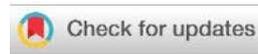


УДК 630.114.444:577.152.1:631.417 (571.1)

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256>

Сезонная активность анаэробной дегидрогеназы торфяных почв в связи с химическими факторами окислительно-восстановительной среды осушенных лесных болот

© 2024 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. Изучить специфику сезонных колебаний анаэробной дегидрогеназы торфяных почв под воздействием гидроресомелиорации – мощного экзогенного фактора, влияющего на скорость и направленность биохимических процессов.

Место и время проведения. Зона южной тайги Западной Сибири (56°23'07" с.ш., 84°34'04" в.д.) в течение июня–октября 2001–2003 гг.

Методы. Исследование сезонной динамики активности анаэробной дегидрогеназы и химических компонентов почвенной среды – С, NH₄⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c (связанное с органическим веществом) выполнено с применением метода системно-экологического анализа.

Основные результаты. Профиль осушенных лесных почв четко дифференцирован на три зоны активности анаэробной дегидрогеназы: 0–5 см – высокой, 5–10 см – умеренно активной, 10–30 см – относительно пассивной. Основная тенденция (тренд) развития сезонных колебаний активности дегидрогеназы с июня по октябрь аппроксимируется параболой второго порядка. Согласно параметрам уравнений тренда, в слабо осушенных почвах еженедельное увеличение активности дегидрогеназы составляло в среднем 0,205 единиц с еженедельным средним замедлением 0,022. В режиме интенсивного осушения еженедельное замедление в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единиц. Повышение активности анаэробной дегидрогеназы выявлено в почвенных горизонтах 0–5 см, при этом наибольшие темпы выявлены в режиме слабого осушения. Вниз по профилю в течение всего периода наблюдений. Выявлена умеренно сильная взаимосвязь активности анаэробной дегидрогеназы, подвижных форм железа, водорастворимого органического вещества и аммония. Кумулятивная доля объясненной дисперсии активности дегидрогеназы подвижными формами железа (Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c) в слабо и интенсивно осушенных почвах составила 61 и 41%, а биогенными элементами (органическое вещество и NH₄⁺) – 25 и 44%, соответственно.

Заключение. Химические компоненты водной вытяжки являются важными экологическими факторами, контролирующими динамику ферментативных реакций торфяных почв. Доминантными факторами сезонных колебаний фермента независимо от режима осушения являются железо-органические комплексы и аммоний, а также окисленное железо в режиме слабой гидромелиорации, а в режиме глубокой – восстановленное железо.

Ключевые слова: тренд сезонных колебаний; темпы прироста (снижения); подвижные формы железа; водорастворимое органическое вещество; аммоний; совокупный вклад; регрессионные модели; канонический анализ.

Цитирование: Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Сезонная активность анаэробной дегидрогеназы торфяных почв в связи с химическими факторами окислительно-восстановительной среды осушенных лесных болот // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e256. DOI: [10.31251/pos.v7i2.256](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256).

ВВЕДЕНИЕ

Основной почвообразовательный процесс разложения и синтеза органического вещества неизменно связан с действием почвенного энзиматического комплекса, который выполняет функции катализатора биогеохимических процессов, обеспечивает взаимодействие экологических факторов и характеризует качественное состояние почв (Купревич, Щербакова, 1966; Хазиев, 1982; Allison, 2006; Makoi, Mdakidemi, 2008; Karaca et al., 2010). Оценка функционального разнообразия почвенных ферментов, обусловленная различными условиями почвенной среды, улучшит понимание связи биохимической трансформации органического вещества с экосистемными процессами. Однако высокая пространственно-временная изменчивость ферментов создает большие проблемы для понимания того, как химические, физические и биологические свойства почвы влияют на природу её биокаталитической способности (Хазиев, 2018; Caldwell, 2005; Sinsabaugh, 2010; Burns et al., 2013). Отсюда вытекает необходимость применения системно-экологического подхода – метода «анализа ... на основе функциональной взаимосвязи и взаимодействия с экологическими параметрами в их

пространственно-временном проявлении» – методами математической статистики (Хазиев, 1982, с. 20).

Большую роль в превращении органических соединений ароматического ряда играют окислительно-восстановительные ферменты. В результате окисления полифенолов образуются хиноны, которые при конденсации с аминокислотами и пептидами образуют первичную молекулу гуминовой кислоты. При этом хиноны могут снова восстанавливаться до полифенолов за счет реакций отщепления водорода, активированного анаэробной дегидрогеназой, вновь акцептировать кислород при участии фенолоксидаз и опять восстанавливаться (Кононова, 1963; Рубин, 1971). Поэтому важно изучать не только реакции, идущие с присоединением кислорода, но и реакции с отнятием водорода, чтобы полнее охарактеризовать почву как единую систему биохимических процессов. Установлено, что накопление почвенной дегидрогеназы обусловлено микробной биомассой, а функционирование, зависящее от свойств почв, служит наиболее чувствительным показателем общей микробиологической активности в ходе естественной эволюции, а также антропогенных воздействий (Купревич, Щербакова, 1966; Галиулин и др., 2014; Хазиев, 2018; Schaefer, 1963; Brzezińska et al., 2001; Borowic et al., 2014). Вместе с тем, дегидрогеназы (прежде всего, торфяных почв) относятся к числу самых неизученных ферментов класса оксидоредуктаз. В настоящее время есть данные об активности фермента в торфяных почвах Белорусского Полесья, лесных торфяных почвах междуречья Оби и Томи, торфах Западной Сибири – фрагментарно (Ефремова и др., 2006; Ефремова, Овчинникова, 2007; Лучинок и др., 2013; Инишева, 2020). Изучение сезонной активности анаэробной дегидрогеназы и особенностей её распределения по профилю почв позволяет оценить внутренние биохимические процессы и глубину преобразования торфяных почв, создавая научную основу оптимизации освоения и повышения лесорастительного потенциала осушенных болот.

Целью работы – изучить специфику сезонных колебаний анаэробной дегидрогеназы торфяных почв под воздействием гидроресомелиорации – мощного экзогенного фактора, влияющего на скорость и направленность биохимических процессов.

Решали следующие задачи:

- установить особенности формирования пространственно-временной динамики активности анаэробной дегидрогеназы торфяных почв разной глубины осушения;
- охарактеризовать аналитические показатели рядов сезонной динамики фермента;
- оценить функциональную связь активности оксидоредуктазы с химическими свойствами почв, характеризующими окислительно-восстановительную обстановку в почве;
- выявить результат совокупного воздействия изучаемых факторов среды;
- установить доминантные факторы, контролирующие динамику активности дегидрогеназы.

Исследования подобного направления в лесных торфяных почвах южной тайги Западной Сибири выполнены впервые.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В зоне южной тайги Западной Сибири изучали мезотрофное болото Еловочное, осушенное 25 лет назад (от момента исследования) сетью мелких открытых каналов с целью лесовыращивания (географические координаты: 56°23'07" с.ш., 84°34'04" в.д.). Занято сосновыми древостоями (*Pinus sylvestris* L.) естественного происхождения. В пространстве осушительной сети объектом исследования выбран сосняк осоково-сфагновый, расположенный на межканальной полосе 93 м и разнотравно-мятликовый – на стыке магистрального и ловчего каналов. Участки характеризуют условия слабого и интенсивно осушения торфяных почв (Histosols), глубина стояния почвенно-грунтовых вод за три года наблюдений составила в среднем 23,2±9,9 и 70,2±16,0 см соответственно. Разграничение участков обосновано методами многомерного статистического анализа (Ефремова и др., 2006; Ефремова, Овчинникова, 2007).

Торфяные почвы – освоенные переходного (мезотрофного) типа на мощных осоково-сфагновых торфах, по классификации (Скрынникова, 1964; Пьявченко, 1978; Ефремова, 1992). Современные почвообразовательные процессы протекают, как принято считать, преимущественно в верхних 30 см торфяной залежи, залегающих выше средневегетационного уровня стояния верховодки – зоны сосредоточения корней растений, микроорганизмов и почвенных беспозвоночных. Почвы морфологически слабо дифференцированы на горизонты 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 см преимущественно по степени загруженности сосущими корнями, слабо – по цвету и плотности. В течение периода наблюдений (июнь–октябрь) преобладали окислительные условия среды (рис 1 А). Горизонты слабо осушенных почв в 2–3 раза влажнее, холоднее примерно на 2°C, а величина pH в грациях кислой

среды несколько ниже относительно интенсивно осушенных (рис 1 Б, В, Г). Зольность торфяного субстрата снижается по профилю залежи и составляет в режиме слабого осушения – 8,9–5,2%, интенсивного – 15,6–6,9%, то есть слабо возрастает со степенью гидромелиорации. Более наглядно в связи с режимом осушения изменяется степень гумификации органического вещества ($\Sigma\Gamma\text{К}+\Sigma\text{ФК}$). В почвах слабого осушения она падает с глубиной и равняется 59,1–36,9%, в режиме интенсивного осушения – слабо варьирует в пределах почвенного профиля и составляет 73,4–69,8%. Соответственно, показатели $\text{C}_{\text{гк}} / \text{C}_{\text{фк}}$ расширяются с 0,90–1,20 до 1,3–1,5, сужается отношение C/N с 21,4–13,5 до 16,6–26,7. В корненасыщенном слое (0–20 см) возрастают запасы гумуса до 96,8 против 48,9 т/га, то есть почти в 2 раза.

Сезонную активность анаэробной дегидрогеназы изучали с июня по октябрь с шагом 5–8 дней (в среднем неделя). Активность фермента определяли методом А.Ш. Галстяна в естественно-влажных образцах (без добавления глюкозы) при разрежении 10–12 мм рт. ст. продолжительностью 2–3 минуты и последующем компостировании в термостате при 30°C в течение суток (Хазиев, 2005). Активность дегидрогеназы выражали в мг формазана на 1 г абсолютно сухой навески за 24 часа. В сезонной динамике одновременно изучали компоненты водной вытяжки, определяющие, наряду с оксидоредуктазами, развитие окислительно-восстановительных процессов в почвенной среде – органическое вещество, выраженное в углероде ($\text{C}_{\text{орг}}$); аммоний (NH_4^+); двух- и трехвалентное железо (Fe^{2+} и Fe^{3+}), а также железо, связанное с органическим веществом (Fe_c). Ингредиенты определяли в свежееотобранных образцах: Fe^{2+} с $\alpha\alpha$ -дипиридиллом; Fe^{3+} и Fe_c (после озольнения водной вытяжки) – сульфосалициловой кислотой; $\text{C}_{\text{орг}}$ – бихроматным методом по Тюрину; NH_4^+ – с реактивом Несслера (Агрохимические ..., 1975).

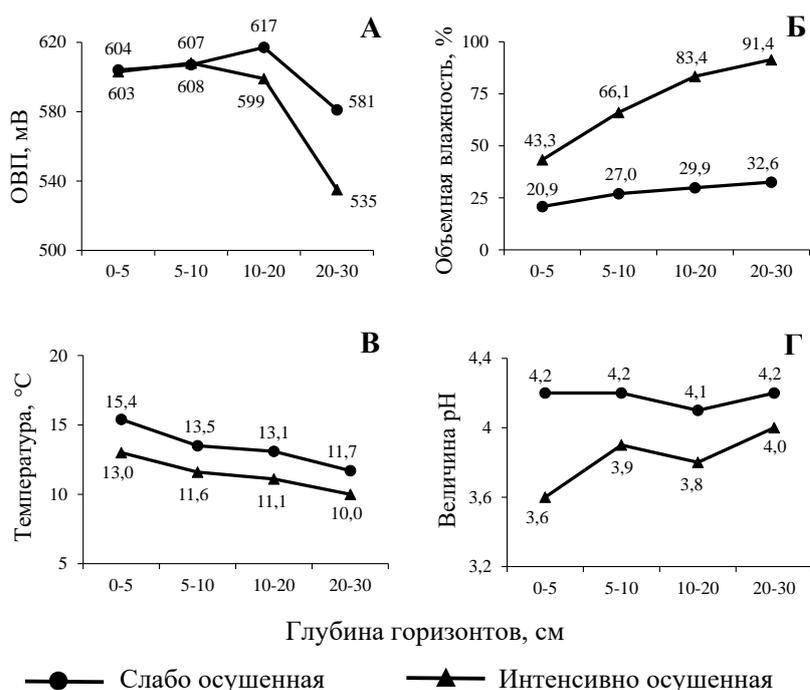


Рисунок 1. Водно-физико-химические показатели современных торфяных почв (0–30 см) разной степени осушения (среднее за период наблюдений – июнь–октябрь).

Условные обозначения: А – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; Б – объемная влажность, %; В – температура почв, °C; Г – показатели pH.

Статистическую характеристику сезонной активности дегидрогеназы выполняли согласно (Чекотовский, 2002; Халафян, 2007). Применили систему абсолютных и относительных аналитических показателей, позволяющих выявить и определить характер, направление и интенсивность изменений временных рядов – метод наименьших квадратов, темпы роста (индекс сезонности) и темпы прироста, которые определяются как процентные отношения фактических уровней временного ряда u_i к некоторой базе сравнения u_t . В качестве таковой приняли среднюю арифметическую взвешенную за весь период наблюдений в слое 0–30 см соответствующих почв (табл. 1). Индекс сезонности: $I_s = u_i/u_t \times 100\%$ показывает, какую часть временного среднего он составляет (табл. 2). При этом влияние

основной тенденции развития временного ряда (тренда) устраняется (Чекотовский, 2002). На основе темпов роста T (индекса сезонности) рассчитали темпы прироста (ТП) активности дегидрогеназы: $ТП, \% = (T-100)$. Темп прироста показывает, на какой процент уровень данного срока наблюдений больше или меньше базисного уровня. Положительное значение прироста означает увеличение, отрицательное – уменьшение.

При обсуждении анаэробной активности дегидрогеназы использованы принципы системно-экологического анализа ферментативной активности почв (Хазиев, 1982).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика активности анаэробной дегидрогеназы. Колебания ферментативной активности почв происходят на определенном фоне. В современных торфяных почвах (0–30 см) средневзвешенный потенциал дегидрогеназы за период наблюдений (июнь–октябрь) составил 0,71 и 0,83 мг формазана на 1 г абсолютно сухой навески за 24 часа (табл. 1).

Таблица 1

Статистические показатели активности дегидрогеназы в лесных торфяных почвах разной глубины осушения за июнь–октябрь

Статистические показатели	Глубина почвенных горизонтов, см				
	0–5	5–10	10–20	20–30	0–30
Слабо осушенные торфяные почвы					
Средневзвешенное	2,02	0,46	0,15	0,22	0,71
Медиана	1,96	0,35	0,11	0,19	0,69
Минимум-максимум	0,35–4,78	0–1,91	0–0,46	0–0,62	0,23–1,47
Коэффициент вариации, %	55	101	82	81	51
Интенсивно осушенные торфяные почвы					
Средневзвешенное	1,99	0,65	0,39	0,27	0,83
Медиана	1,61	0,61	0,67	0,33	0,62
Минимум-максимум	0,09–4,36	0,12–1,55	0,13–0,94	0,08–0,56	0,13–1,76
Коэффициент вариации, %	69	65	66	55	59

По активности дегидрогеназы профиль почв четко дифференцирован на три зоны: интенсивную 0–5 см, умеренно активную 5–10 см и относительно пассивную 10–30 см. По мере заглубления каждой зоны потенциал дегидрогеназы заметно снижался. Выраженная дифференциация почвенного профиля обусловлена, вероятнее всего, ризосферным эффектом – максимальной активностью микроорганизмов в прикорневой зоне. В осушенных сосняках физиологически активные корни в горизонте 0–4 см составляют 58%, 4–8 см – 33, 8–30 см – 4% к массе корней в слое 0–30 см (Ефремов, Ефремова, 1973). Общее количество микроорганизмов в верхнем горизонте достигает многие миллионы, снижается с глубиной и подвержено сезонным колебаниям; наиболее распространенную группу в болотах переходного (мезотрофного) типа составляют неспороносные бактерии с преобладанием флюоресцирующих и плесневых грибов – пенициллы и муконовые (Козловская и др., 1978). О резком уменьшении с глубиной микробной биомассы и ферментативной активности в лесных почвах писали и другие авторы (Baldrian, Štursová, 2010).

Детерминированный компонент изменения уровня сезонной активности. Важной характеристикой при статистическом изучении интенсивности сезонных колебаний является установление основной тенденции развития (тренда) временных рядов. Наиболее простой и удобный способ отображения основной тенденции – графоаналитические построения. Однако конфигурация статистической кривой линейной диаграммы сезонной активности дегидрогеназы все время меняется, что затрудняет оценку (рис. 2). Поэтому применили математическую функцию – уравнение тренда, на основе которой вычисляли выровненные, теоретические уровни фактических данных. Достоверность аппроксимации оценивали коэффициентом детерминации R^2 , F -критерием и p -уровнем значимости. Выбранный тип математической функции принимали в качестве количественной модели. Степень надежности выбранного трендового уравнения – параболы второго порядка, характеризующего закономерности развития активности дегидрогеназы во времени – была наиболее высокой в режиме интенсивного осушения ($R^2 = 0,80$, рис. 2). В слабо осушенных почвах оставалась статистически значимой ($R^2 = 0,47$). В параболической функции тренда положительный знак параметра b_1 и отрицательный параметра b_2 показывает, что выровненные уровни временного ряда увеличиваются с замедлением, равным $2b_2$ (Чекотовский, 2002). Согласно параметрам регрессионных уравнений, в слабо осушенных почвах еженедельное увеличение активности дегидрогеназы составляло в среднем

0,205 единиц с еженедельным средним замедлением 0,022 с июня по октябрь. В режиме интенсивного осушения параболический тренд отражает еженедельное замедление уровней временного ряда в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единиц. Противоположная направленность развития ферментативных процессов, возможно, связана с большими изменениями в соотношении отдельных групп микроорганизмов, растущих на МПА в условиях повышенной воздухоемкости почв (Загуральская, 1967). В интенсивно осушенных – 76% против 25% в режиме слабо осушенных. Вместе с тем, уравнения тренда отражают по сути лишь основную тенденцию развития потенциала дегидрогеназы и прямого отношения к динамике сезонной активности во времени не имеют (Чекотовский, 2002).

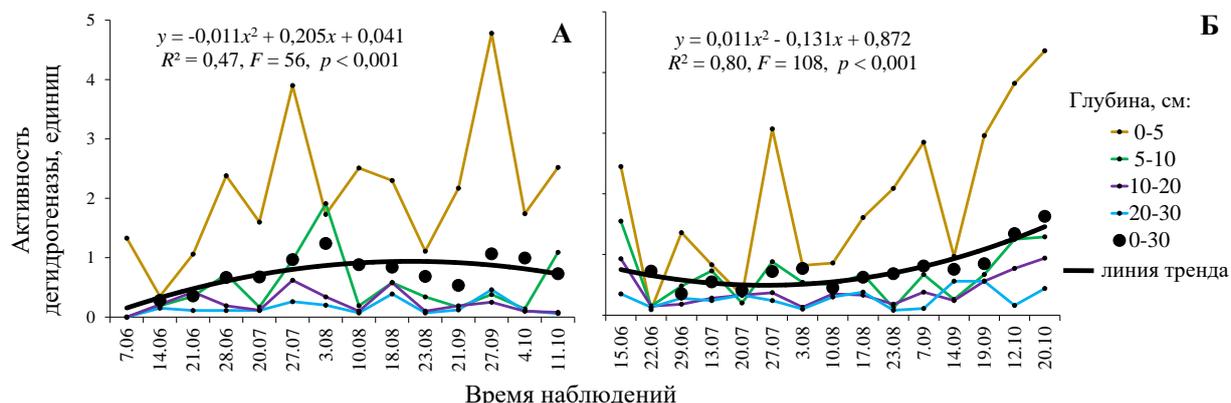


Рисунок 2. Динамика активности анаэробной дегидрогеназы в горизонтах осушенных торфяных почв и основная тенденция (тренд) развития сезонных колебаний в пределах профиля 0–30 см за июнь–октябрь. Степень осушения: А – слабая, Б – интенсивная.

Сезонные колебания. При статистическом изучении сезонного варьирования процессов необходимы данные о внутрисезонных периодах, влияющих на величину уровня динамики: в случае недельного интервала наблюдений период сезонных колебаний равняется месяцу (Чекотовский, 2002). Упорядоченные по месяцам средневзвешенные временные ряды активности дегидрогеназы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистическая группировка сезонной активности дегидрогеназы горизонтов торфяных почв и темпы роста по месяцам за период наблюдений

Месяц	0–5 см		5–10 см		10–20 см		20–30 см		0–30 см	
	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %	Ед.	Т, %
Слабо осушенные торфяные почвы, средневзвешенная активность дегидрогеназы слоя 0–30 см – 0,71 ед.										
Июнь	1,28	180	0,32	44	0,09	13	0,21	29	0,47	66
Июль	2,75	387	0,56	79	0,19	26	0,37	52	0,97	137
Август	1,91	269	0,76	106	0,18	26	0,28	39	0,78	110
Сентябрь	3,48	489	0,27	39	0,29	41	0,22	31	1,06	149
Октябрь	2,13	300	0,61	86	0,08	12	0,09	13	0,73	103
Интенсивно осушенные торфяные почвы, средневзвешенная активность дегидрогеназы слоя 0–30 см – 0,83 ед.										
Июнь	1,30	157	0,73	88	0,42	51	0,253	31	0,68	82
Июль	1,41	170	0,60	73	0,33	39	0,27	33	0,65	78
Август	1,35	162	0,46	55	0,25	30	0,22	26	0,57	69
Сентябрь	2,26	272	0,53	64	0,39	47	0,41	49	0,90	108
Октябрь	4,09	493	1,27	153	0,86	103	0,30	36	1,63	196

Примечание.

Ед. – единицы измерения, мг формазана на 1 г почвы за 24 часа; Т – темпы роста активности дегидрогеназы относительно средневзвешенной за период наблюдений, %.

Современные торфяные почвы 0–30 см в целом явно различались ходом сезонных колебаний активности дегидрогеназы (рис. 3 А, Б). Общим явилось лишь июньское снижение темпов прироста вследствие, вероятно, качественного состава микрофлоры. Показано, что в раннелетний период

торфяные почвы обсуждаемого болотного массива характеризуются высокой численностью флюоресцирующих неспоронных бактерий, в середине лета, когда почвы максимально прогреваются, резко возрастает количество активных споронных микроорганизмов, обладающих более мощным ферментативным аппаратом (Загуральская, 1967). Косвенным подтверждением служит последующий положительный темп прироста активности анаэробной дегидрогеназы слабо осушенных почв. Интенсивно осушенные почвы в течение лета характеризовались низкой объемной влажностью и высокой порозностью аэрации (см. рис. 1 Б). Иссушение почв, по всей видимости, вызвало падение активности микрофлоры, которое сопровождалось отрицательным приростом анаэробной дегидрогеназы. Осенние дожди в октябре оживили биохимическую активность этих почв и резко снизили темпы прироста в условиях слабого осушения.

В профиле почв выделились три зоны темпов прироста активности дегидрогеназы: 0–5 см – положительных, 10–30 см – отрицательных и 5–10 см – специфических, обусловленных глубиной осушения. В зоне положительных темпов прироста наиболее высокие показатели пришлись на июль и сентябрь в почвах слабого осушения (+290, +390%), в режиме интенсивного – на октябрь (+400%). В зоне 5–10 см слабо осушенных почв на фоне падения активности дегидрогеназы проявился августовский слабый темп прироста (+6) и достаточно выраженный октябрьский (+53%) в интенсивно осушенных. В зоне преимущественно отрицательных темпов прироста максимальное снижение активности дегидрогеназы установлено: слабо осушенные почвы – июнь и октябрь (–88%) на глубине 10–20 см, интенсивно осушенные – август (–74%) в слое 20–30 см.

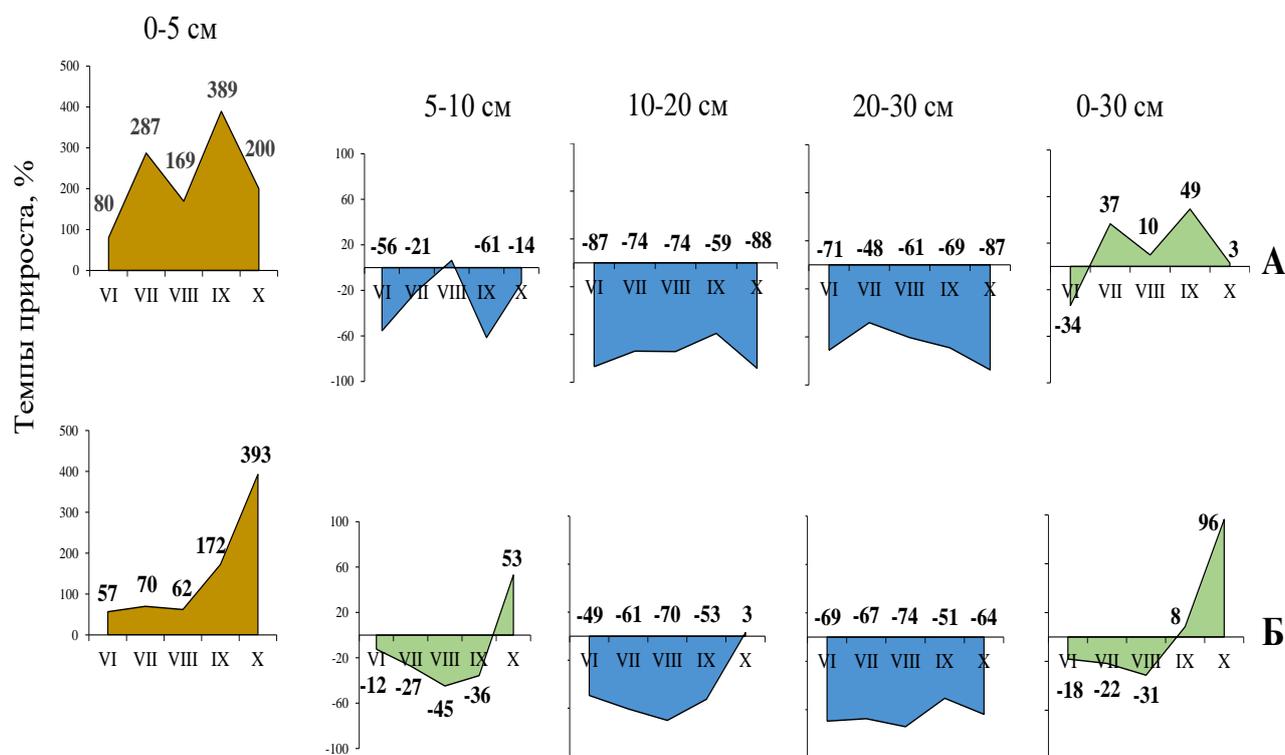


Рисунок 3. Темпы прироста (снижения) сезонной активности дегидрогеназы в горизонтах осушенных почв за период наблюдений. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Экологическая обусловленность сезонной активности дегидрогеназы. Химический состав почв является важнейшим экологическим фактором, контролирующим ферментативную активность почв, наравне с физико-химическими свойствами и гидротермическим режимом (предмет отдельного обсуждения). Химический состав водной вытяжки осушенных торфяных почв (0–30 см) за теплый период приведен в табл. 3. Железо в почвах присутствует в двух состояниях Fe^{2+} , Fe^{3+} , а также в форме соединений с органическим веществом (Кауричев, Орлов, 1982). В слабо осушенных почвах по сравнению с интенсивно осушенными восстановленное железо и водорастворимое органическое вещество выше в 1,6 и 1,8 раза соответственно. В режиме глубокой гидромелиорации почв преобладает железо, связанное с органическим веществом (Fe_C), и водорастворимый аммоний (NH_4^+); в 1,5 и 2 раза, соответственно (табл. 3.).

Таблица 3

Среднее содержание подвижных форм железа и биогенных компонентов
в лесных торфяных почвах (0–30 см) за летний период, мг/100 г

Градации осушения почв	Подвижные формы железа			Биогенные компоненты	
	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Fe _c	C _{орг}	NH ₄ ⁺
Слабо осушенные	0,72	0,35	0,97	200	5,7
Интенсивно осушенные	0,45	0,45	1,47	109	10,8

Примечание.

Здесь и далее в табл. 4: Fe_c – железо, связанное с органическим веществом; C_{орг} – органическое вещество, выраженное в углеводе.

Связь анаэробной дегидрогеназы и восстановленного железа в режиме слабого и интенсивного осушения аппроксимируется полиномом второго порядка в пределах содержания Fe²⁺ – 0,27–1,47 и 0,3–0,65 мг/100 г, соответственно (рис. 4 Аа, Ба). Независимо от глубины осушения почв количество окисленного железа Fe³⁺ (0,07–0,75 мг/100 г) и активность дегидрогеназы связаны функцией параболы средней тесноты (рис. 4 Аб, Бб). Экстремумы (точки перегиба) двух- и трехвалентного железа 0,4–0,5 мг/100 г, рассчитанные на основании параметров регрессионных уравнений, показывают, что превышение данной величины изменяет отрицательное направление связи на положительное. Взаимосвязь активности дегидрогеназы и содержания железа, связанного с органическим веществом, в условиях слабого осушения (Fe_c 0,42–1,63 мг/100 г) и интенсивного (Fe_c 0,69–2,53 мг/100 г) аппроксимируется параболической функцией средней и высокой тесноты (рис. 4 Ав, Бв). Экстремумы 1,1 и 1,8 мг/100 г, соответственно, отражают падение активности дегидрогеназы при снижении количества железа и подъем активности в случае повышения данной величины.

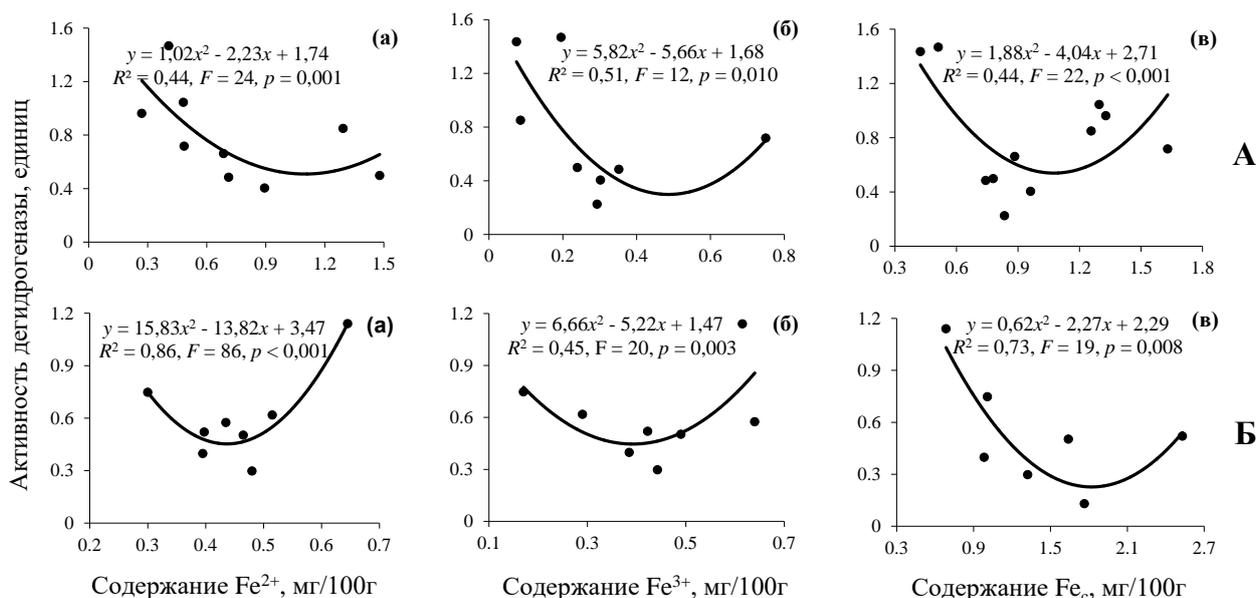


Рисунок 4. Регрессионная связь сезонной активности почвенной дегидрогеназы и подвижного железа: (а) – восстановленного; (б) – окисленного; (в) – связанного с водорастворимым органическим веществом. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Различные группы почвенных ферментов, в том числе оксидоредуктаз, участвуют в биогеохимических циклах превращения углерода и азота. В составе водорастворимого органического вещества доминируют гумусовые компоненты фульватной природы (Ефремова и др., 1998). Активность дегидрогеназы и количество органического вещества описывается полиномиальной функцией (рис. 5 Аа, Ба). Нисходящие ветви параболы характеризуют отрицательную связь при содержании углерода 87–149 в режиме глубокого осушения и 130–254 мг/100 г – слабого. Экстремум 240 мг/100 показывает, что выше предсказанного значения отрицательное направление связи сменяется положительным.

Аммиак образуется в почве в качестве промежуточного продукта в процессе метаболизма азота с участием оксидоредуктаз. Динамика потенциала дегидрогеназы и содержание водорастворимого

аммония тесно отрицательно связаны полиномом второго порядка в интервале NH_4^+ от 2,4 до 16,2 мг/100 г (рис. 5 Аб, Бб) с точкой перегиба около 13 мг/100 г.

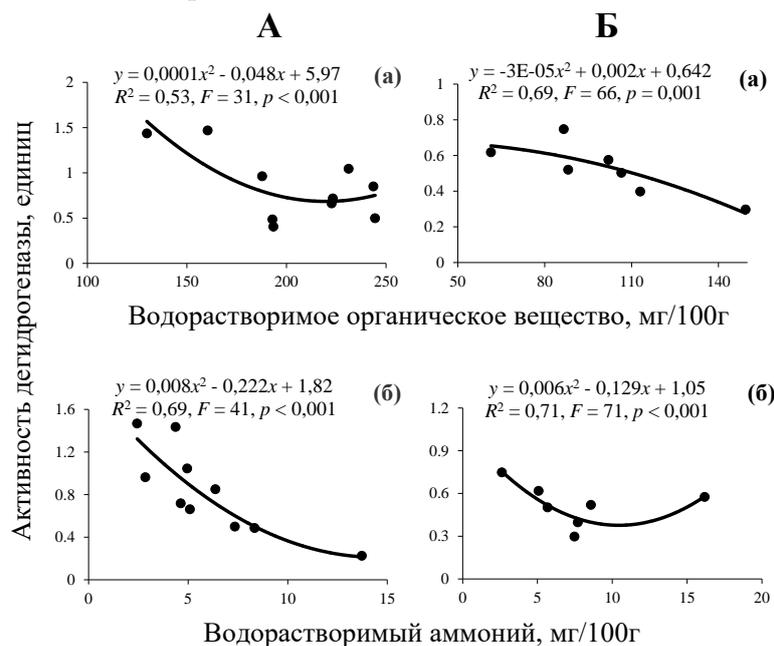


Рисунок 5. Регрессионная связь активности дегидрогеназы и водорастворимых биогенных компонентов: (а) – органическое вещество; (б) – аммоний. Индексы А, Б – см. рис. 2.

Канонический анализ. Результаты отдельного, изолированного влияния показателей почвенной среды требуют, согласно методологии системно-экологического анализа, последующего обобщения, а именно оценки совокупного эффекта и установления доминантных факторов, контролирующих в данном случае активность анаэробной дегидрогеназы осушенных торфяных почв. С этой целью применили канонический анализ. Метод является обобщением множественной корреляции как мера связи одной случайной величины и множеством других случайных величин. Рассмотрели два блока факторов среды в отдельности: биогенные компоненты (органическое вещество, аммоний) и различные формы подвижного железа. Дискриминирующая возможность выделенных корней (доля собственного значения корня от суммы всех собственных значений), согласно индексам канонической детерминации, показывает, что кумулятивная доля объясненной дисперсии активности дегидрогеназы подвижными формами железа составила 61% и 41% в режиме слабого и интенсивного осушения, соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Результаты канонического анализа связи сезонной активности анаэробной дегидрогеназы с подвижными формами железа и биогенными компонентами осушенных лесных почв

Переменные	Слабо осушенная почва		Интенсивно осушенная почва	
	Стандартизованные коэффициенты	Факторная структура	Стандартизованные коэффициенты	Факторная структура
Подвижные формы железа:				
Fe^{2+}	-0,33	0,18	-0,89	-0,85
Fe^{3+}	-0,87	-0,81	0,33	-0,14
Fe_c	-0,44	-0,80	0,38	0,73
	Оценка корня: $R^2 = 0,61$, χ -критерий – 5,16, p -уровень – 0,016		Оценка корня: $R^2 = 0,41$, χ -критерий – 2,34, p -уровень – 0,051	
Биогенные компоненты:				
NH_4^+	0,93	0,87	0,92	0,91
$\text{C}_{\text{орг}}$	-0,49	-0,38	-0,42	-0,39
	Оценка корня: $R^2 = 0,25$, χ -критерий – 1,69, p -уровень – 0,043		Оценка корня: $R^2 = 0,44$, χ -критерий – 2,89, p -уровень – 0,024	

Примечание.

Жирным выделены канонические коэффициенты, соответствующие наибольшему вкладу переменной.

Стандартизованные коэффициенты, то есть абсолютные значения «веса», соответствуют уникальному вкладу, вносимому соответствующей переменной во взвешенную сумму или каноническую переменную (корень). Наибольший вклад в совокупный эффект различных форм железа вносят катионы восстановленного железа в интенсивно осушенных почвах и окисленного железа – в слабо осушенных. Так как на расчет стандартизованных коэффициентов оказывает влияние взаимная корреляция переменных, вклад одного из показателей может частично погашаться вкладом другого, снижая абсолютные значения коэффициента. Поэтому полную корреляцию между соответствующей переменной и взвешенной суммой (корнем) отражают нагрузки коэффициентов факторной структуры, которые интерпретируются подобно коэффициентам корреляции, чем выше значение (по модулю), тем теснее связь. При этом знак не имеет существенного значения для оценки значимости связи между переменной и дискриминантной функцией, различные знаки просто показывают, что переменные связаны с корнем в противоположном направлении (Боровиков В., Боровиков И., 1997). Коэффициенты факторной структуры ($r = 0,73-0,85$) показывают, что с корнем, наряду с ионами Fe^{2+} и Fe^{3+} , тесно связаны железо-органические (гумусовые) комплексы. То есть все формы железа, присутствующие в почвах, оказывают управляющее воздействие на процессы сезонной активности анаэробной дегидрогеназы.

Совокупность водорастворимых биогенных компонентов – органическое вещество ($C_{орг}$) и аммоний (NH_4^+), судя по каноническим индексам детерминации, совокупно объясняют активность дегидрогеназы почв на 25% в условиях слабой гидромелиорации и 44% – интенсивной. Стандартизованные коэффициенты и факторные нагрузки ($r = 0,87-0,93$) свидетельствуют о том, что аммоний – доминантный фактор, контролирующий активность фермента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Профиль осушенных торфяных почв в связи с потенциалом анаэробной дегидрогеназы четко дифференцирован на три зоны: высоко активную 0–5 см, умеренно активную 5–10 см и относительно пассивную 10–30 см. Средневзвешенный потенциал слоя 0–30 см современной торфяной почвы (базовый уровень) за период июнь–октябрь составил в режиме слабой гидромелиорации 0,71, интенсивной – 0,83 мг формазана на 1 г абс. сух. навески за 24 часа соответственно.

Основной ход развития (тренд) сезонных колебаний активности дегидрогеназы наиболее адекватно аппроксимируется функцией параболы второго порядка. Параметры трендового уравнения показывают: в слабо осушенных почвах активность дегидрогеназы еженедельно ускорялась в среднем на 0,205 единиц с еженедельным средним замедлением на 0,022 единиц, в режиме интенсивного – еженедельно замедлялась в среднем на 0,131 с еженедельным средним ускорением на 0,022 единицы.

Толща 0–30 см в целом осушенных торфяных почв характеризовалась июньскими отрицательными темпами прироста активности дегидрогеназы. Положительный прирост весь последующий период наблюдений отмечался в слабо осушенных почвах. В интенсивно осушенных – только в октябре, летнему периоду сопутствовал отрицательный прирост. Специфика сезонной кинетики фермента по горизонтам почв: положительные приросты фиксировались лишь в поверхностных 0–5 см и отличались максимальными темпами в слабо осушенных почвах.

Парная регрессионная связь активности анаэробной дегидрогеназы, подвижных форм железа и биогенных компонентов аппроксимируется полиномом второго порядка средней и высокой тесноты. Кумулятивная доля объясненной сезонной дисперсии фермента данными множествами составила в почвах слабого осушения 61 и 25%, интенсивного – 41 и 44% соответственно. Железо-органические комплексы и аммоний выявлены ведущими химическими факторами, контролирующими колебание анаэробной дегидрогеназы лесных торфяных почв независимо от режима осушения. Система Fe^{3+} — Fe^{2+} дифференцируется в связи с глубиной гидромелиорации. Как доминантный фактор ион Fe^{3+} установлен в условиях слабого осушения, Fe^{2+} – в режиме интенсивного.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой 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» (№ FWES-2024-0028).

ЛИТЕРАТУРА

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

- Галиулин Р.В., Башкин В.Н., Галиулина Р.А. Оценка эффективности рекультивации почв в условиях добычи углеводородов посредством анализа активности дегидрогеназы // *Агрохимия*. 2014. № 6. С. 84–88.
- 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.
- Ефремова Т.Т. Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // *Почвоведение*. 1992. № 12. С. 25–35.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В. Водные ресурсы болот России и оценка их химического состава // *География и природные ресурсы*. 1998. № 2. С. 79–84.
- 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 Российской академии наук. Серия биологическая*. 2007. № 3. С. 360–367.
- Загуральская Л.М. Микронаселение торфяно-болотных почв Томской области // *Взаимоотношение леса и болота*. Москва: Наука, 1967. С. 56–81.
- Инишева Л.И. Закономерности функционирования болотных экосистем в условиях воздействия природных и антропогенных факторов. Томск: Изд-во ТПУ, 2020. 482 с.
- Кауричев И.С., Орлов Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и географии почв. Москва: Колос, 1982. 247 с.
- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука, 1978. 176 с.
- Кононова М.М. Органическое вещество почвы. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
- Купревич В.Ф., Щербакова Т.А. Почвенная энзимология. Минск: Наука и техника, 1966. 275 с.
- Лучинок Л.Н., Баран С.Г., Тулина А.С., Семенов В.М. Влияние способа сельскохозяйственного использования на ферментативную активность торфяных почв Полесья и эмиссию CO₂ // *Мелиорация*. 2013. № 2 (70). С. 55–64.
- Пьявченко Н.И. О диагностике типов торфяных почв и залежей при изысканиях и проектировании лесосушительных мелиораций // *Исследования по лесному болотоведению и мелиорации*. Петрозаводск, 1978. С. 5–24.
- Рубин Б.А. Курс физиологии растений. Москва: Высшая школа, 1971. 671 с.
- Скрынникова И.Н. Классификация целинных болотных и мелиоративных торфяных почв СССР // *Почвоведение*. 1964. № 5. С. 14–27.
- 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>
- Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2007. 515 с.
- Чекотовский Э.В. Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2002. 464 с.
- Allison S.D. Soil minerals and humic acids enzyme stability: implications for ecosystem processes // *Biogeochemistry*. 2006. Vol. 81. P. 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9046-2>
- Baldrian P., Štursová M. Enzymes in Forest Soils // *Soil Enzymology. Soil Biology*, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 61–73. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_4
- Borowic A., Wyszowska J., Kucharski M., Kucharski J. Resistance of dehydrogenases, catalase, urease and plants to soil contamination with zinc // *Journal of Elementology*. 2014. Vol. 19. No. 4. P. 929–936. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.566>
- Brzezińska M., Stępniewska Z., Stępniewski W. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2001. Vol. 10. No. 5. P. 307–311.

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>

Caldwel B.A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review // *Pedobiologia*. 2005. Vol. 49. No. 6. P. 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>

Karaca A., Cetin S.C., Turgau O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality // *Soil Enzymology. Soil Biology*, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7

Makoi J.H., Mdakidemi P.A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem // *African Journal of Biotechnology*. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 181–191.

Schaefer R. L'activité déshydrogénasique comme mesure de l'activité biologique globale des sols // *Annales Institut Pasteur*. 1963. Vol. 105. No. 2. P. 326–331.

Sinsabaugh R.L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42. No. 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Поступила в редакцию 20.03.2024

Принята 21.06.2024

Опубликована 22.07.2024

Сведения об авторах:

Ефремова Тамара Тимофеевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения 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 ресурсоведения 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 ресурсоведения 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/)

Seasonal activity of anaerobic dehydrogenase of peat soils as related with some chemical factors of the redox environment of drained forest mires

© 2024 Т. Т. 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, bild. 28, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

The aim of the study was to study the specifics of seasonal fluctuations of anaerobic dehydrogenase of peat soils under the influence of forestry hydromelioration, a powerful exogenous factor affecting the speed and direction of biochemical processes.

Location and time of the study. The southern taiga one of West Siberia during June–October 2001–2003 (geographical coordinates 56°23'071" NL, 84°34'04" EL).

Methods. Investigation of the seasonal dynamics of the activity of anaerobic dehydrogenase and chemical components of the soil environment – C, NH₄⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Fe_c (associated with organic matter) using the method of systemic ecological analysis.

Results. The profile of drained forest peat soils was clearly differentiated into three zones: 0–5 cm of high anaerobic dehydrogenase activity, 5–10 cm of moderate activity and 10–30 cm of low activity of the enzyme. The main trend in seasonal fluctuations of the dehydrogenase activity from June to October was approximated by a

second-order parabola. According to the regression equation parameters, in poorly drained soils the weekly increase in dehydrogenase activity averaged 0,205 units with a weekly average deceleration of 0,022. In the strongly drained soils, there was a weekly deceleration of 0,131 with a weekly average acceleration of 0,022 units. Positively increased activity of anaerobic dehydrogenase was measured in 0-5 cm soil horizons, with the highest rates detected under poor drainage. Downwards the profile, there was mainly a negative increase during the entire observation period. A functional relationship between the activity of anaerobic dehydrogenase, mobile forms of iron, water-soluble organic matter and ammonium of medium and high density according to the type of parabola was revealed.

Conclusions. *The chemical components of the aqueous extract are the most important environmental factors controlling the kinetics of enzymatic reactions of peat soils. The cumulative proportion of the explained dispersion of dehydrogenase activity by mobile forms of iron (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Fe_c) was 61 and 41%, by biogenic elements (organic matter and NH_4^+) – 25 and 44% respectively in weakly and intensively drained soils. The dominant factors determining seasonal fluctuations of the enzyme are iron-organic complexes and ammonium, regardless of the drainage regime, and oxidized iron under poor and reduced iron under strong drainage, respectively.*

Keywords: *seasonal fluctuations trend; increase and decrease rate; mobile forms of iron; water-soluble organic matter; ammonium; cumulative contribution; regression models; canonical analysis.*

How to cite: *Efremova T.T., Efremov S.P., Avrova A.F. Seasonal activity of anaerobic dehydrogenase of peat soils as related with chemical factors of the redox environment of drained forest mires. The Journal of Soils and Environment. 2024. 7(2). e256. DOI: [10.31251/pos.v7i2.256](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.256) (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).
- Galiulin R.V., Bashkin V.N., Galiulina R.A. Recultivation of soils under conditions of hydrocarbon production: efficiency assessment by dehydrogenase activity analysis. *Agrokhimia*. No. 6. P. 84–88. (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: *Complex assessment of swamps and swampy forests in connection with their reclamation*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1973. P. 113–127. (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., Melentyeva N.V. Water resources of Russian marshes and assessment of their chemical composition. *Geografia i prirodnye resursy*. 1998. No. 2. P. 79–84. (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-swamp soils of the Tomsk region. In book: *The relationship of forests and swamps*. Moscow: Nauka Publ., 1967. P. 56–81. (in Russian).
- Inisheva L.I. Special features of mire ecosystems functioning under the influence of natural and anthropogenic factors. Tomsk: Publ. House of TSPU, 2020. 482 p. (in Russian).
- Kaurichev I.S., Orlov D.S. Redox processes and their role in the genesis and geography of soils. Moscow: Kolos Publ., 1982. 247 p. (in Russian).
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Piavchenko N.I. Dynamics of organic matter in the process of peat formation. Leningrad: Nauka Publ., 1978. 176 p. (in Russian).
- Kononova M.M. Organic matter of the soil. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 314 p. (in Russian).
- Kuprevich V.F., Shcherbakova T.A. Soil enzymology. Minsk: Science and Technology, 1966. 275 p. (in Russian).

- Luchenok L.N., Baran S.G., Tulina A.S., Semenov V.M. Influence of the way of agricultural use on fermentativny activity of peat soils of Polesye and CO₂ emission. Land Reclamation. 2013. No. 2 (70). P. 55–65. (in Russian).
- Piavchenko N.I. On the diagnosis of types of peat soils and deposits in the exploration and design of forest drainage reclamation. In book: Research on forest swamp management and reclamation. Petrozavodsk, 1978. P. 5–24. (in Russian).
- Rubin B.A. Course of plant physiology. Moscow: Higher School Publ., 1971. 671 p. (in Russian).
- Skrynnikova I.N. Classification of virgin marsh and reclamation peat soils of the USSR. Pochvovedenie. 1964. No. 5. P. 14–27. (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>
- Khalafyan A.A. STATISTICA 6. Statistical data analysis. 3rd ed. Moscow: Binom-Press, 2007. 515 p. (in Russian).
- Chekotovskiy E.V. Graphical analysis of statistical data in Microsoft Excel 2000. Moscow: Publishing house “Williams”, 2002. 464 p. (in Russian).
- Allison S.D. Soil minerals and humic acids enzyme stability: implications for ecosystem processes. Biogeochemistry. 2006. Vol. 81. P. 361–373. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9046-2>
- Baldrian P., Štursová M. Enzymes in Forest Soils. In book: Soil Enzymology. Soil Biology, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 61–73. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_4
- Borowic A., Wyszowska J., Kucharski M., Kucharski J. Resistance of dehydrogenases, catalase, urease and plants to soil contamination with zinc. Journal of Elementology. 2014. Vol. 19. No. 4. P. 929–936. <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.566>
- Brzezińska M., Stępniewska Z., Stępniewski W. Dehydrogenase and catalase activity of soil irrigated with municipal wastewater. Polish Journal of Environmental Studies. 2001. Vol. 10. No. 5. P. 307–311.
- Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zop-pini 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>
- Caldwel B.A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. Pedobiologia. 2005. Vol. 49. No. 6. P. 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>
- Karaca A., Cetin S.C., Turgau O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality. In book: Soil Enzymology. Soil Biology, vol 22. / G. Shukla, A. Varma (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 119–148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7
- Makoi J.H., Mdakidemi P.A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. African Journal of Biotechnology. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 181–191.
- Schaefer R. L’activité déshydrogénasique comme mesure de l’activité biologique globale des sols. Annales Institut Pasteur. 1963. Vol. 105. No. 2. P. 326–331.
- Sinsabaugh R.L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. Soil Biology and Biochemistry. 2010. Vol. 42. No. 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Received 20 March 2024

Accepted 21 June 2024

Published 22 July 2024

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/)