся действию гнилостной микрофлоры, не агрессивный для окружающей среды [2].

Для очистки органических загрязнений необходимы активные штаммы липолитических микроорганизмов. Способностью к продукции липаз обладают микроорганизмы различных таксономических групп: бактерии, актиномицеты, дрожжи, микроскопические грибы. Липолитическая активность характерна для бактерий многих родов. Наиболее изучены представители родов *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Aeromonas*, *Xenorhabdus*, *Moraxella*, *Propionibacterium*, *Chromobacterium*, *Atherobacter*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas Serratia* и др. Наиболее активные бактерии, обладающие липолитической активностью, которые были идентифицированы путём сиквенс-анализа фрагментов гена 16S РНК как *Serratia marcescens* (штаммы ИБ-2-1, ИБ-2-2), *Serratia species* (штаммы ИБ-1, ИБ-3-1, ИБ-3-3). Поэтому бактерии рода *Serratia* наиболее перспективны для создания биопрепаратов для локальной очистки жиросодержащих бытовых стоков и отходов [16].

Для выбора оптимальных биопрепаратов произведён обзор наиболее эффективных, доступных на рынке (таблица 1). После помещения усреднённой пробы в стеклянную колбу выявлено, что загрязнение имеет двухфазный состав: твёрдая перегнившая органика, включающая жировые компоненты, которая подверглась гниению, и жидкая фаза, включающая растворённую органику. Таким образом, исследования проводились в два этапа: с использованием биоэнзима липолитика и последующим добавлением в обработанный сток биодеструкторов для доочистки осветлённой воды. Для сравнения эффективности исследования проводились без применения аэрации (обычный способ

обработки) и с применением принудительной аэрации, поскольку, по заявлению производителей биоэнзимов, насыщение кислородом воздуха ускоряет процесс деструкции. Исследования проведены путём обработки пяти пар параллельных проб по 1 л загрязнений с добавлением следующих концентраций: 3 г/л, 5 г/л, 7 г/л, 10 г/л, 15 г/л.

Таблица 1. Сравнительные характеристики биоэнзимов

Table 1. Comparative characteristics of bioenzymes

Название биоэнзимов	Описание	Характеристики	Преимущества
Vacti-Bio 9500	Включает микробные штаммы Vacti-Bio 9500 некультивированные и непатогенные. Активные продуценты ферментов для разрушения: амилазы (крахмала), протеазы (белков), целлюлазы (целлюлозы), липазы (масел и жиров) и т. д.	Порошок белого цвета, pH 6—9. Диапазон температур 25—55 °С. Разложение широкого спектра субстратов	Биодеструкция благодаря действию бактерий, ферментов и биогенов. Удаление жиров и других органических отложений, устраняет запахи. Снижает концентрацию органических загрязнений
BioRemove 5100	Разложение широкого спектра загрязнений. Используется для ускорения деструкции пищевых промышленных стоков, для снижения значений ХПК и БПК	Вносится ежедневно в биореакторы, pH 6—9. Удвоение роста на каждые 10 °С, до 40 °С	Повышение стабильности работы канализационных и очистных систем, снижение интенсивности запахов. Целевое удаление специфической органики
Bichem GTX	Порошкообразная смесь на основе нескольких штаммов микроорганизмов, эффективная биодеструкция животного, растительного или минерального жира и масел	Насыпная Плотность 0,7—0,8 г/мл, влажность 15 %, pH 6,0—8,5. Диапазон температур +15—45 °С	Синергетическое действие энзимов, бактерий и вспомогательных веществ. Эффективная деструкция жиров (с эмульгированными жирами и моющими средствами, маслами и волокнами)
GREASE GUARD EU. Гриз Гард	Смесь штаммов Bacillus, разлагает наиболее трудно удаляемую часть молекул жира — жирные кислоты с длинной углеводородной цепочкой.	Регулярная обработка суточными дозами. Посев — 1,5 л/м ³	Деструкция накопленных жиров. Разложение трудно удаляемой части молекул жира — жирные кислоты с длинной углеводородной

Название биоэнзимов	Описание	Характеристики	Преимущества
	Неагрессивен и экологически безопасен	загрязнений, концентрация $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл	цепочкой
Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ»	Биологический деструктор пищевых жиров и растительных масел. Содержит консорцию (12) штаммов нетоксичных, натуральных, факультативных анаэробных микроорганизмов с высокой секретивной и ферментативной активностью, они обеспечивают гидролиз органорастворённых жиров с разложением простых продуктов путём адсорбции до углекислоты	Диапазон температур +5—55 °С. Возобновляют активность свыше +5 °С, рН 4—10. Разложение жиров в аэробных и анаэробных условиях	Деструкция твёрдого жира. Деструкция органических загрязнений в стоках по показателям БПК ₅ , БПК _{полн} , ХПК, N, P, ТКБ, ОКБ, взвешенные вещества, жиры с эффективностью 80—97 % в сроки от 2 (с аэрацией) до 7 суток (без аэрации). Снижение неприятных запахов за счёт микробиологического усвоения продуктов биодеструкции
Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ»	Смесь микроорганизмов из почвенных российских эндемиков и гранул ферментов. Сухой порошок с запахом почвы. Рекомендуются для закрытых водоёмов, испытывающих интенсивное загрязнение органикой, мутность воды, цветение воды, заражение патогенами	Применение при температуре от +5 °С. Условия применения препарата Микрозим Понд Трит. Переносит зимние температуры в спящем состоянии. Цикл очистки водоёма 3—4 месяца	Очистка воды и донных отложений от органических веществ и питательных элементов. Деструкция органической биомассы донного ила. Восстановление кислородного режима и способности самоочищения водоёма. Снижение количества патогенных микроорганизмов, сине-зелёных водорослей, ограничение размножения ряски в закрытых водоёмах

Первый этап исследований — обработка органических загрязнений липолитиками проводилась в течение 9 дней. Ежедневно производилось измерение слоя разложившегося поверхностного загрязнения и изменение кислотности. Для определения степени кислотности (рН) использовался преобразователь потенциометрический И-510. Для измерения высоты слоя разложившегося поверхностного загрязнения использовалась линейка.

Второй этап исследований — применение биодеструкторов заключается в использовании 6—12 видов естественных микроорганизмов, усваивающих свободную органику и биогенные элементы из воды, осветлённой после обработки на первом этапе. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов происходит разрушение и усваивание органических загрязнений с образованием воды, углекислого газа и минерального остатка. Обработка также проводилась в обычных условиях перемешиванием препарата и с применением компрессорной установки для аэрирования смеси. В соответствии со свойствами применяемых биоэнзимов биодеструкторов, их применение способствует снижению концентраций загрязнений по показателям БПК, ХПК, азоту, фосфатам, растворённому кислороду. Контроль биодеструкции определялся по концентрации азотосодержащих веществ фотометрическим методом. Также ежедневно определялась прозрачность раствора по методике «Определение прозрачности по шрифту».

После определения параметров эффективности двух стадий обработки проведено технико-экономическое сравнение вариантов рекультивации нарушенной территории. Экономические затраты рассчитаны исходя из укрупнённых сметных показателей в ценах на 2021 г.

3. Результаты

Исследуемый участок имеет равнинный рельеф и небольшой уклон. Участок заболочен ввиду низинного расположения. Вследствие постоянного увлажнения атмосферными осадками, наблюдается распространение ореола загрязнения в сторону уклона местности. Обследование нарушенной территории позволило определить, что продолжительное внесение загрязнений привело к полному уничтожению и трансформации верховой растительности участка. Средняя глубина слоя верхового торфа составила 40—50 см, максимальная — до 100 см (таблица 2). На большей части участка наблюдается слой органического загрязнения жироподобного типа с резким запахом. Слой отходов покрывает часть территории болота с максимальной высотой слоя (0,2 м) у центра загрязнения, постепенно уменьшающегося до нуля (см. таблицу 2).

Согласно данным таблицы 2, наибольший слой загрязнённых отходов наблюдается на части участка, расположенного в непосредственной близости к источнику загрязнения. Глубина обнаружения следов органических остатков достигает 0,95 м. На части участка полностью погиб древостой, а травяно-кустарничковый и моховой ярусы накрыты слоем отходов. Сохранились частично кочки осок водной и сизой (*Carex Aquatilis*, *C. Cinerea*). Сплошной слой отходов занимает около 1/3 участка у источника загрязнения. При удалении от источника фрагментарно сохранилась травянистая растительность. По мере удаления от источника загрязнения проективное покрытие осок возрастает и появляются сплошные заросли осоки вздутой (*Carex Rostrata*), также встречаются осоки струннокоренная (*C. Chordorrhiza*) и магелланская (*C. Paupercula*), сабельник (*Comarum Palustre*), пушица (*Eriophorum vaginatum*). Повреждённый живой подрост берёзы (*Betula pendula*) наблюдается

Таблица 2. Результаты промеров глубины загрязнённой территории

Table 2. The results of measurements of the contaminated area depth

Точка замера	Степень загрязнения	Глубина проникновения органических загрязнений, см	Слой органических поверхностных отложений, см	Уровень грунтовых вод, см
1	Слабая	50	—	Канавы с водой
2	Сильная	95	—	-15
3	Вся растительность погибла	80	—	-10
4	Сильная	70	15	-10
5	Сильная	50	20	-1
6	Сильная	70	20	-7

начиная со средней, не затронутой отходами части участка, а в его нижней части жизнеспособность берёзы сохранена. При этом мох уничтожен на всей площади участка, в нижней части отмечаются лишь небольшие единичные пятна сфагновых и гипновых мхов (*Sphagnum* spp., *Warnstorfia* sp.). Сформированный слой отходов представляет собой не пригодный для роста растений субстрат, а погребённый под ним торф не может служить субстратом ввиду того, что он изолирован от доступа воздуха и питательных веществ. В нижней части участка, не покрытой слоем отходов, но испытывающей их воздействие через грунтовые воды, осоки продолжают успешно расти. В удовлетворительном состоянии находится и поросль берёзы. Это свидетельствует о том, что в настоящий момент токсическое воздействие загрязнений не способствует гибели всей растительности. Основную проблему для восстановления растительного покрова представляет не пригодный для роста изолирующий слой загрязнений. При наличии подходящего субстрата (торфа) растительность будет восстанавливаться. Фотографии участка исследования представлены ниже (фото 1 и 2).

Проведён отбор и исследования проб воды, находящейся ниже уровня загрязнения верхнего естественного слоя, на глубине 0,2—0,3 м, результаты которых представлены в таблице 3. Анализ результатов проб свидетельствует о высокой концентрации органических загрязнений. Во всех пробах (кроме пробы 1) показатели биологического загрязнения, выражаемого в БПК₅, превышают установленную норму более чем в 500 раз. Жиры должны полностью отсутствовать в природной среде. Невысокое содержание нитритов и нитратов свидетельствует об отсутствии процесса биологического разложения загрязнений или о его медленном течении. Таким образом необходимо предпринять меры по снижению концентрации выявленных загрязнений. Низкое значение АПАВ свидетельствует об отсутствии загрязнения моющими средствами.



Фото 1. Нарушенный участок у источника загрязнения с уничтоженной растительностью

Photo 1. Disturbed area near the source of pollution with destroyed vegetation



Фото 2. Пограничная зона воздействия загрязнения

Photo 2. Border zone of pollution impact

В качестве деструкторов выбраны два препарата, подходящие под условия и цели исследований: Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ» и Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ». Механизм действия препарата «ГРИЗ ТРИТ» заключается в синтезе живыми микроорганизмами биосурфактантов и липолитических ферментов, под воздействием которых происходит биологическая деструкция растворённых жиров и твёрдой жировой массы, и последующем полном усвоении всех продуктов биодеструкции живыми микроорганизмами в качестве

Таблица 3. Показатели качества проб воды в 6 точках с удалением от источника загрязнения

Table 3. Quality indicators of water samples at 6 points with a distance from the source of pollution

№ п/п	Точка замера	6	5	4	3	2	1	ПДК*
1	pH	6,52	6,26	6,37	6,21	5,49	6,29	—
2	БПК ₅ , мг O ₂ /л	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000	159	2,1
3	ХПК, мг O ₂ /л	> 800	> 800	> 800	> 800	> 800	470	—
4	Аммиак, мг /л	> 100	77	> 100	71	> 100	77	0,5
5	Нитрит-ион, мг /л	0,025	0,031	< 0,02	0,054	< 0,02	< 0,02	0,08
6	Нитрат-ион, мг /л	0,45	0,46	0,45	0,81	0,33	0,35	40
7	Фосфат-ион, мг /л	78	10,7	22,5	18,6	50	19,8	0,2
8	АПАВ, мг /л	0,18	0,054	0,08	0,053	0,19	0,18	0,1
9	Жиры, мг /л	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	29	0

основного источника энергии с образованием воды, диоксида углерода (углекислоты), нитритов, сульфатов и лёгкого осадка, занимающего 10—20 % исходного объёма. Осадок представляет собой экологически безвредные, нетоксичные продукты микробного метаболизма, соответствующие 4—5-му классу опасности, может использоваться в качестве удобрения. Происходит биологическая деструкция (гидролиз) животных жиров и растительных масел на H₂O, CO₂, нитриты, сульфаты и лёгкий осадок. Осадок представляет собой экологически безвредные нетоксичные продукты микробного метаболизма, соответствующие 4—5-му классу опасности, может использоваться как удобрение. Сокращение объёма отделяемой от воды твёрдой жировой массы составляет от 60 % (в среднем) до 90 % (максимум). Сокращение концентрации органорастворённых жиров в стоке достигает 80—99 %, в зависимости от времени контакта. Скорость и полнота деструкции жиров зависят от благоприятных условий — температуры и времени экспозиции [15]. Результаты показателя кислотности и высоты слоя твёрдых органических загрязнений после первого этапа исследований представлены на рисунках 2 и 3.

Минимальная норма расхода биопрепарата составляет 0,25 г на 1 л заполненного отходами объёма ёмкости. Увеличение дозы препарата многократно ускоряет процесс биодеструкции. Таким образом, наибольшая эффективность наблюдается при внесении 15 г биопрепарата на 1 л загрязнений. При этом наиболее эффективно происходит повышение кислотности к нейтральной среде при аэрировании смеси. Так, при аэрации значение pH достигается через 2 дня обработки, в то время как без аэрации этот уровень pH восстанавливается только через 5 дней, что свидетельствует об эффективности применения аэрации.

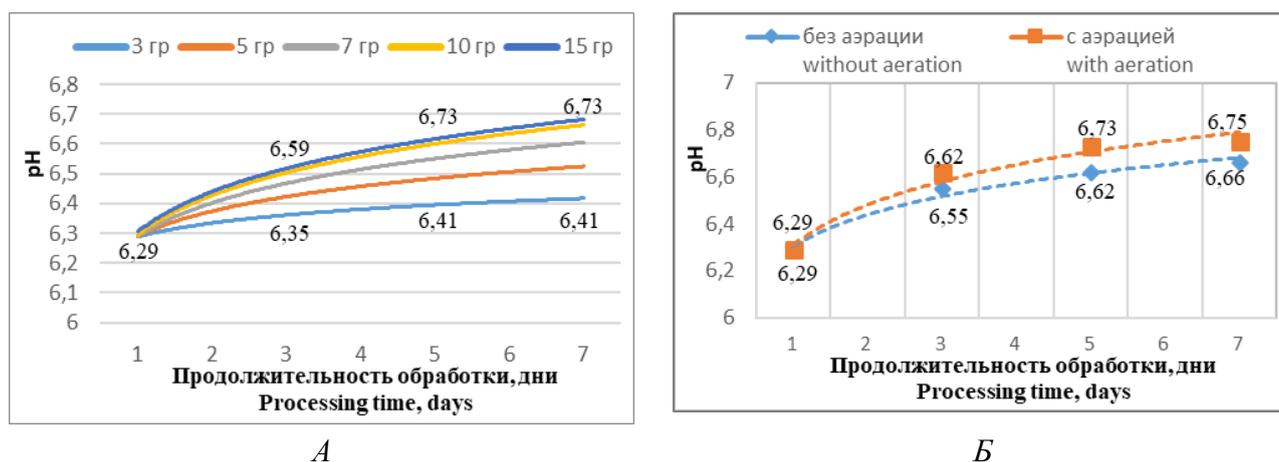


Рисунок 2. Динамика изменения pH при биодеструкции загрязнений на первом этапе обработки биоэнзимами: *A* — зависимость pH от концентрации препарата; *B* — сравнительные характеристики процессов с аэрацией смеси и без

Figure 2. Dynamics of pH changes during the biodegradation of contaminants at the first stage of treatment with bioenzymes: *A* — pH dependence on the concentration of the agent; *B* — comparative characteristics of processes with and without mixture aeration

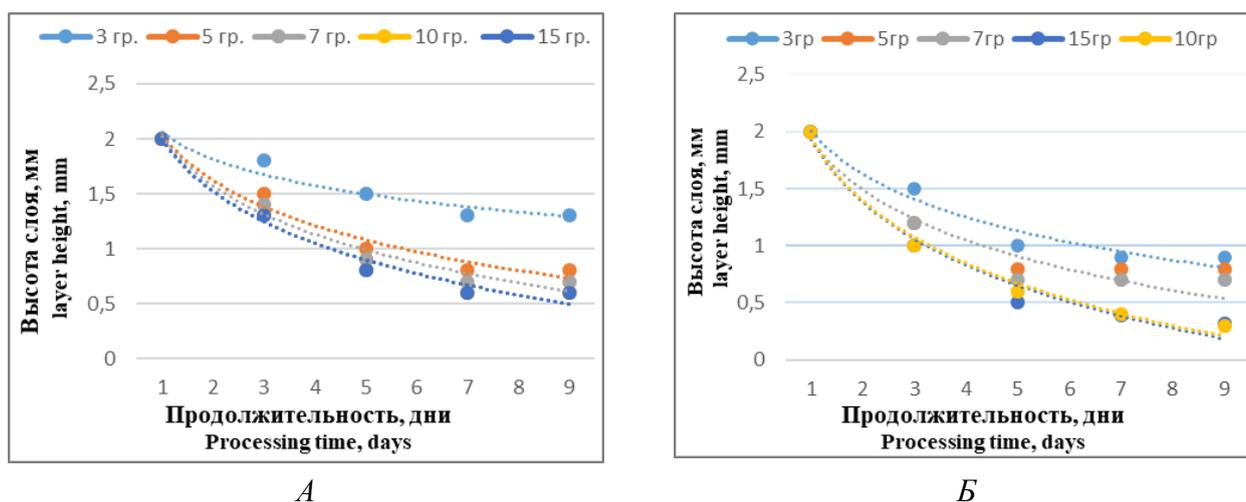


Рисунок 3. Динамика показателей биодеструкции слоя жировых загрязнений в процессе обработки биоэнзимами: *A* — без применения аэрации; *B* — с применением аэрации

Figure 3. Dynamics of indicators of biodegradation of a fatty contaminants layer in the process of treatment with bioenzymes: *A* — without the use of aeration; *B* — with the use of aeration

Через 9 дней после стабилизации результатов в пробы, оставшиеся после первого этапа исследований, добавлены такие же выборки второго биопрепарата «ПОНД ТРИТ», направленного на очистку загрязнённых водоёмов. Эффективность второго этапа контролировалась по наличию азотсодержащих веществ и прозрачности через 9 дней. Результаты обработки представлены на рисунке 4.

Полученные результаты также свидетельствуют об эффективности применения наибольшего количества внесения биопрепарата. Также применение аэрации способствует эффективной деструкции азотсодержащих веществ. Снижение азота с 4 до 3 мг/л при использовании процесса аэрации происходит в 2 раза быстрее. Такое эффективное ускорение процесса деструкции необходимо использовать для разработки технологии рекультивации непосредственно на участке. В основу данной технологии принимается принцип работы искусственных сооружений биологической очистки — аэротенк. Находясь в водной среде, микроорганизмы будут эффективнее функционировать и перемещаться, использовать свободную воду. Отличием от аэротенка является тот факт, что в него вода направляется принудительно, а в рассматриваемом случае предлагается использовать наличие грунтовых вод и поверхностных осадков, покрывающих загрязнения практически по всей территории. Выявленная эффективность аэрации свидетельствует о необходимости устройства аэрационной системы. Для снабжения кислородом воздуха необходимо обеспечить полное покрытие загрязнённого участка системой аэраторов. В качестве аэраторов принято использование мембранных аэраторов для выращивания аквакультуры. Аэраторы размещаются в слое загрязнения на глубине 0,5 м с грузами против всплытия (см. рисунок 5).

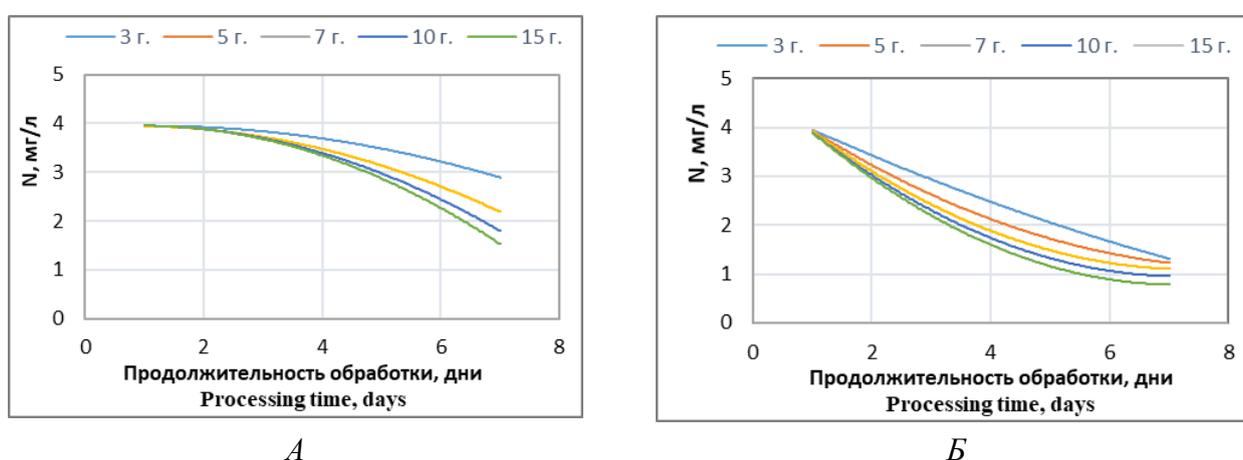


Рисунок 4. Динамика показателей биодеструкции слоя жировых загрязнений в процессе обработки почвенными биоэнзимами: *А* — без применения аэрации; *Б* — с применением аэрации

Figure 4. Dynamics of indicators of biodegradation of a fatty contaminants layer in the process of treatment with soil bioenzymes: *A* — without the use of aeration; *B* — with the use of aeration

Для выбора оптимальной технологии рекультивации необходимо провести технико-экономическую оценку каждого. Техническое восстановление по каждому из вариантов предусматривает выполнение следующих видов работ:

Вариант 1. Механизованная выемка. Включает следующие мероприятия: организация ленточной вырубki деревьев для проезда техники и с территории — 0,02 га; выемка загрязнённого слоя торфа до минерального слоя на глубину 1 м — 2392 м³, что соответствует: разработке котлована экскаватором глубиной до 1 м — 2392 м² или выемке грунта экскаватором глубиной до 1 м — 2392 м³; загрузка загрязнённого грунта в самосвал — 2392 м³; транспортировка отходов на объект размещения отходов на расстояние 100 км; передача отходов на захоронение — 2392 м³; завоз плодородного грунта — 2392 м³; выравнивание и уплотнение площадки, подготовка под посев для восстановления растительности — 2392 м².

Вариант 2. Выемка и обработка загрязнений в промежуточных ёмкостях. Включает следующие мероприятия: сбор верхнего органического слоя ручным способом — 2392 м² или 418,2 м³; загрузка загрязнений в промежуточные ёмкости для транспортировки на площадку обработки; транспортирование на бортовом автомобиле отхода до площадки обработки на расстояние до 100 м; обработка загрязнений 104,55 кг биологическими препаратами типа липолитики в течение 7 дней. Необходимое количество реагента и время обработки представлено в таблице 4.

Таблица 4. Параметры и время обработки отходов при периоде микробиологической обработки 7 суток

Table 4. Parameters and time of waste treatment during a microbiological treatment period of 7 days

Наименование оборудования	Технологические параметры при использовании ёмкостей разного объёма					
	9	10	20	25	30	40
Объём ёмкости, м ³	9	10	20	25	30	40
Необходимое количество препарата на цикл, кг	2,25	2,5	5	6,25	7,5	10
Объём раствора препарата, л	4,5	5	10	12,5	15	20
Время обработки всего объёма, дни	325	293	146	117	98	73
Время обработки всего объёма, месяцы	10,8	9,8	4,9	3,9	3,3	2,4

В данном случае под циклом понимается количество технологических процессов при использовании ёмкости рассматриваемого объёма. Следует отметить, что при использовании

ёмкости большего объёма возникают дополнительные затраты, связанные с перемешиванием объёма загрязнений. Таким образом, чем больший объём ёмкостей будет задействован, тем быстрее весь объём отхода будет переработан. Максимальное время переработки отхода составляет 10,8 месяцев. Поскольку сбор и обработка загрязнений в ёмкостях занимают длительное время, данный вариант принят нецелесообразным для расчёта.

Вариант 3. Применение новой технологии двухэтапной технологии аэрационной биодеструкции. Предусматривается рыхлаение загрязнённой территории вручную лопатами, граблями, вилами; рыхлаение верхнего уплотнённого слоя загрязнений и для улучшения естественной аэрации — 2392 м². Для данного случая применяется разработанная система погружных аэраторов, состоящая из магистральных линий из полипропилена и мембранных аэраторов (рисунок 5) с применением компрессорной установки производительностью 700—1000 м³/ч. Обработка загрязнений биологическими препаратами для доочистки органики до полной деструкции загрязнений составляет 7—14 дней; после завершения работы производится демонтаж системы аэрации.

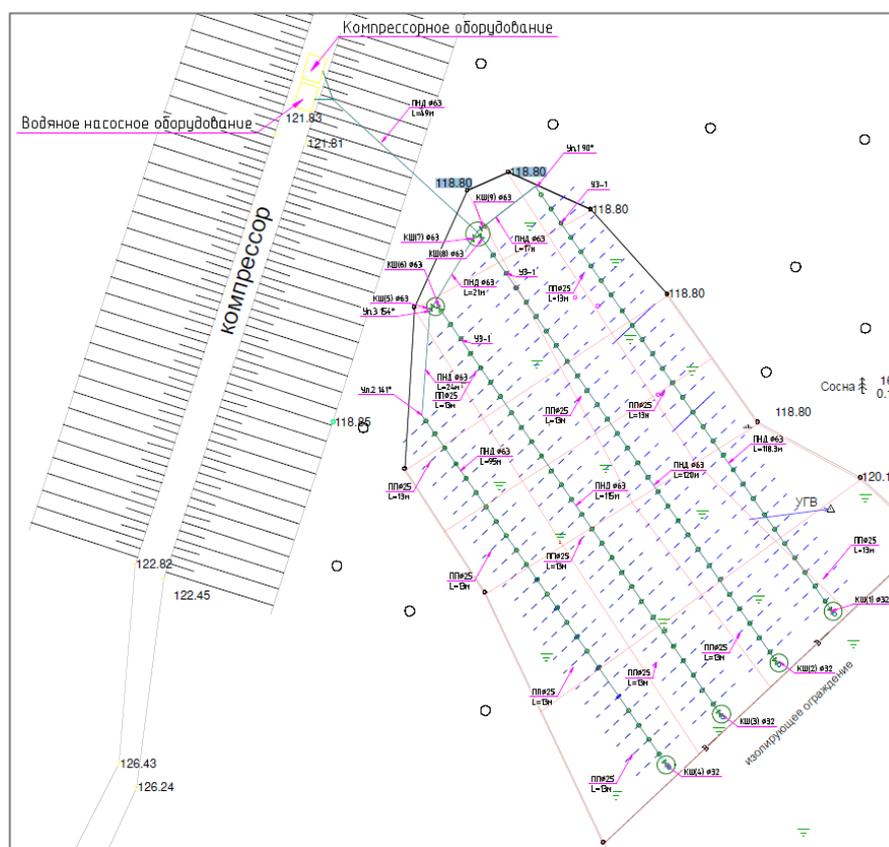


Рисунок 5. Схема применения аэрационной биодеструкции на загрязнённом участке

Figure 5. Scheme of aeration biodegradation in a contaminated area

Таблица 5. Технологические операции по выполняемым работам

Table 5. Technological operations for the work performed

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Вариант 1. Механизированный сбор загрязнений	Вариант 2. Биодеструкция загрязнений
1	Вырубка деревьев	га	0,02	
3	Загрузка загрязнённого грунта в самосвал, 2392 м ³	чел./ч	2000	
4	Транспортировка отходов на объект размещения отходов на расстояние 100 км	количество рейсов	200	
5	Передача отходов на захоронение (600 р/м ³)	м ³	600	
6	Загрузка грунта для восстановления выемки в самосвал, 2392 м ³	чел./ч	2000	
7	Транспортировка грунта на место восстановления выемки на расстояние менее 10 км	количество рейсов	200	
8	Выравнивание площадки экскаватором	га	0,66	
9	Уплотнение грунта площадки	га	0,66	
10	Предпосевная культивация с одновременным боронованием общей площадью	га	0,66	
11	Засев многолетних трав общей площадью	га	0,66	
12	Полив участка озеленения площадью	га	0,66	
14	Рыхление торфяной залежи лопатами вручную глубиной до 1 м	чел./ч		1600
16	Обработка (1-я стадия) биологическими препаратами 1-го типа	чел./ч		8

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Вариант 1. Механизированный сбор загрязнений	Вариант 2. Биодеструкция загрязнений
17	Обработка (2-я стадия) загрязнений биологическими препаратами 2-го типа	чел./ч		8
18	Контроль работы системы, контроль технологических показателей, анализ снижения объёма загрязнений	чел./ч		160
19	Монтаж-демонтаж системы аэрации	чел./ч		10
20	Экономические затраты, руб.		51 393 540	5 710 393

Необходимо отметить, что вариант 3 (метод биодеструкции непосредственно на загрязнённом участке) требует дополнительных затрат, которые включают:

1. Использование аэрационной распределительной системы аэрации стоимостью в размере 850 тыс. руб.

2. Использование препаратов биоэнзимов двух типов:

– препарат 1-го типа, 104 тыс. руб.;

– препарат 2-го типа, 30 тыс. руб.

Схема сравнения характеристик механизированной и разработанной технологий приводится на рисунке 6.

Сравнение прямых и эксплуатационных производственных затрат разрабатываемых вариантов проводится при помощи определения экономического эффекта, который составит:

$$CF = C_1 - C_2,$$

где C_1 — затраты по варианту 1; C_2 — затраты по варианту 2.



Рисунок 6. Схема сравнения этапов типовой и новой технологий рекультивации труднодоступных лесных территорий

Figure 6. Scheme for comparing the stages of standard and new technologies for reclamation of remote forest areas

4. Обсуждение и заключение

Анализ лабораторных данных свидетельствует о том, что часть загрязнений проникла в толщу болота на глубину около 1 м. Наибольшие показатели загрязнения обнаружены в точках 6, 5, 4, 3, 2. В точке 1 — на значительном удалении от источника загрязнения концентрация загрязнений наименьшая. Наблюдается постепенное снижение концентраций загрязнений, что свидетельствует о постепенной деструкции загрязняющих веществ. Тем не менее количество органических и неорганических загрязнений значительно превышает показатели норм для природной среды. Очевидно, что препятствием для естественного разложения и окисления органических веществ является наличие на поверхности слоя органического жироподобного загрязнения, которое препятствует окислению органических веществ. В случае интенсивного загрязнения участка, на котором погибла практически вся растительность, слой загрязнения препятствует естественному лесовосстановлению, поэтому необходимо предусмотреть следующие этапы:

- определить границы загрязнения визуальным способом;
- в зависимости от масштабов загрязнений предусмотреть картирование участка с разбивкой на зоны для оценки степени воздействия и расчёта объёмов загрязнений;
- определить глубину проникновения загрязнений;
- определить интенсивность запаха загрязнений и его оттенки: хозяйственно-бытовой, пищевая органика и т. д.;
- отбор проб почвы и воды повысит эффективность расчёта технологии рекультивации территории и возможность прогнозирования лесовосстановления.

По результатам сравнения качественных характеристик для первого этапа обработки принято применение препарата Микрозим (tm) «ГРИЗ ТРИТ», а для второго этапа — Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ».

Исследованиями подтверждена эффективность ускорения процесса разложения органических загрязнений до 7—9 суток с применением оптимальной дозы 15 г препарата на 1 л загрязнений на первом этапе применения биоэнзима «ГРИЗ ТРИТ». При этом наблюдается повышение pH среды от кислой к нейтральной. Высота слоя органического поверхностного загрязнения эффективнее снижается до значения 0,3 мм за 9 дней при аэрировании смеси, что в 1,5—2 раза эффективнее, чем за то же время без аэрации.

Эффективность применения второго препарата Микрозим (tm) «ПОНД ТРИТ» также подтверждается снижением концентрации азота в обрабатываемой пробе. Прозрачность раствора повышается в 2—2,5 раза. При этом дополнительная аэрация приводит к ускорению процесса деструкции, сокращая время воздействия в 1,5—2 раза.

При сравнении трёх вариантов рекультивации загрязнённого участка лесной территории получен экономический эффект применения новой технологии двухэтапной биодеструкции энзимами, который составляет CF = 5 710 393 руб., что в 9 раз дешевле применения рекультивации механизированным способом с использованием тяжёлой техники.

Список литературы

1. Использование и охрана водных ресурсов в лесном комплексе. Расчёт водопроводной сети рабочего посёлка: Учеб. пособие по выполнению курсовой работы студ. спец. 250401 «Лесоинженерное дело» очной и заочной форм обучения / О. В. Болотов [и др.]; Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет». Красноярск, 2010. 84 с.
2. Лесной кодекс Российской Федерации (с изм. на 02 июля 2021 г.) (редакция, действующая с 01 сентября 2021 г.) 200-ФЗ / Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации. М., 2006. 102 с.
3. Ранникко П., Варис Э., Пийптонен М. Койвусельга. Социальная трансформация лесозаготовительного посёлка в российской Карелии / пер. с фин. яз. Ю. М. Килина // *Studia Humanitatis Borealis*. 2016. № 2 (7). С. 32—47.
4. Александров В. А. Механизация лесосечных работ в России. СПб.: СПбЛТА, 2000. 286 с.

5. Сюнёв В. С., Графова Е. О. Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду // *Resources and Technology*. 2022. Т. 19, № 2. С. 48–71.
6. Питина И. А. К разработке рекомендаций по восстановлению загрязнённых неочищенными сточными водами земель // *Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: Сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф., Краснодар, 27—29 марта 2018 г. / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»*. Краснодар, 2018. С. 35—38.
7. Ворончихина Е. А. Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты: монография. Пермь, 2010. 165 с.
8. Арцимович П. М., Казарян В. А. Качественный состав поверхностного стока с селитебных территорий крупных городов // *Очистка и использование поверхностного стока с территорий городов и промплощадок: Материалы семинара*. М.: Общество «Знание», 1981.
9. Гаврилова О. И., Соколов А. И. Лесная рекультивация нарушенных земель на Севере: Учеб. пособие / Петрозав. гос. ун-т, Ин-т леса Карел. Науч. центра РАН. Петрозаводск, 2001. 20 с.
10. Загрязнение орошаемых почв и их биологическая очистка / Х. Н. Каримов, З. З. Узаков, Ж. П. Хушмуродов [и др.] // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2021. № 2. С. 34—40.
11. Оценка уровня негативного воздействия на компоненты природной среды несанкционированной свалки у п. Самофаловка Волгоградской области / О. А. Мишустин, С. Б. Хантимирова, В. Ф. Желтобрюхов [и др.] // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 9.
12. Мотылева С. М., Соснина М. О. О накоплении тяжёлых металлов в листьях и плодах различных сортов чёрной смородины в зависимости от фазы вегетации // *Сельскохозяйственная биология. Сер. Биология растений*. 1996. № 1. С. 67—71.
13. Миркин Б. М. Современная наука о растительности. М.: Логос, 2001. 262 с.
14. Климова Е. В. Деградация почвы в результате несбалансированного удобрения // *Экологическая безопасность в АПК: Реферативный журнал*. 2001. № 4. С. 863.
15. Чижов Б. Е., Кулясова О. А. Рекультивация и ремедиация в лесах Западной Сибири: монография. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 222 с.
16. Янкевич М. И. Формирование ремедиационных биоценозов для снижения антропогенной нагрузки на водные и почвенные экосистемы: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: Специальность 03.00.23. Щёлково, 2002. 49 с.

References

1. Bolotov O. V. [et al.]. *Use and protection of water resources in the forest complex. Calculation of the water supply network of a working settlement: a textbook on the implementation of course work by students of the specialty 250401 Forest engineering full-time and part-time forms of education*. Federal Agency for Education, GOU VPO «Siberian State Technological University». Krasnoyarsk, 2010. 84 p. (In Russ.)
2. *Forest Code of the Russian Federation (as amended on July 2, 2021) (edition effective from September 1, 2021) 200-FZ*. State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2006. 102 p. (In Russ.)

3. Ranniko P., Varis E., Piipponen M. Koivuselga. Social transformation of a logging village in Russian Karelia. Translated from Finnish by Yu. M. Kilin. *Studia Humanitatis Borealis*, 2016, no. 2 (7), pp. 32—47. (In Russ.)
4. Aleksandrov V. A. *Mechanization of logging operations in Russia*. Saint Petersburg, SPbLTA, 2000. 286 p. (In Russ.)
5. Syunev V. S., Grafova E. O. New technical solutions to reduce the negative impact of timber industry on the forest environment. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 48—71. (In Russ.)
6. Pitina I. A. On the development of recommendations for the restoration of lands polluted by untreated wastewater. *Ecological problems of the development of agricultural landscapes and ways to increase their productivity: collection of articles based on the materials of the International Scientific Ecological Conference, Krasnodar, 27—29 March 2018*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilina, 2018, pp. 35—38. (In Russ.)
7. Voronchikhina E. A. *Reclamation of disturbed landscapes: theory, technology, regional aspects: monograph*. Perm, 2010. 165 p. (In Russ.)
8. Artsimovich P. M., Kazaryan V. A. Qualitative composition of surface runoff from residential areas of large cities. *Purification and use of surface runoff from the territories of cities and industrial sites: Materials of the seminar*. Moscow, Society «Knowledge», 1981. (In Russ.)
9. Gavrilova O. I., Sokolov A. I. *Forest reclamation of disturbed lands in the North: Proc. Allowance*. Petrozavod. state un-t, Institute of forests of the Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk, 2001. 20 p. (In Russ.)
10. Karimov Kh. N., Uzakov Z. Z., Khushmurodov Zh. P. [et al.]. Pollution of irrigated soils and their biological treatment. *Scientific Review. Biological Sciences*, 2021, no. 2, pp. 34—40. (In Russ.)
11. Mishustin O. A., Khantimirova S. B., Zheltobryukhov V. F. [et al.] Evaluation of the level of negative impact on the components of the natural environment of an unauthorized dump near the village of Samofalovka, Volgograd Region. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 9. (In Russ.)
12. Motyleva S. M., Sosnina M. O. Accumulation of heavy metals in leaves and fruits of various varieties of black currant depending on the phase of vegetation. *Agricultural Biology. Ser. Biology of plants*, 1996, no. 1, pp. 67—71. (In Russ.)
13. Mirkin B. M. *Modern science of vegetation*. Moscow, Logos, 2001. 262 p. (In Russ.)
14. Klimova E. V. Soil degradation as a result of unbalanced fertilizer. *Ecological safety in the agro-industrial complex: Abstract journal*, 2001, no. 4, p. 863. (In Russ.)
15. Chizhov B. E., Kulyasova O. A. *Recultivation and remediation in the forests of Western Siberia: monograph*. Pushkino, VNIILM, 2018. 222 p. (In Russ.)
16. Yankevich M. I. *Formation of remediation biocenoses to reduce the anthropogenic load on water and soil ecosystems, Extended Abstract of Cand. dis. for the competition scientist step. Doctor of Biological Sciences: Spec. 03.00.23*. Shchelkovo, 2002. 49 p. (In Russ.)