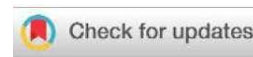


ДК 631.4 630.114.444:577.152.1:631.417 (571.1)

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.297>

Регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима – критерии качества осушенных почв болотных сосняков Западной Сибири

© 2025 Т. Т. Ефремова , С. П. Ефремов , А. Ф. Аврова

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Россия. E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Цель исследования. Построить регрессионные модели связи каталазной активности осушенных почв и водного режима и показать возможность использования моделей для оценки влияния глубины гидромелиорации на лесорастительные свойства торфяных почв.

Место и время проведения. Подзона южной тайги Западной Сибири; за период май – октябрь 2000–2002 гг.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования послужило осушенное 25–30 лет тому назад открытое сфагново-осоково-вахтово-кустарничковое болото, занятое сосняками естественного происхождения (географические координаты 56°23' с.ш., 84°34' в.д.). Уровень почвенно-грунтовых вод, влажность, каталазную активность торфяных почв изучали в сезонной динамике в течение 2000–2002 гг. с мая по октябрь с шагом 5–8 дней. В преобладающих ассоциациях напочвенного растительного покрова каждого типа леса (осоково-сфагновом, вейниковом и разнотравно-крапивном) закладывали почвенные шурфы глубиной около 50 см, извлекали торфяные монолиты, дифференцировали профиль на горизонты 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см (по концентрации живых корней, цвету, плотности слоения) и формировали средние образцы согласно выделенным глубинам. Каталазную активность определяли в свежесобранных (сырых) образцах перманганатометрическим методом.

Основные результаты. Чрезмерное иссушение, как и избыточная влажность, снижают ферментативную активность и лесорастительные свойства почв. В режиме умеренного осушения отмечается самый высокий уровень каталазной активности – фактора, способствующего гумификации органического вещества, формированию устойчивого гумуса (гуматного типа), сохранению необходимых запасов биогенных элементов и формированию достаточно высоких среднегодовых приростов качественной древесины.

Заключение. Построены высоко значимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка, которые могут стать основой для разработки приемов управления гумусным состоянием, повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по рациональному лесохозяйственному освоению болот.

Ключевые слова: мезотрофные болота; торфяные почвы; регрессионный анализ; оценка статистических моделей; гумусное состояние; биогенные элементы; запасы и качество древесины.

Цитирование: Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима – критерии качества осушенных почв болотных сосняков Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e297. DOI: [10.31251/pos.v8i1.297](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.297)

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы заболоченности лесного фонда Западной Сибири достигают 75–76 млн га; около половины – безлесные и слабооблесенные болота, которые нуждаются в содействии естественному и искусственному возобновлению леса (Ефремов, 1967, 1987; Глебов, 1971). Одним из основных приемов стимулирования лесообразовательного процесса является осушительная мелиорация. Сброс избыточной влаги сопровождается не только повышением производительности лесных насаждений, но и глубокой биохимической трансформацией торфяных почв. Неудачно выбранный тип и интенсивность гидромелиорации может спровоцировать крайне нежелательные последствия. Показано, что глубокое осушение влечет за собой непроизводительное сгорание органического вещества и деградацию торфяной залежи, так как сопровождается повышенной эмиссией CO₂, активным образованием подвижных минеральных и органических соединений, которые активно выносятся за пределы торфяной залежи дренажными водами (Вомперский, 1968; Ефремова, 1975; Зименко, 1977; Мелентьева, 1980; Ефремова, Мелентьева, 1981; Переверзев, 1987; Бамбалов и др., 2000; Инишева, Дементьева, 2000; Gianfreda, Bollag, 1996; Leifeld et al., 2020; Lasota, Błńska, 2021).

Однако одни и те же приемы производственной лесохозяйственной деятельности оказывают дифференцированное воздействие в различных почвенно-экологических сочетаниях и климатических

зонах. Поэтому крайне важно уметь заранее оценить интенсивность воздействия, приводящего не только к повышению продуктивности древесного яруса, но и к совершенствованию лесорастительных условий. Такая возможность создается в процессе количественной оценки взаимосвязи различных факторов среды. В первую очередь это относится к почвенному покрову как основному средству производства в сельском и лесном хозяйстве. Постоянное совершенствование и рационализация приемов повышения растительного потенциала почв необходимо признать в качестве главного принципа природопользования (Мигунова, 2001). Антропогенные факторы существенно влияют на все свойства почвы и выступают в качестве важного регулятора ее ферментативной активности (Хазиев, 1982). Осуществляя сложную цепь синтетико-деструктивных преобразований органического вещества, ферментативная активность микроорганизмов служит одним из чувствительных показателей трансформации почв, как в процессе естественной эволюции, так и под воздействием антропогенных факторов. Поэтому показатели ферментативной активности рекомендуется использовать в почвенно-мониторинговых исследованиях (Хазиев, 1982, 2018; Ефремова, Овчинникова, 2007; Dick et al., 1996; Karaca et al., 2010; Kujur, Patel, 2014).

Степень преобразования органических остатков связана с участием различных классов ферментов. Выбор того или иного фермента определяется характером антропогенного фактора и задачами исследований. Гидромелиорация сопровождается, в первую очередь, улучшением условий аэрации и развитием окислительных процессов. Поэтому для решения перечисленных задач выбраны ферменты класса оксидоредуктаз, среди которых к числу наиболее широко распространенных и достаточно изученных относится каталаза. Многочисленные библиографические сводки указывают: каталазная активность почв связана с ботаническим составом торфов, общей численностью основных групп микроорганизмов, состоянием органического вещества, характеризует интенсивность выделения CO_2 , биохимических и ферментативных процессов, отражает уровень потенциального плодородия и служит показателем качества почв (Купревич, Щербакова, 1966; Ефремова и др., 1978; Щербакова, 1983; Дырин, 2009; Ефремова и др. 2006; Инишева и др., 2007; Киреева и др., 2008; Мелехина и др., 2015; Наумова и др., 2018; Леонова и др., 2020; Арзамазова и др., 2023; Инишева и др., 2024; Wallenstein et al., 2009; Blońska, 2010; Baldrian, Stursova, 2011; Brockett et al., 2012; Burns et al., 2013; Bobuľská et al., 2015; Alves et al., 2021). Перечисленные функции создают все предпосылки использования каталазной активности почв в мониторинговых исследованиях.

В настоящее время темпы лесохозяйственного освоения болот посредством осушительной мелиорации в Западной Сибири значительно сократились. Однако ускоренное экономическое развитие этой территории требует оперативных решений по повышению продуктивности малоценных земель, болотных и заболоченных лесов. Обоснована идея поэтапно-дифференцированной, ограниченно-целевой (выборочной) осушительной мелиорации территории Западной Сибири с целью производственной лесохозяйственной деятельности (Ефремов, 1987). С позиций рационального природопользования требуются научно аргументированные предсказания предстоящих изменений в осушаемых экосистемах болот. Ранее, используя метод главных компонент, дискриминантный анализ и каноническую корреляцию на основании совокупности показателей: физико-химических (уровень болотных вод, объемная влажность, температура почв, pH, окислительно-восстановительный потенциал), химических (воднорастворимые Fe^{2+} , Fe^{3+} , Fe, связанное с органическим веществом, C, NH_4^+) и активности оксидоредуктаз (каталаза, пероксидаза и анаэробная дегидрогеназа) установлено, что наиболее точная диагностика торфяных почв по степени осушения (почти 90%) осуществляется совокупностью физико-химических показателей (Ефремова и др., 2006). Наибольший вклад в предсказание вносят уровни стояния вод (F -критерий = 437,6) и объемная влажность (F -критерий = 43,3), то есть водный режим.

В данном контексте цель настоящей работы – построить регрессионные модели связи каталазной активности осушенных почв и водного режима и показать возможность использования моделей для оценки влияния глубины гидромелиорации на лесорастительные свойства торфяных почв.

Постановка задач в свете поставленной цели:

- оценить параметры модели,
- построить доверительные интервалы параметров,
- проверить гипотезу о значимости регрессии,
- оценить степень адекватности модели,
- выполнить анализ остатков,
- описать ошибку аппроксимации.

Полученные результаты могут быть основой, базой при разработке и оперативном прогнозе последствий гидромелиоративных мероприятий, направленных на повышение лесорастительного потенциала болот и плодородия осушенных торфяных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужило осушенное 25–30 лет тому назад открытое сфагново-осоково-вахтово-кустарничковое болото в пределах южнотаежной подзоны Западной Сибири, занятое сосняками естественного происхождения (географические координаты 56°23' с.ш., 84°34' в.д.). Осушенный массив сложен сетью мелких открытых каналов (ширина 40–45 см, глубина около 40 см) с различным междренним расстоянием. Растительность, как известно, своим составом и продуктивностью служит индикатором условий среды. Метод фитоиндикации являет собой экосистемный принцип оценки качества типов местообитаний на основе сопряженного изучения почв и растительности (Мигунова, 2001). Руководствуясь этими представлениями, выделили три типа сосняков – осоково-сфагновый, вейниковый и разнотравно-крапивный. В пространстве мелиоративной сети осоково-сфагновый сосняк сформировался на 96-метровой межканальной полосе. В напочвенном растительном покрове доминируют: сфагнум узколистый (*Spagnum angustifolium* C. Jens.), аулакомниум болотный (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr.), осока двутычинковая (*Carex diandra* Schrank), вздутая (*C. rostrata* Stokes), магелланская (*C. magellanica* Zam). Сосняк вейниковый занимает участок 47-метровой межканальной полосы. Господствующие виды напочвенного покрова: вейник пурпурный (*Calamagrostis purpurea* (Trin.) Trin.), незамеченный (*C. neglecta* (Erhr.) Laertn.), мятлик болотный (*Poa palustris* Z.). Сосняк разнотравно-крапивный расположен на стыке магистрального и ловчего каналов с расстоянием между ними 20–25 м. В напочвенном покрове преобладают: крапива двудомная (*Urtica dioica* Z.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (Z.) Maxim.), василисник простой (*Thalictrum simplex* Z.), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia* Z.).

Лесная растительность дифференцирует типы местообитаний на классы бонитета по трофности лесорастительных условий. Одновозрастные 26-летние сосновые насаждения, исходя из линейной высоты древостоев, разграничиваются следующим образом. Сосняки разнотравно-крапивные I–Ia, вейниковые – II–I, осоково-сфагновые – III–II класс бонитета (табл. 1). В соответствующих почвах глубокой и умеренной гидромелиорации относительно слабой валовые запасы биогенных элементов в зоне ризосферы выше: P_2O_5 – в 2,7 и 2,5, K – 1,8 и 1,6, N – в 3,7 и 3,4 раза. Систематизированные сведения о почвенно-гидрологическом, фитоценоотическом и таксационном разнообразии болотных сосняков северной части междуречья Оби и Томи содержатся в наших текущих публикациях (Ефремов и др., 2024а, б).

Таблица 1

Таксационные показатели осушенных болотных сосняков мезотрофного ряда развития

Состав древостоя	Число стволов/га	Пол- нота	Средние			Запас древесины, м³/га	Среднегодовой прирост, м³/га	Класс бонитета
			высота, м	диаметр, см	возраст, лет			
Слабо осушенный сосняк осоково-сфагновый								
8С2Б	2270	0,91	9,4	11,5	26	113,5	3,4	III–II
Умеренно осушенный сосняк вейниковый								
9С1Б	1818	0,96	10,3	13,6	26	154,5	4,3	II–I
Интенсивно осушенный сосняк разнотравно-крапивный								
8С2Б	1174	0,79	12,1	15,7	26	150,3	5,1	I–Ia

Современные почвы 0–30 см (верхний биологически активный слой выше средневегетационного уровня болотных вод) формируются на мощной (3–5 м) торфяной залежи, сложенной осоково-сфагновыми торфами в верхнем метровом слое. Объемная масса торфяных почв (Histosols) в режиме слабого осушения составила 0,092–0,099, умеренного – 0,113–0,132, интенсивного – 0,102–0,145 г/см³, зольность – 4,10–14,19, 4,73–15,99 и 4,85–15,72%. Запасы биогенных элементов в зоне ризосферы (0–20 см) соответственно: N – 1500, 5140 и 5590 кг/га, P_2O_5 – 370, 940 и 1000, K_2O – 110, 180 и 200 кг/га.

Уровень почвенно-грунтовых вод (УПГВ), влажность, каталазную активность торфяных почв изучали в сезонной динамике в течение 2000–2002 гг. с мая по октябрь с шагом 5–8 дней. За этот период в каждой почве – слабого, умеренного и глубокого осушения – обработано от 14 до 19 сроков наблюдений. В преобладающих ассоциациях напочвенного растительного покрова каждого типа леса

(осоково-сфагновом, вейниковом и разнотравно-крапивном) закладывали почвенные шурфы глубиной около 50 см, обычно не менее пяти. Извлекали торфяные монолиты размером около 40×40×40 см, дифференцировали профиль на горизонты 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см (по концентрации живых корней, цвету, плотности сложения) и формировали средние образцы согласно выделенным глубинам. Почвы помещали в холодильник. На другой день в свежесобранных (сырых) образцах в двух весовых повторностях определяли активность каталазы методом Джонсона и Темпле (Хазиев, 2005). К навеске 0,5–2 г (минимум в горизонтах слоя 0–10 см) приливали 40 мл дистиллированной воды, вносили 5 мл 0,3% H_2O_2 . Колбу встряхивали на ротаторе в течение 20 мин. Нерасщепленную часть перекиси стабилизировали добавлением 5 мл 3 н. H_2SO_4 и фильтровали через плотный фильтр. Аликвоту 10 мл титровали 0,1 н. раствором KMnO_4 до слабо-розовой окраски, устойчивой в течение 1 минуты по секундомеру. Корректировку результатов выполняли контролем на чистоту реактивов. Анализ выполняли в 2-х весовых повторностях и выражали в мл 0,1 н. KMnO_4 на 1 г абсолютно сухой почвы за 20 минут. Плотность сложения торфяного субстрата определяли методом режущего кольца, влажность – термостатно-весовым методом. Валовой химический анализ и состав органического вещества выполнен однократно в образцах осеннего срока отбора по общепринятым в почвоведении методам: азот – по Кьельдалю, фосфор – по Дениже, калий – на пламенном фотометре, состав органического вещества по методике Пономаревой, Николаевой (Агрохимические методы..., 1975; Пономарева, Николаева, 1961). Построение и оценка пригодности регрессионных моделей выполнена в соответствии с руководством (Дрейпер, Смит, 1986).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенно-грунтовые воды в течение периода наблюдений ближе всего к поверхности поднимались в мае и раннелетнем сроке наблюдений (рис. 1 А). В течение лета последовательно опускались до максимального глубокого уровня стояния в августе-сентябре, в октябре наблюдался некоторый подъем. Сообразно уровню почвенно-грунтовых вод варьировала объемная влажность торфяных почв, чем ближе к поверхности уровень стояния, тем выше обводненность (рис. 1 Б). Показатели достоверно со средней теснотой взаимосвязаны ($r = -0,54$).

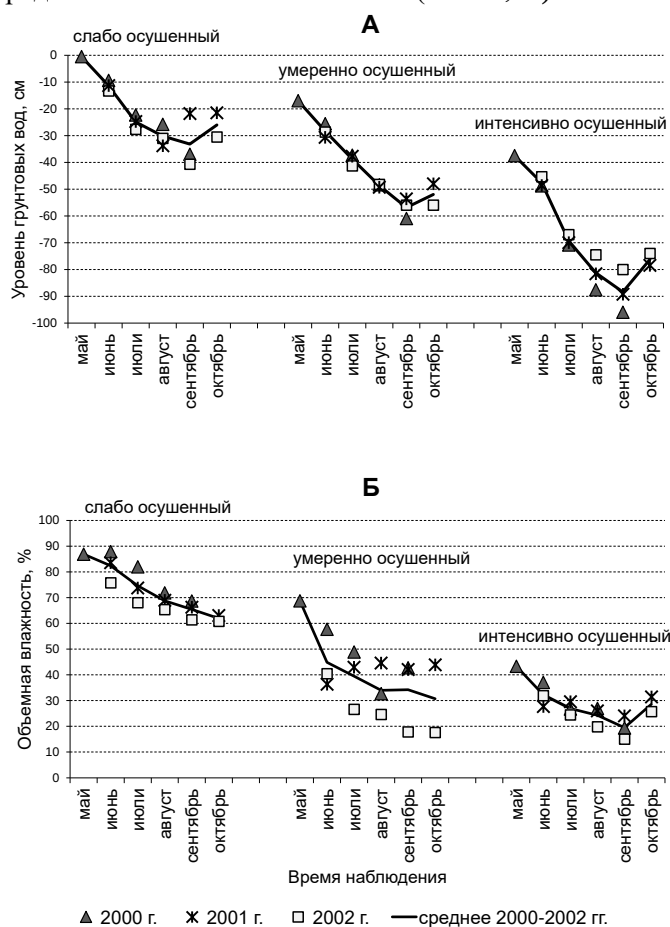


Рисунок 1. Водный режим осушенных торфяных почв за три года наблюдений в течение мая–октября: А – уровни стояния почвенно-грунтовых вод, см; Б – объемная влажность почв, %.

За три года наблюдений в сосняках осоково-сфагновых, вейниковых и разнотравно-крапивных среднемноголетний уровень стояния почвенно-грунтовых вод за теплый период составил 23, 42 и 70 см, объемная влажность – 77,4, 41,7, 28,7% соответственно (табл. 2). На основании показателей водного режима почвы осоково-сфагнового сосняка классифицировали как слабо осушенные, вейникового – умеренно и разнотравно-крапивного сосняка – интенсивно осушенные. Наибольшей каталазной активностью в слое 0–30 см за период наблюдений отличались торфяные почвы в режиме умеренной гидромелиорации – в среднем 17,3 мл 0,1 н. KMnO_4 на 1 г абсолютно сухой почвы за 20 минут. Чрезмерное иссушение почв снижает активность каталазы несколько более, чем избыточная влажность, составляя 75 и 80 % относительно умеренно осушенных почв. С глубиной активность каталазы заметно снижалась, в горизонтах 20–30 см по сравнению с поверхностными она была в 2 раза ниже.

Таблица 2

Уровни почвенно-грунтовых вод, объемная влажность и каталазная активность лесных торфяных почв (0–30 см), средние за три года наблюдений

Параметры водного режима	Степень осушения		
	слабая	умеренная	интенсивная
Уровень почвенно-грунтовых вод, см	$\frac{6-43}{23}$	$\frac{20-60}{42}$	$\frac{40-100}{70}$
Объемная влажность, %	$\frac{49,2-90,7}{77,4}$	$\frac{24,3-54,8}{41,7}$	$\frac{21,2-34,7}{28,7}$
Активность каталазы, единиц	$\frac{10,6-19,1}{13,9}$	$\frac{12,2-33,6}{17,3}$	$\frac{9,2-16,7}{13,0}$

Примечание.

Единиц – мл 0,1 н. KMnO_4 / 1 г $\times$ 20 минут; над чертой – варьирование, под чертой – среднее.

В соответствии с целью настоящего сообщения рассмотрим регрессионную связь каталазной активности осушенных почв и глубины почвенно-грунтовых вод, объединив в один массив данные по всем уровням осушения за три года наблюдений. Зависимость аппроксимируется уравнением параболы второго порядка (рис. 2 А).

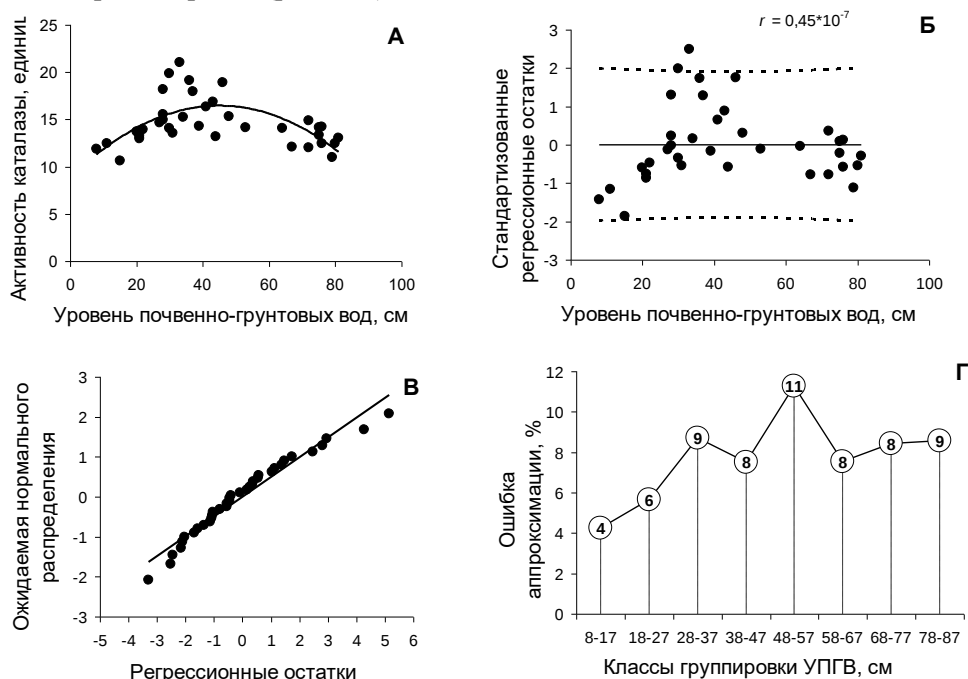


Рисунок 2. Диаграммы оценки пригодности регрессионной модели каталазной активности осушенных торфяных почв и уровней почвенно-грунтовых вод: А – теоретическая линия регрессии и рассеивания данных, Б – гомоскедастичность остатков, В – вероятность нормального распределения, Г – ошибки аппроксимации по классам группировки предиктора.

Высокой значимости модели (F -критерий – 670, $p < 0,001$) соответствует коэффициент детерминации (R^2) – 0,42, который измеряет качество построенной регрессии и долю разброса относительно среднего значения (табл. 3). Регрессионные коэффициенты являются высоко значимыми на уровне $p < 0,001$. Доверительные интервалы, которые задают область вокруг средних значений коэффициентов уравнения, показывают диапазоны, внутри которых содержится истинное среднее с вероятностью 95%. Адекватность (точность) регрессионных моделей оценили с помощью анализа остатков (разностей между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по регрессионному уравнению). В случае правильно подобранной модели вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются нормально-распределенными случайными величинами, не зависят от предиктора и у них отсутствует автокорреляция. Проверку допущения о постоянной дисперсии остатков выполнили с помощью диаграммы разброса стандартизованных остатков относительно предиктора (рис. 2 Б). Остатки примерно одинаково принимают как положительные, так и отрицательные значения, не проявляют тенденции к росту с увеличением уровня почвенно-грунтовых вод и не обнаруживают с ними выраженной зависимости ($r = 0,45 \times 10^{-7}$). Основная масса стандартизованных остатков находится в диапазоне $-2 \dots +2$, т.е. 95% от числа всех вариантов совокупности, что отвечает параметрам нормального распределения. Построены также диаграммы вероятностей нормального распределения (рис. 2 В).

Таблица 3

Оценка регрессионных моделей связи каталазной активности и гидрологического режима осушенных торфяных почв по типу квадратичной параболы ($y = a + bx + cx^2$)

Аргументы и регрессионные коэффициенты	Статистические параметры			
	значение	p -уровень	границы 95% доверительного интервала	
			нижняя	верхняя
Уровень почвенно-грунтовых вод:				
a	8,85	0,000005	5,53	12,17
b	0,338	0,000159	0,177	0,500
c	-0,0038	0,000055	-0,0054	-0,0021
Оценка регрессионной модели: $R^2 = 0,42$, F -критерий = 670, p -уровень <0,001				
Объемная влажность:				
a	3,21	0,075	-0,34	6,77
b	0,53	<0,001	0,36	0,70
c	-0,005	<0,001	-0,0069	-0,0034
Оценка регрессионной модели: $R^2 = 0,56$, F -критерий = 723, p -уровень <0,001				

Остатки лежат или на линии нормального распределения, или вплотную приближаются к ней. Можно утверждать, что условие нормального распределения ошибок нарушается незначительно, то есть остатки гомоскедастичны. Таким образом, оценка ошибок аппроксимации остатков дает основание констатировать: условие применения регрессионного анализа (метода наименьших квадратов) выполняется и модель вполне адекватно описывает данные. Следовательно, с ее помощью возможно строить достаточно надежные выводы о зависимости активности каталазы и уровней почвенно-грунтовых вод. Регрессионная модель построена в диапазоне уровней почвенно-грунтовых вод 11–81 см и может быть применима только к этим интервалам значений.

О качестве уравнения регрессии можно судить и по средней относительной ошибке аппроксимации, которая вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \times \sum \left| \frac{y - yp}{y} \right| \times 100\%$$

где $\bar{A}$ – средняя относительная ошибка аппроксимации, %; y – аналитические данные; yp – их расчетные значения; $|y - yp|$ – величины, соответствующие модулю; n – число наблюдений. Значения средней относительной ошибки аппроксимации в пределах 10% свидетельствует о хорошем соответствии линии регрессии исходным аналитическим данным (Елисеева и др., 2003).

Для более четкой интерпретации ошибок прогноза каталазной активности показатели гидрологического режима с помощью «Сводной таблицы» в Excel сгруппировали в классы и рассчитали в них среднюю ошибку аппроксимации. Чем выше к поверхности залегают почвенно-грунтовые воды, тем выше точность предсказанных значений (рис. 2 Г). В среднем ошибка аппроксимации составляет 7,9%, что соответствует хорошей точности прогноза.

Регрессионная модель связи каталазной активности почв и объемной влажности построена по средним данным слоя 0–30 см за три года наблюдений в течение мая–октября. Регрессионная связь каталазной активности почв и объемной влажности аппроксимируется уравнением параболы второго порядка (рис. 3 А, табл. 3). Высокой значимости модели (F -критерий – 723, $p < 0,001$) соответствует коэффициент детерминации (R^2) – 0,56. Регрессионные коэффициенты являются высоко значимыми, свободный член (константа) – на уровне 0,075.

Вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются нормально-распределенными случайными величинами, не зависят от предиктора и у них отсутствует автокорреляция (рис. 3 Б, В). Ошибка аппроксимации каталазной активности осушенных торфяных почв по объемной влажности, изменяясь в пределах 4–13%, составляет в среднем 8,2% и соответствует хорошей точности прогноза (рис. 3 Г). Регрессионная модель построена в диапазоне объемной влажности 13–82% и может быть применима только к этим интервалам значений.

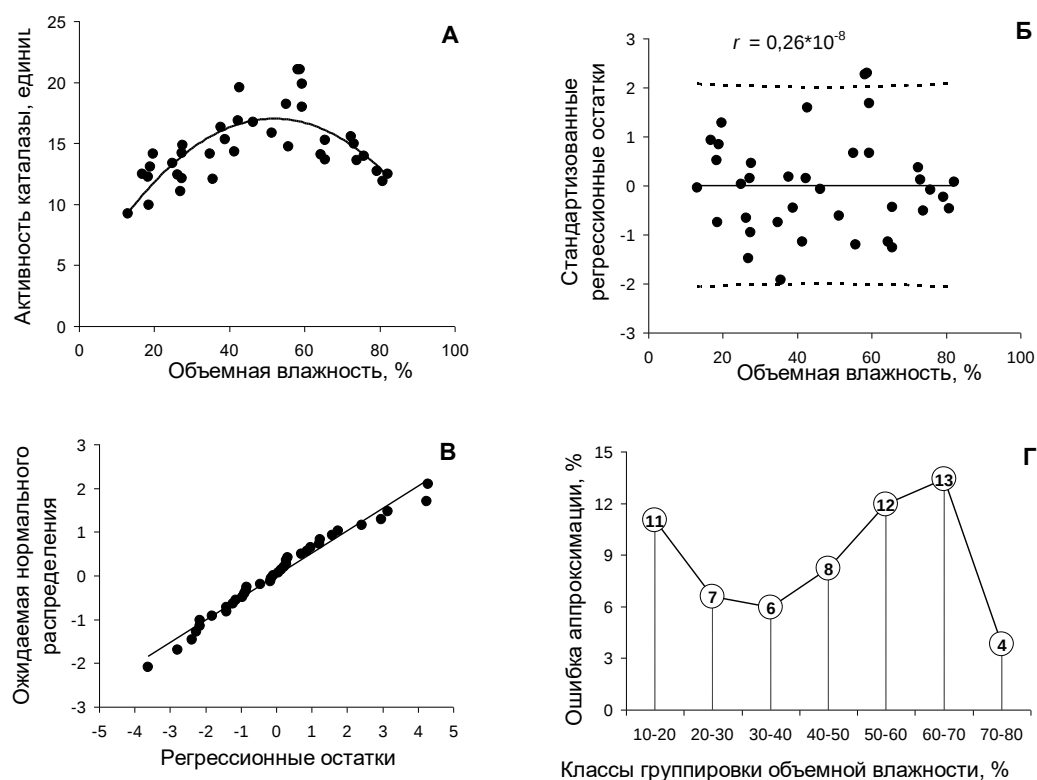


Рисунок 3. Диаграммы оценки пригодности регрессионной модели каталазной активности и объемной влажности осушенных торфяных почв. Условные обозначения А–Г см. рис. 2.

Рассчитанная максимальная точка экстремума УПГВ – 44 см, соответствующая ей каталазная активность почв 16,7 единиц, предсказанная на основании коэффициентов регрессии, вполне сопоставима со средними за период наблюдений экспериментальными данными почв умеренного осушения: УПГВ – 42 см, каталазная активность – 17,3 единицы (табл. 2). Максимальная точка экстремума объемной влажности – 52% и сопутствующая ферментативная активность почв – 33 единицы также приурочены к режиму умеренного осушения и вплотную приближаются к наибольшим значениям обсуждаемых признаков за сезон – 54,8% и 33,6 единиц.

Неплохое совпадение предсказанных и эмпирических данных объективно подтверждает, что наиболее благоприятный водный режим для развития каталазной активности осушенных торфяных почв создается в случае умеренной гидромелиорации. Каталазная активность почв возрастает по мере снижения УГВ до уровня 44 см и 52% объемной влажности. Дальнейшее опускание почвенно-грунтовых вод и увеличение влажности почв сопровождается падением ферментативной активности,

т.е. чрезмерное иссушение, как и повышенная влажность торфяного субстрата, снижают активность каталазы.

Установлено, что каталазная активность, наряду с гидрологическими условиями, связана с отношением C/N (рис. 4 А). Высокой значимости модели ($p < 0,001$) по типу квадратичной параболы соответствует $R^2 = 0,64$, характеризующий среднюю тесноту связи. Согласно рисунку, по мере расширения отношения C/N в пределах 17,7–43,6 визуально наблюдается ускоренное падение активности каталазы, что объективно подтверждается знаками регрессионных коэффициентов b и c .

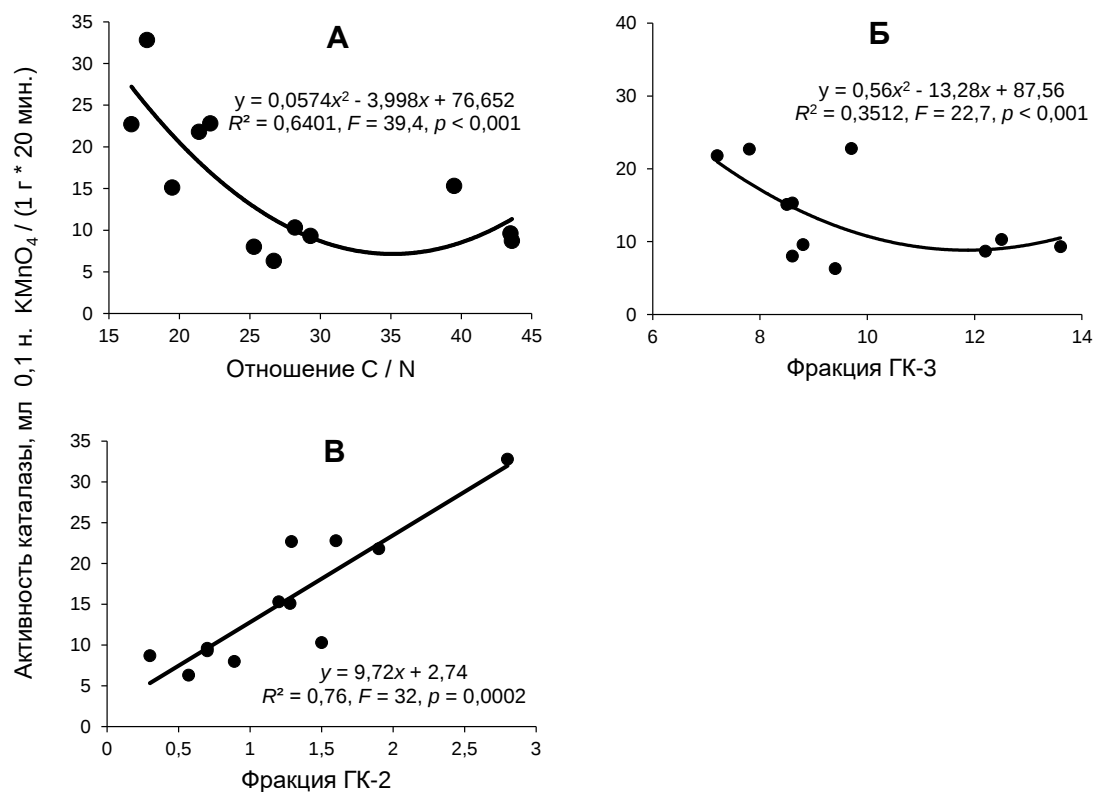


Рисунок 4. Регрессионная связь каталазной активности осушенных торфяных почв и биохимических показателей: А – отношение C/N; Б – содержание гуминовых кислот 3-й фракции, % к Собщ.; В – содержание гуминовых кислот 2-й фракции, % к Собщ.

Каталазная активность почв и отношение C/N рассматриваются в качестве интегрирующих показателей функциональной активности микрофлоры в различных экологических условиях (Аристовская, 1965; Козловская, 1976; Щербакова, 1983; Мелехина и др., 2015; Наумова и др., 2018; Skujins, 1976; Dick et al., 1996; Bobuřská et al., 2015). Кинетика каталазы в профиле осушенных торфяных почв четко разграничивается на две области: 0–10 см – высокоинтенсивную, сосредоточение живого населения почвы и 10–30 см – биологически менее активную. В обсуждаемых сосняках мезотрофного ряда развития верхние 10 см почв вмещают основную массу микроорганизмов – преимущественно неспоровых флюоресцирующих бактерий и плесневых грибов, почвенных животных – панцирных клещей, олигохет, личинок Diptera, а также физиологически активных корней растений (Загуральская, 1967; Ефремов и др., 1972; Ефремов, Ефремова, 1973; Козловская, 1976). Показано, что микробы начинают беспрепятственно заселять органические остатки в диапазоне C/N 30–20 и чем уже отношение, тем интенсивнее микробиологическая деятельность (Козловская, 1976). В профиле торфяных почв (0–30 см) слабого, умеренного и глубокого осушения средняя величина C/N составляет 37, 26 и 21, соответственно. На основании оценок скорости освоения растительных остатков, микробиологическую активность торфяных почв косвенно можно охарактеризовать как сравнительно низкую, среднюю и высокую. То есть, наибольшая каталазная активность умеренно осушенных почв сочетается со средним уровнем их микробиологической активности. С определенной долей вероятности допускаем, что в осушенных почвах сосняков, густо заселенных вейниками и мятликом, преобладающее значение в происхождении каталазной активности имеет корневая система этих растений. Установлено, что каталитическая активность торфяных почв обусловлена не только ферментами микробного метаболизма, но и каталазой растительного происхождения – корневыми

системами при их жизни, а также отмершими клетками высших растений и растений-торфообразователей (Купревич, Щербакова, 1966).

Уровень ферментативной активности почв, который фиксируется в текущий момент времени, создается не за один год, а является результатом всего предшествующего периода развития почвы, истории освоения и характеризует запас ее биологических возможностей (Щербакова, 1983). Каталаза может участвовать в реакциях, в ходе которых окислению подвергаются различные восстановленные соединения (Купревич, Щербакова, 1966). Донором водорода, в частности, могут служить гуминовые кислоты, пептизируемые 0,02 н. раствором NaOH на водяной бане (фракция ГК-3) как наиболее восстановленные соединения в системе гумусовых кислот торфяных почв (Ефремова, 1992). Согласно рисунку 4 Б, каталазная активность осушенных почв и гуминовые кислоты третьей фракции с высокой значимостью взаимосвязаны по типу квадратичной параболы. Благодаря высокоактивному кислороду в процессе разложения перекиси (при участии фермента) содержание ГК-3 снижается с ускорением (см. знаки коэффициентов b и c в регрессионном уравнении). В качестве окисленной формы можно назвать гуминовые кислоты, выделяемые 0,1 н. щелочью после декальцинации (фракция ГК-2), которые с высокими уровнем значимости и теснотой положительно линейно связаны с каталазной активностью почв (рис. 4 В).

Многочисленные сведения указывают, что в почве большая часть ферментов находится в виде комплексов с гумусовыми соединениями. По мнению Д.С. Орлова (1990), с биологической активностью почвы непосредственно связан групповой состав гумуса. Самое высокое содержание гуминовых кислот – 30,53% и фульвокислот (ФК) – 22,72% содержится в профиле интенсивно осушенных почв (табл. 4). Относительно этих показателей в умеренно осушенных почвах содержание ФК падает на 22, а ГК – 7%; в условиях слабого – на 30 и 42 %, соответственно. Исходя из отношения Сгк/Сфк – 1,7, наиболее устойчивый гуматный тип гумуса образуется в режиме умеренной гидромелиорации. В условиях интенсивного осушения фульватно-гуматный тип – Сгк/Сфк – 1,4, слабого гуматно-фульватный – Сгк/Сфк – 1,1. Преимущественному образованию гуминовых кислот сопутствует наиболее высокая каталазная активность умеренно осушенных торфяных почв. Гуминовые кислоты как аккумулятивные компоненты гумуса служат показателем протекающих процессов почвообразования (Дергачева, 2018).

Таблица 4

Групповой состав органического вещества и запасы гумуса осушенных торфяных почв болотных сосняков, % к Собщ.

Глубина горизонтов, см	Гумусовые кислоты				Полисахариды			Гумин	Запасы гумуса, т/га
	ГК	ФК	ГК+ФК	Сгк/Сфк	гемицел- люлозы	целлю- лоза	Сумма		
Слабо осушенные									
0–5	17,65	19,58	35,63	0,90	13,43	19,42	32,85	22,6	51,6
5–10	17,4	16,43	32,62	1,06	12,29	19,3	31,6	27,49	45,28
10–20	19,32	14,09	32,43	1,37	11,23	16,98	28,22	30,56	49,36
20–30	16,02	13,28	28,4	1,21	10,88	16	26,88	34,41	45,1
0–30	17,60	15,85	32,27	1,13	11,96	17,93	29,89	28,77	47,84
Умеренно осушенные									
0–5	27,87	23,87	49,23	1,17	7,59	10,2	17,79	23,91	95,12
5–10	28,44	17,79	44,51	1,60	10,53	9,96	20,49	25,84	97,6
10–20	29,08	15,25	42,9	1,91	9,74	10,55	20,29	27,1	89,16
20–30	28,1	14,3	41	1,97	10,38	14,12	24,5	23,81	81,1
0–30	28,37	17,80	44,41	1,66	9,56	11,21	20,77	25,17	90,75
Интенсивно осушенные									
0–5	29,29	26,06	52,61	1,12	7,81	12,74	20,55	17,77	104,52
5–10	31,86	23,19	52,94	1,37	8,51	12,32	20,84	18,78	103,16
10–20	29,86	21	49,07	1,42	9,59	13,8	22,39	21,61	89,66
20–30	31,09	20,64	50,04	1,51	8,46	13,43	21,89	21,67	93,14
0–30	30,53	22,72	51,17	1,36	8,59	13,07	21,42	19,96	97,62

Примечание.

ГК – гуминовые кислоты, ФК – фульвокислоты, Сгк/Сфк – отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот, гумин – нерастворимый и негидролизуемый остаток, запасы гумуса – слой 0–20 см.

Активному формированию фульвокислот способствуют энергичные микробиологические процессы в интенсивно осушенных почвах, судя по самому узкому отношению C/N. В условиях

слабого осушения, за пределами благоприятных условий жизнедеятельности микроорганизмов, наиболее низкий уровень гумификации сопровождаются примерно равным образованием гуминовых и фульвокислот. Другие показатели группового состава органического вещества изменяются пропорционально глубине гидромелиорации торфяных почв. Относительно слабо осушенных почв в режиме интенсивного повышается степень гумификации в 1,6, запасы гумуса в 2 раза и снижается в 1,4 раза количество полисахаридов – показателей интенсивности минерализации. Наиболее важной является информация о запасах гумуса – важного критерия плодородия почв. В умеренно осушенных почвах они мало уступают максимальному содержанию гумуса в условиях интенсивной гидромелиорации (97,62 т/га), составляя к их уровню 93%.

Интенсивное осушение торфяных почв сопровождалось, как показано выше, активным формированием фульвокислот, которые благодаря высокой растворимости легко мигрируют с дренажными водами за пределы торфяной залежи, снижая потенциальное плодородие почв. Существенные изменения происходят и в минеральной компоненте, но это отдельная тема последующих обсуждений. В настоящем сообщении ограничимся некоторыми итогами. Сильное иссушение способствовало прочному закреплению фосфат-иона окисными соединениями железа и активно формирующимися гумусовыми кислотами, сокращая количество легкоусвояемых форм фосфора. Напротив, происходило значительное образование легкодоступных минеральных форм азота. Запасы аммонийных и нитратных форм достигали в режиме глубокого осушения 130, слабого – 32 кг/га, то есть снижались более чем в 4 раза. В почвенный раствор поступало большое количество конечных продуктов минерализации органического вещества – ионов NO_3^- , HCO_3^- . Гидрокарбонаты, наряду с нитратами, образуя с кальцием легкорастворимые соединения, активно способствовали выносу элемента дренажными водами за пределы торфяной залежи. В результате произошло снижение валового кальция по всему профилю почв, что вызвало смещение величины pH в более кислый интервал. Приведенные оценки условий почвенной среды дают основание оценивать долгосрочный прогноз лесорастительного потенциала интенсивно осушенных почв как неблагоприятный, а высокую продуктивность разнотравно-крапивных сосняков отнести к эфемерной (скоропроходящей).

Другим главным индикатором условий местообитания в лесных экосистемах служит продуктивность древесного яруса. Сосняки вейниковые и разнотравно-крапивные характеризуются близкими запасами 154,5 и 150,3 т/га с некоторым преобладанием в первых. Такое преимущество обусловлено большим числом стволов на гектаре и составом древостоя с меньшим участием березы. Более рельефно производительность сосняков характеризует среднегодовой прирост древесины, который повышается по мере нарастания глубины гидромелиорации. Относительно режима слабого осушения – 3,4 м³/га прирост возрастал в 1,3 и 1,5 раза в условиях умеренной и интенсивной гидромелиорации, соответственно. Однако более высокому темпу прироста древесины в режиме глубокого осушения, как показано выше, сопутствует целый комплекс нежелательных экологических последствий. Кроме того, на сходных объектах ранее выполнены физико-механические испытания древесины сосновых молодняков с целью прогноза формирования древесины с высокими деловыми качествами и выбора оптимального режима мелиорации ее ускоренного созревания (Ефремов, 1987). Древесина на 110-метровой межканальной полосе (режим слабого осушения) оказалась менее пористой и более плотной. Она обладает повышенным пределом устойчивости к механическим нагрузкам в таких видах испытаний как сжатие вдоль волокон и статистический изгиб. У сосновых кряжей на осушенных площадях 60-метровой полосы механические свойства и коэффициенты качества древесины выше, чем у суходолов (за исключением предела прочности при сжатии вдоль волокон). В сосняках на 25-метровой межканальной полосе (интенсивное осушение) предельные нагрузки, вызывающие разрушение древесины, наименьшие. Следовательно, возможность её применения в конструкциях, выполняющих опорные функции, более ограничена, чем древесина, формирующаяся на осушенных болотах слабой и умеренной гидромелиорации.

На основании вышеизложенного, режим умеренной гидромелиорации, который создается 47-метровыми межканальными полосами, следует признать оптимальным с позиции рационального лесосушения мезотрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири. В такой структуре гидромелиоративной сети болотные воды не опускается ниже 42±11 см в среднем за период вегетации. Обеспечивается наибольшая каталазная активность почв, которой сопутствует благоприятный для формирования устойчивого типа гумуса уровень микробиологической активности, сохраняются в должном количестве запасы биогенных элементов, способствующие формированию достаточно высокого среднегодового прироста качественной древесины. В данном контексте, высокая каталазная активность осушенных почв может служить индикатором процессов трансформации условий среды и

показателем лесорастительного потенциала осушенных болот. Построенные регрессионные модели связи каталазной активности и водного режима могут быть использованы для разработки приемов повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по лесохозяйственному освоению болот. Парные регрессионные модели достаточно просты в применении и базируются на показателях, расчеты и измерение которых не требуют больших трудозатрат и длительной аналитической подготовки.

ВЫВОДЫ

1. Построены высокосignимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка, описывающие связь каталазной активности осушенных лесных почв с объемной влажностью (13–82%), а также уровнем почвенно-грунтовых вод (11–81 см). Средняя относительная ошибка аппроксимации 8,3% свидетельствует о хорошем соответствии линии регрессии исходным аналитическим данным. Предсказанные максимальные точки экстремумов глубины стояния почвенно-грунтовых – 44 см – и каталазной активности почв – 16,7 единиц – вплотную приближаются к наибольшим показателям эмпирических наблюдений в режиме умеренного осушения (42 см и 17,3 единицы) в среднем за май–октябрь. Максимальные точки экстремумов объемной влажности – 52% и ферментативной активности почв – 33 единицы – соответствуют наибольшим эмпирическим данным за сезон (54,8% и 33,6 единиц).

2. Близкие значения предсказанных и эмпирических данных обосновывают следующее заключение. Наиболее благоприятный режим лесосушения мезотрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири создается уровнем стояния почвенно-грунтовых вод в среднем на глубине 42 ± 11 см за теплый период, который в пространстве мелиоративной сети обеспечивается 47-метровыми межканальными полосами. В таком режиме гидромелиорации проявляется самый высокий уровень каталазной активности почв, который сочетается с достаточно высоким среднегодовым приростом качественной древесины ($4,3 \text{ м}^3/\text{га}$) и образованием устойчивого (гуматного) типа гумуса, обеспечивающего повышение и сохранение лесорастительного потенциала осушенных почв на длительный период. Режим интенсивной гидромелиорации (УПГВ 70 ± 16 см) торфяных почв, несмотря на сравнительно высокий ежегодный прирост древесины ($5,1 \text{ м}^3/\text{га}$), является в большей мере критическим. Он сопровождается интенсивной минерализацией органического вещества и формированием фульвокислот, которые легко мигрируют с дренажными водами за пределы торфяной залежи, что приводит к непроизводительным потерям торфяной толщи и снижению потенциального плодородия почв. Поэтому высокую продуктивность интенсивно осушенных молодняков сосновых насаждений можно оценить как эфемерную (скоропроходящую).

3. В данном контексте каталазная активность осушенных почв может служить индикатором происходящих при осушении болот процессов, а ее высокая кинетика – показателем предпочтительных для лесовыращивания условий почвенной среды. Высоко значимые парные регрессионные модели на базе полиномов второго порядка могут стать основой для разработки приемов управления гумусным состоянием, повышения и поддержания плодородия торфяных почв при планировании гидротехнических мероприятий по рациональному лесохозяйственному освоению болот.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базового проекта Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Биоразнообразие лесов Сибири: Эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» (проект № FWES-2024-0028).

ЛИТЕРАТУРА

Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.

Арзамасова А.В., Гальцова А.Д., Кинжаев Р.Р., Григорьева И.И. Эффективность применения различных форм азотных удобрений при выращивании злаковых трав на нефтезагрязненной олиготрофной торфяной почве // Проблемы агрохимии и экологии. 2023. № 2. С. 41–47. <https://doi.org/10.26178/AE.2023.51.52.007>

Аристовская Т.В. Микробиология подзолистых почв. Ленинград, 1965. 187 с.

Бамбалов Н.Н., Смирнова В.В., Тановицкий И.Г. Беленький С.Г. Ракович В.А. Современное состояние и перспективы использования торфяного фонда Белоруссии // Природные ресурсы. 2000. № 3. С. 5–15.

Вомперский С.Э. Биологические основы эффективности лесосушения. Москва: Наука, 1968. 312 с.

- Глебов Ф.З. Об улучшении учета гидrolесомелиоративного фонда при лесоустройстве в Западной Сибири // Лесное хозяйство. 1971. № 1. С. 54–60.
- Дергачева М.И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. 292 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. Пер. с англ., 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Дырин В.А. Активность каталазы в торфе целинного и рекультивируемого участков болотной экосистемы низинного типа // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. № 6 (84). С. 121–125.
- Елисеева И.И., Курышева С.В., Костеева Т.В., Бабаева И.В., Михайлов Б.А. Эконометрика. Москва: Финансы и статистика, 2003. 344 с.
- Ефремов С.П. О залесении осушенных болот Томской области // Взаимоотношение леса и болота. Москва: Наука, 1967. С. 141–174.
- Ефремов С.П. Пионерные древостои осушенных болот. Новосибирск: Наука, 1987. 248 с.
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Козловская Л.С., Крапивина Л.А., Мелентьева Н.В. Биологический профиль осушенных торфяных почв Западной Сибири. Москва: Наука, Проспект ВДНХ СССР, 1972. 4 с.
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т. Влияние осушения на загруженность торфяной почвы корнями древесных и травянистых растений // Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией. Новосибирск: Наука, 1973. С. 113–127.
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Седелников М.В. Эффекты радиального прироста болотных сосняков в ракурсе фитосоциальной парадигмы // Сибирский экологический журнал. 2024а. № 5. С. 769–782. <https://doi.org/10.15372/SEJ20240509>
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Седелникова Т.С. Структура пула годичных колец в социумах болотных и суходольных сосняков междуречья Оби и Томи. Сообщение I: методологическое обоснование и лесорастительные условия // Сибирский лесной журнал. 2024б. № 5. С. 3–12. <https://doi.org/10.15372/SJFS20240501>
- Ефремова Т.Т. Формирование почв при естественном облесении осушенных болот. Новосибирск: Наука, 1975. 125 с.
- Ефремова Т.Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // Почвоведение. 1992. № 12. С. 25–35.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Воронков П.Т. Регрессионный анализ ферментативной активности осушенных торфяных почв // Особенности лесо-болотных экосистем Западной Сибири. Красноярск, 1978. С. 111–131.
- Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В. Биологические свойства торфяных почв в связи с гидrolесомелиорацией // Почвоведение. 1981. № 2. С. 117–127.
- Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г. Многопараметрический анализ почвенных свойств лесных осушенных болот Западной Сибири // Почвоведение. 2006. № 6. С. 657–667.
- Ефремова Т.Т., Овчинникова Т.М. Оксидоредуктазная активность торфяных почв как показатель глубины биохимической трансформации лесных осушенных болот Западной Сибири // Известия РАН. Серия биологическая. 2007. № 3. С. 360–366.
- Загуральская Л.М. Микронаселение торфяно-болотных почв Томской области // Взаимоотношение леса и болота. Москва: Наука, 1967. С. 56–81.
- Зименко Т.Г. Микробиологические процессы в мелиорированных торфяниках Белоруссии и их направленное регулирование. Минск: Наука и техника, 1977. 208 с.
- Инишева Л.И., Дементьева Т.В. Скорость минерализации органического вещества торфа // Почвоведение. 2000. № 2. С. 196–203.
- Инишева Л.И., Порохина Е.В., Аристархова В.Е., Боровкова А.Ф. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование. Томск: Изд-во ТГПУ, 2007. 177 с.
- Инишева Л.И., Порохина Е.В., Головченко А.В. Биохимическая активность торфов различного генезиса // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Том 54. № 5. С. 5–16. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-5-1>

- Киреева Н.А., Рафикова Г.Ф., Щемелинина Т.Н., Маркарова М.Ю. Биологическая активность загрязненных нефтью и рекультивируемых торфяно-глеевых почв республики Коми // *Агрохимия*. 2008. № 8. С. 68–75.
- Козловская Л.С. Роль беспозвоночных в трансформации органического вещества болотных почв. Ленинград: Наука, 1976. 211 с.
- Купревич В.Ф., Щербакова Т.А. Почвенная энзимология. Минск: Наука и техника, 1966. 273 с.
- Леонова О.А., Кочаровская Ю.Н., Волкова Е.М. Каталазная активность в торфах различного происхождения // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2020. № 2. С. 65–72.
- Мелентьева Н.В. Почвы осушенных лесных болот. Новосибирск: Наука, 1980. 128 с.
- Мелехина Е.Н., Макарова М.Ю., Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М., Канев В.В. Восстановительные сукцессии биоты в торфяной почве с нефтяным загрязнением при различных методах биологической рекультивации // *Почвоведение*. 2015. № 6. С. 740–750. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15060076>
- Мигунова Е.С. Лесоводство и естественные науки (ботаника, география, почвоведение). Харьков: Издательство «Майдан», 2001. 612 с.
- Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. Москва: Издательство МГУ, 1990. 325 с.
- Наумова Г.В., Жмакова Н.А., Макарова Н.Л., Рассоха Н.Ф., Овчинникова Т.Ф. Энзиматическая активность торфа естественной и разрабатываемой торфяной залежи // *Природопользование*. 2018. № 1. С. 208–216.
- Переверзев В.Н. Биохимия гумуса и азота почв Кольского полуострова. Ленинград: Наука, 1987. 303 с.
- Пономарева Т.А., Николаева В.В. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // *Почвоведение*. 1961. № 5. С. 88–95.
- Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. Москва: Наука, 1982. 203 с.
- Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. Москва: Наука, 2005. 252 с.
- Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв. *Экобиотех.* 2018. Том 1. № 2. С. 80–92. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества (в естественных искусственных фитоценозах). Минск: Наука и техника, 1983. 222 с.
- Alves R.J., Callejas I.A., Marschmann G., Mooshammer M., Singh H.W., Whitney B., Torn M.S., Brodie E.L. Kinetic Properties of Microbial Exoenzymes Vary with Soil Depth but Have Similar Temperature Sensitivities Through the Soil Profile // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Article 735282. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.735282>
- Baldrian P., Stursova M. Enzymes in Forest Soils. In book: *Soil Enzymology*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 61–73.
- Błońska E. Enzyme activity in forest peat soils // *Folia Forestalia Polonica*. 2010. Vol. 52. № 1. P. 20–25.
- Bobuľská L., Fazekašová D., Angelovičová L. Vertical Profiles of Soil Properties and Microbial Activities in Peatbog Soils in Slovakia // *Environmental Processes*. 2015. Vol. 2. P. 411–418. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0073-7>
- Brockett B., Prescott C., Grayston S. Soil Moisture is the Major Factor Influencing Microbial Community Structure and Enzyme Activities Across Seven Biogeoclimatic Zones in Western Canada // *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 44. No. 1. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.003>
- Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Dick R.P., Breakwell D.P., Turco R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In book: *Methods for assessing soil quality*. John W. Doran, Alice J. Jones (ed.). Soil Science Society of America Inc., 1996. P. 9–17.
- Kujur M., Patel A.K. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality // *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2014. Vol. 74. P. 96–104. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100015>
- Karaca A., Cetin S.C., Turgay O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality. In book: *Soil enzymology*. G. Shukla, A. Varma (eds). Vol. 22. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7
- Lasota J., Błońska E. C:N:P stoichiometry as an indicator of Histosol drainage in lowland and mountain forest ecosystems // *Forest Ecosystems*. 2021. Vol. 8 (1). P. 39. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00319-7>

Leifeld J., Klein K., Wüst-Galley Ch. Soil organic matter stoichiometry as indicator for peatland degradation // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Article number: 7634. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64275-y>

Gianfreda L., Bollag J.M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. Book chapter: Soil Biochemistry. Vol. 9. G. Stotzky, J.M. Bollag (ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 1996. P. 123–193.

Skujins J.J. Extracellular enzymes in soil // CRC critical reviews in microbiology. 1976. Vol. 4. No. 4. P. 383–421. <https://doi.org/10.3109/10408417609102304>

Wallenstein M.D., McMahon S.K., Schimel J.P. Seasonal variation in enzyme activities and temperature sensitivities in Arctic tundra soils // Global Change Biology. 2009. Vol. 15 (7). P. 1631–1639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01819.x>

Поступила в редакцию 31.01.2025

Принята 16.04.2025

Опубликована 25.04.2025

Сведения об авторах:

Ефремова Тамара Тимофеевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсосведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); efr2@ksc.krasn.ru

Ефремов Станислав Петрович – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсосведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); efr2@ksc.krasn.ru

Аврова Ада Фёдоровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсосведения Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (г. Красноярск, Россия); avrova@ksc.krasn.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Regression models of catalase activity and water regime as criteria for quality assessing of the drained soils of mire pine forests in West Siberia

© 2025 T. T. Efremova , S. P. Efremov , A. F. Avrova 

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50, build. 28, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

The aim of the study was to evaluate the influence of the depth of wetland hydrological reclamation on the quality of forest conditions by assessing statistically the relationship between the catalase activity of drained soils and environmental factors such as mire water levels, volume humidity, biological activity and soil humus status.

Location and time of the study. The southern taiga subzone of West Siberia for three years during May–October.

Methods. As an object for the study, we chose an open mire occupied by a natural pine forest with sphagnum, sedges and shrubs (56°23' N, 84°34' E) as the ground cover. The mire was drained 25–30 years ago. The level of ground water, moisture content and catalase activity of the peat soils were studied in seasonal dynamics from May till October with an increment of 5–8 days for three years. At the sites of prevailing surface plant cover of each forest type (sedge+sphagnum, reed grass and herbs+grasses+nettle), pits 0–50 cm were cm, peat monoliths taken, and soil profiles differentiated into 0–5, 5–10, 10–20 and 20–30 cm layers, according to soil colour, density and living roots content. Then the soil from the same depth was bulked to comprise a composite sample. Catalase activity was estimated in fresh soil sample by the permanganate technique.

Results. Excessive desiccation, as well as excessive moisture, reduced the enzymatic activity and soil fertility. Under dehumidification, the highest level of catalase activity was measured, which is a factor contributing to organic matter humification, stable humus formation (humate type), the preservation of biogenic elements reserves and high average annual increases of the high-quality wood.

Conclusions. *Highly significant paired regression models based on second-order polynomials were obtained. The models can become the basis for developing techniques for managing the humus state, increasing and maintaining the fertility of peat soils when planning hydrotechnical engineering measures for the rational forestry development of mires.*

Keywords: *mesotrophic mires; peat soils; regression analysis; evaluation of statistical models; humus state; biogenic elements; stocks and quality of wood.*

How to cite: *Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Regression models of catalase activity and water regime as criteria for quality assessing of the drained soils of mire pine forests in West Siberia. The Journal of Soils and Environment. 2025. 8(1). e297. DOI: [10.31251/pos.v8i1.297](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.297) (in Russian with English abstract).*

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FWES-2024-0028).

REFERENCES

- Agrochemical methods of soil research. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).
- Arzamazova A.V., Galtsova A.D., Kinzhaev R.R., Grigoreva I.I. Effectiveness of various forms of nitrogen fertilizers in growing cereal grasses on oil-contaminated oligotrophic peat soil. *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2023. No. 2. P. 41–47. (in Russian). <https://doi.org/10.26178/AE.2023.51.52.007>
- Aristovskaya T.V. Microbiology of podzolic soils. Leningrad, 1965. 187 p. (in Russian).
- Bambalov N.N., Smirnova V.V., Tanovitsky I.G. Belenky S.G. Rakovich V.A. The current state and prospects of using the peat fund of Belarus. *Natural Resources*. 2000. No. 3. P. 5–15. (in Russian).
- Vompersky S.E. Biological foundations of the effectiveness of forest reclamation. Moscow: Nauka Publ., 1968. 312 p. (in Russian).
- Glebov F.Z. On improving the accounting of the forestry reclamation fund in forest management in Western Siberia. *Forestry*. 1971. No. 1. P. 54–60. (in Russian).
- Dergacheva M.I. The system of humic substances as a basis for diagnostics of paleosols and reconstruction of the paleogenic environment. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018. 292 p. (in Russian).
- Draper N.R., Smith H. Applied regression analysis. In Book 1. Trans. see, 2nd ed., reprint. and additional. Moscow: Publishing House Finance and Statistics, 1986. 366 p. (in Russian).
- Dirin V.A. Activity of catalase in peat of virgin and reclaimed sites of lowland bog ecosystem. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2009. No. 6 (84). P. 121–125. (in Russian).
- Eliseeva I.I., Kurysheva S.V., Kosteeva T.V., Babaeva I.V., Mikhailov B.A. *Econometrica*. Moscow: Publishing House Finance and Statistics, 2003. 344 p. (in Russian).
- Efremov S.P. On the introduction of drained swamps of the Tomsk region. In book: *The relationship between forests and swamps*. Moscow: Nauka Publ., 1967. P.141–174. (in Russian).
- Efremov S.P. Pioneer stands of drained marshes. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987. 248 p. (in Russian).
- Efremov S.P., Efremova T.T., Kozlovskaya L.S., Krapivina L.A., Melentyeva N.V. Biological profile of drained peat soils of Western Siberia. Moscow: Nauka Publ., Prospekt VDNKH USSR, 1972. 4 p. (in Russian).
- Efremov S.P., Efremova T.T. The effect of drainage on the loading of peat soil with roots of woody and herbaceous plants. In book: *Comprehensive assessment of swamps and wetland forests in connection with their melioration*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. P. 113–127. (in Russian).
- Efremov S.P., Efremova T.T., Pimenov A.V., Sedel'nikov M.V. Effects of radial growth in mire pine stands from the perspective of a phytosocial paradigm. *Contemporary Problems of Ecology*. 2024a. Vol. 17. No. 5. P. 670–681. <https://doi.org/10.1134/S1995425524700458>
- Efremov S. P., Efremova T. T., Pimenov A. V., Sedel'nikova T. S. Structure of the Annual Ring Pool in Communities of Swamp and Dry Pine Forests Between Ob' and Tom' Rivers. *Communication I: Methodological Substantiation and Forest Growing Conditions*. *Siberian Journal Forestry Science*. 2024b. No. 5. P. 3–12. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20240501>
- Efremova T.T. Soil formation during natural afforestation of drained swamps. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975. 125 p. (in Russian).

- Efremova T.T. Soil formation and diagnostics of peat soils of swamp ecosystems. *Pochvovedenie*. 1992. No. 12. P. 25–35. (in Russian).
- Efremova T.T., Efremov S.P., Voronkov P.T. Regression analysis of enzymatic activity of drained peat soils. In book: *Features of forest-marsh ecosystems of Western Siberia*. Krasnoyarsk, 1978. P. 111–131. (in Russian).
- Efremova T.T., Melentyeva N.V. Biological properties of peat soils in connection with forestry reclamation. *Pochvovedenie*. 1981. No. 2. P. 117–127. (in Russian).
- Efremova T.T., Ovchinnikova T.M., Sukhovol'skii V.G. Multiparametric analysis of soil properties in the drained forest bogs of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 39. No. 6. P. 588–596. <https://doi.org/10.1134/S1064229306060020>
- Efremova T.T., Ovchinnikova T.M. Oxidoreductase activity of peat soils as an indicator of the degree of biochemical transformation of drained and forested bogs in West Siberia. *Biology Bulletin*. 2007. Vol. 34. No. 3. P. 297–302. <https://doi.org/10.1134/S1062359007030132>
- Zagurskaya L.M. Micro-population of peat-marsh soils of the Tomsk region. In book: *The relationship between forests and swamps*. Moscow: Nauka Publ., 1967. P. 56–81. (in Russian).
- Zimenko T.G. Microbiological processes in reclaimed peat bogs of Belarus and their directional regulation. Minsk: Publishing House Science and Technology, 1977. 208 p. (in Russian).
- Inisheva L.I., Dement'eva T.V. Mineralization rate of organic matter in peats. *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. No. 2. P. 170–176.
- Inisheva L.I., Porokhina E.V., Aristarkhova V.E., Borovkova A.F. Cutaway peat deposits, their characteristics and functioning. Tomsk: TSPU Publishing House, 2007. 177 p. (in Russian).
- Inisheva L.I., Porokhina E.V., Golovchenko A.V. Biochemical activity of peats of different genesis. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024. Vol. 54. No. 5. P. 5–16. (in Russian). <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-5-1>
- Kireeva N.A., Rafikova G.F., Shchemelinina T.N., Makarova M.Y. Biological activity of oil-contaminated and recultivated peat-gley soils of the Komi Republic. *Agrokhimia*. 2008. No. 8. P. 68–75. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S. The role of invertebrates in the transformation of organic matter in swamp soils. Leningrad: Nauka Publ., 1976. 211 p. (in Russian).
- Kuprevich V.F., Shcherbakova T.A. Soil enzymology. Minsk: Science and Technology, 1966. 273 p. (in Russian).
- Leonova O.A., Kocharovskaya YU.N., Volkova E.M. The catalase activity in peats of different origin. *Izvestiya Tula State University. Natural Science*. 2020. No. 2. P. 65–72. (in Russian).
- Melentyeva N.V. Soils of drained forest swamps. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 128 p. (in Russian).
- Melekhina E.N., Markarova M.Y., Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Kanev V.A. Secondary successions of biota in oil-polluted peat soil upon different biological remediation methods. *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 6. P. 643–653. <https://doi.org/10.1134/S1064229315060071>
- Migunova E.S. Forestry and natural sciences (botany, geography, soil science). Kharkiv: Publishing house "Maidan", 2001. 612 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Humic acids of soils and the general theory of humification. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990. 325 p. (in Russian).
- Naumova G.V., Zhmakova N.A., Makarova N.L., Rassokha N.F., Ovchinnikova T.F. Enzymatic activity of the peat of natural and developed peat deposit. *Nature Management*. 2018. No. 1. P. 208–216. (in Russian).
- Pereverzev V.N. Biochemistry of humus and nitrogen of soils of the Kola Peninsula. Leningrad: Nauka Publ., 1987. 303 p. (in Russian).
- Ponomareva T.A., Nikolaeva V.V. Methods of studying organic matter in peat-bog soils. *Pochvovedenie*. 1961. No. 5. P. 88–95. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. System-ecological analysis of the enzymatic activity of soils. Moscow: Nauka Publ., 1982. 203 p. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology. Moscow: Nauka Publ., 2005. 252 p. (in Russian).
- Khaziev F.Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soil. *Ecobiotech*. 2018. Vol. 1. No. 2. P. 80–92. (in Russian). <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Shcherbakova T.A. Enzymatic activity of soils and transformation of organic matter (in natural artificial phytocenoses). Minsk: Science and Technology, 1983. 222 p. (in Russian).

- Alves R.J., Callejas I.A., Marschmann G., Mooshammer M., Singh H.W., Whitney B., Torn M.S., Brodie E.L. Kinetic Properties of Microbial Exoenzymes Vary with Soil Depth but Have Similar Temperature Sensitivities Through the Soil Profile. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Article 735282. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.735282>
- Baldrian P., Stursova M. Enzymes in Forest Soils. In book: *Soil Enzymology*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 61–73.
- Błońska E. Enzyme activity in forest peat soils. *Folia Forestalia Polonica*. 2010. Vol. 52. № 1. P. 20–25.
- Bobuľská L., Fazekašová D., Angelovičová L. Vertical Profiles of Soil Properties and Microbial Activities in Peatbog Soils in Slovakia. *Environmental Processes*. 2015. Vol. 2. P. 411–418. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0073-7>
- Brockett B., Prescott C., Grayston S. Soil Moisture is the Major Factor Influencing Microbial Community Structure and Enzyme Activities Across Seven Biogeoclimatic Zones in Western Canada. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012. Vol. 44. No. 1. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.003>
- Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Dick R.P., Breakwell D.P., Turco R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In book: *Methods for assessing soil quality*. John W. Doran, Alice J. Jones (ed.). Soil Science Society of America Inc., 1996. P. 9–17.
- Kujur M., Patel A.K. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2014. Vol. 74. P. 96–104. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100015>
- Karaca A., Cetin S.C., Turgay O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality. In book: *Soil enzymology*. G. Shukla, A. Varma (eds). Vol. 22. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7
- Lasota J., Błońska E. C:N:P stoichiometry as an indicator of Histosol drainage in lowland and mountain forest ecosystems. *Forest Ecosystems*. 2021. Vol. 8 (1). P. 39. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00319-7>
- Leifeld J., Klein K., Wüst-Galley Ch. Soil organic matter stoichiometry as indicator for peatland degradation. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article number: 7634. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64275-y>
- Gianfreda L., Bollag J.M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. Book chapter: *Soil Biochemistry*. Vol. 9. G. Stotzky, J.M. Bollag (ed.). New York: Marcel Dekker Inc., 1996. P. 123–193.
- Skujins J.J. Extracellular enzymes in soil. *CRC critical reviews in microbiology*. 1976. Vol. 4. No. 4. P. 383–421. <https://doi.org/10.3109/10408417609102304>
- Wallenstein M.D., McMahon S.K., Schimel J.P. Seasonal variation in enzyme activities and temperature sensitivities in Arctic tundra soils // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15 (7). P. 1631–1639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01819.x>

Received 31 January 2025

Accepted 16 April 2025

Published 25 April 2025

About the authors:

Tamara T. Efremova – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); efr2@ksc.krasn.ru

Stanislav P. Efremov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); efr2@ksc.krasn.ru

Ada F. Avrova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Phytocoenology and Forest Resource Studies in the Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS” (Krasnoyarsk, Russia); avrova@ksc.krasn.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)