

## Ферментативная активность почв пойменной экосистемы

*Инишева Л. И.<sup>1</sup>, Порохина Е. В.<sup>1</sup>, Ефимова С. А.<sup>1</sup>, Антоненко С. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Томский государственный педагогический университет  
Томск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Москва, Россия

*inisheva@mail.ru; porohkatrin@yandex.ru; sefimova20@gmail.com; mlost1618@mail.ru*

В работе представлены результаты исследований по биологической активности торфяных почв притеррасной части поймы реки Кии (бассейн реки Оби, Томская область). Приведены показатели их плодородия по фракционному составу органического вещества и азота. Определен диапазон изменения ферментативной активности в пойменных торфяных целинных почвах: инвертаза 36,3–42,2 мг глюкозы/(г\*4 ч), уреазы 0,3–1,5 мг  $\text{NH}_3^-$ /(г\*24 ч), каталаза 0,6–2,6  $\text{cm}^3 \text{O}_2$ /(г\*2 мин), ферриредуктаза 75,3–120,0 мг восстановленного  $\text{Fe}^{2+}$ /100 г, сульфатредуктаза 1,5–8,0 мг восстановленного  $\text{SO}_4^{2-}$ /(г\*48 ч), нитратредуктаза 0,2–0,8 мг восстановленного  $\text{NO}_3^-$ /(г\*24 ч), нитритредуктаза 0,8–1,4 мг восстановленного  $\text{NO}_2^-$ /(г\*24 ч), пероксидаза 0,27–0,39 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин), полифенолоксидаза 0,25–0,40 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин). Получено, что дренажная система с вариантом дренажа 0,8×25 м создала должный уровень оптимизации биологического режима в пойменных торфяных осушаемых почвах и обеспечила высокий урожай многолетних трав. Процесс активизации биологического режима реализовался за 3-х летний период на стадии активности ферментов гидролаз. Наши исследования отчетливо показали значимость энзимологического фактора как индикатора экологического состояния торфяной почвы. Выявлено, что существующие оценки ферментативной активности для минеральных почв не подходят для оценки ферментативной активности торфяных почв и поэтому возникает необходимость её разработки непосредственно для торфяных почв.

*Ключевые слова:* пойма, бассейн реки, река Обь, торфяные почвы, свойства почв, гидролазы, оксидоредуктазы.

### ВВЕДЕНИЕ

Пойма – наиболее молодое геологическое образование, к тому же постоянно находящееся в стадии формирования. Почвы, представляющие собой результат условий формирования пойменного ландшафта, вобрали все признаки неустойчивой пойменной системы. В естественном состоянии почвы пойм характеризуются высоким, но неустойчивым плодородием, контрастным водным режимом. Оборот веществ не замкнут – происходит ежегодное поступление органических веществ с наносами и вынос их с поверхностным и грунтовым стоком. Скорость оборота веществ замедлена вследствие равновесного сочетания окислительных (освобождение от паводковых вод) и восстановительных (период половодья) условий среды. В структуре внутреннего оборота веществ преобладает остаточная продуктивность.

Из общей площади пойменных земель долины реки Оби (1,3 млн га) всего лишь 130 тысяч га имеют удовлетворительное мелиоративное состояние. Значение пойменных почв в сельскохозяйственном производстве данной территории возрастает с юга на север. Пойменные почвы наиболее доступны для введения в сельскохозяйственный оборот после проведения мелиорации. Мелиоративный фонд поймы реки Оби и ее притоков составляет 440 тысяч га или 34 % от общей площади Обской поймы. В осушении нуждаются 334 тысяч га пойменных почв, что составляет 76 % от мелиоративного фонда. Из всех существующих видов мелиоративного воздействия гидротехническая мелиорация, наложенная на естественный ход процессов, протекающих в биогеоценозах, является наиболее сильной и быстродействующей. Она трансформирует режимы биоценозов в агробиоценозы. Вместе с тем, Обская пойма – сложный природный комплекс, освоение которого требует тщательного изучения и экспериментального обоснования различных направлений мелиоративного

воздействия как способа эколого-социального благоустройства пойменных территорий при условии сохранения почв пойм как природного ресурса биосферы.

Целью данной работы является определение ферментативной активности почв притеррасной части поймы и ее изменение под влиянием мелиоративного воздействия.

### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ**

Исследования проводились на мелиорируемой левобережной пойме реки Кии (бассейн реки Оби, Томская область), в притеррасной ее части на целинных и осушаемых дренажной сетью торфяных почвах на системе польдерного типа с площадью 472 га. Для данных почв характерно сочетание болотного процесса почвообразования и заиливания профиля благодаря воздействию паводковых вод, содержащих во взвешенном состоянии тонкие илистые частицы. Мощность торфяного профиля достигает 2 м, который подстилается суглинками и глинами, мощностью до 8 м, сменяющиеся разнозернистыми песками. На целинных торфяных почвах поймы реки Кии вели наблюдения за активностью ферментов в течение 5 лет. После введения в эксплуатацию дренажной сети в течение 3-х лет изучали биологическую активность на примере инвертазы, уреазы и каталазы. Также изучали гидротермический режим, динамику питательных элементов. Эффективность осушения контролировали подсчетом урожайности многолетних трав. Одновременно биологическую активность исследовали на целинном болоте-аналоге «Караколь», которое располагается в пойме реки Кии в 10 км от объекта мелиорации. Торфа обоих объектов по ботаническому составу относятся к осоковому и древесно-осоковому виду со степенью разложения до 50 % и зольностью 34–39 %. В работе было уделено основное внимание ферментам, катализирующим окислительно-восстановительные процессы и гидролазам, принимающим участие в трансформации углеводов и азотсодержащих органических веществ. Активность ферментов определяли следующими методами: каталазу – газометрическим методом В. Ф. Купревича, А. Ш. Галстяна; уреазу – методом А. Ш. Галстяна; пероксидазу, полифенолоксидазу – методом А. Ш. Галстяна в модификации А. И. Чундеровой; нитритредуктазу – методом А. Ш. Галстяна, Э. Г. Саакяна; нитратредуктазу – методом А. Ш. Галстяна, Л. В. Маркосяна; сульфатредуктазу – методом А. Ш. Галстяна; ферриредуктазу – методом А. Ш. Галстяна, Н. А. Оганесяна. Все методики изложены в монографии Ф. Х. Хазиева (Хазиев, 1976). Фракционный состав органического вещества анализировали по В. В. Пономаревой и Т. А. Николаевой (Пономарева, Николаева, 1961). В торфах определяли ботанический состав, степень разложения, зольность, обменную кислотность (Технический анализ торфа, 1992).

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Почвы пойм накапливают в естественном состоянии огромный резерв питательных веществ, который хранится в мощном заиленном торфяном слое (Мажайский и др., 2017; Пыленок, 2020). Но вследствие того, что основная часть веществ привнесена и экологически не закреплена, а вновь образующиеся вещества, как, например, гумусовые, характеризуются не сформировавшейся до конца структурой гумусовых молекул, высокое плодородие почв является динамически неустойчивым. Таким образом, вся система крайне неустойчива и не способна переносить экстремальные условия, которые создаются при антропогенном воздействии. Следовательно, почвы пойм являются оптимальной моделью в научных исследованиях по прогнозированию последствий антропогенного воздействия, а исследуемым параметром – их биологическая активность. Известно, что активность ферментов является устойчивым и чувствительным показателем биологической активности почв (Makoi, Ndakidemi, 2008; Burns et al., 2013; Хазиев, 2015). В этой статье рассмотрим показатели активности ферментов в пойменных целинных торфяных почвах и их изменение в условиях осушения дренажем.

Исследуемые торфяные пойменные почвы имеют реакцию среды, близкую к нейтральной, что объясняется высоким содержанием подвижного кальция и магния и валовых их форм, накапливающихся в результате гидрогенной аккумуляции в процессе затопления поймы паводковыми водами. Состав гумуса торфяных почв характеризуется как фульватно-гуматный: отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот равно 1,1–1,3 (табл. 1). Высокое содержание гуминовых и фульвовых кислот отмечается в поверхностном слое 0–20 см, с постепенным снижением вниз по профилю. В составе гуминовых кислот преобладает фракция ГК-3. Следует отметить также и высокое содержание в торфяном профиле нерастворимого остатка 50,8–53,3 % за исключением поверхностного слоя, в котором его содержание самое низкое – 38,5 %.

Таблица 1

Групповой и фракционный состав органического вещества целинных торфяных почв (доля от общего углерода)

Глубина, см	С <sub>общ</sub> , %	Гуминовые кислоты по фракциям, %				Фульвокислоты по фракциям, %					Нерастворимый остаток, %	С <sub>гк</sub> /С <sub>фк</sub>
		1	2	3	Сумма	1а	1	2	3	Сумма		
0–20	33,64	7,8	10,5	10,2	28,5	2,6	8,4	5,9	5,0	21,9	38,5	1,3
20–40	47,73	3,6	4,1	10,8	18,7	1,1	4,8	6,5	4,3	16,7	52,3	1,1
40–60	46,89	3,2	2,5	12,9	18,6	1,0	4,3	3,2	6,0	14,5	52,1	1,3
60–80	47,26	3,7	4,8	10,1	18,6	1,1	3,3	7,1	5,5	17,0	51,5	1,1
80–100	47,69	2,7	3,3	11,8	17,8	1,1	3,4	5,5	6,3	16,3	50,8	1,1
100–120	46,11	5,6	5,6	8,7	19,9	1,3	3,2	5,4	5,6	15,5	53,3	1,3

Примечание к таблице. С<sub>гк</sub> – углерод гуминовых кислот; С<sub>фк</sub> – углерод фульвовых кислот.

Главной проблемой освоения торфяных почв поймы является активизация процессов мобилизации резервных запасов азота в доступные для растений соединения. В исследуемых торфяных почвах основная часть азота (98 %) сосредоточена в недоступной для растений форме органических соединений (табл. 2). В отличие от минеральных почв в торфяных пойменных почвах осокового и древесно-осокового вида количество легкогидролизующего азота достаточно высокое (11,2–16,1 %), что отчасти объясняется составом их органического вещества, сформированного в гидроморфных биоклиматических условиях Западной Сибири. В этих условиях процессы мобилизации азота идут интенсивно именно до легкогидролизующих соединений, дальнейшая же минерализация и накопление минеральных форм азота протекает замедленными темпами.

Таблица 2

Фракционный состав азота в целинных торфяных почвах

Слой, см	Валовой	Легкогидролизующий	Подвижный	Легкогидролизующий	Подвижный
	мг/100 г почвы			Доля от валового, %	
0–20	1100	126,0	23,9	11,4	2,1
20–40	1650	238,0	18,3	14,4	1,1
40–60	1340	172,8	12,3	12,8	0,9
60–80	1300	145,6	21,7	11,2	1,6
80–100	1220	296,8	22,3	16,1	1,8

Характеристика органического вещества и фракционного азота осоковых и древесно-осоковых торфяных почв свидетельствует о благоприятных условиях для активизации ферментативных процессов в торфяном профиле.

Ферменты (гидролитические, окислительно-восстановительные) участвуют на всех этапах трансформации поступающего в почву органического вещества. С участием ферментов почва осуществляет основные биогеоценотические функции в наземных экосистемах: катализацию биохимических реакций обмена вещества и энергии и получение элементов питания для биоценологических компонентов экосистемы. Рассмотрим средние значения за многолетний период активности 9 ферментов класса гидролаз и оксидоредуктаз на примере целинных торфяных почв поймы реки Кии.

Инвертазная активность является показателем интенсивности трансформации углеводов. Легкогидролизуемые углеводы типа сахарозы и крахмала поступают в торф вместе с растительным опадом и корневыми выделениями растений. Мобилизация их совершается при участии двух ферментов – инвертазы и амилазы. Нами исследовалась инвертазная активность. Азотсодержащие простые органические соединения типа пуринов и пиримидинов преобразуются до аммиака с помощью дезаминаз, из которых нами изучена уреазы. По содержанию инвертазы торфяные целинные почвы относятся к среднеобогаченным (36,3–42,2 мг глюкозы/(г\*4 ч), а по уреазе – к низкообогаченным (0,3–1,5 мг  $\text{NH}_3^-$ /(г\*24 ч)) (табл. 3). Невысокие значения уреазной активности отчасти объясняются низким содержанием легкогидролизуемого азота в торфяном профиле – 11,2–14,4 % от валового содержания азота и только на глубине 80–100 см его содержание увеличивается до 16,1 %. Проведем сравнение полученных результатов по активности ферментов класса гидролаз с результатами по содержанию аналогичных ферментов в минеральных почвах. Получается, что активность ферментов целинных торфяных почв составляет по инвертазе 48 %, по уреазе 38 % от активности их в минеральных почвах пойм.

Следует заметить, что оценка активности ферментов была разработана еще в 1980 году Д. Г. Звягинцевым для минеральных почв и только для отдельных ферментов (Звягинцев, 1978). Но до сих пор исследователи пользуются этой оценкой активности ферментов в том числе и в торфяной почве (Szajdak et al., 2014; Наумова и др., 2018; Kim et al., 2022; Ефремова и др., 2023). Однако торфяные почвы существенно отличаются от минеральных почв своей органогенной структурой, которая выражается в их водно-физических (невысоких значениях объемного веса, высокой порозности и влагоемкости), химических (определяется составом растений-торфообразователей) и биологических (формирующихся в процессе торфогенеза) свойств. Нам представляется, что в перспективе важно разработать диагностические показатели ферментативной активности непосредственно торфяных почв, что позволит оценивать их биологическое состояние в условиях мелиоративного воздействия.

Особого внимания заслуживает степень активности в почвах пойм ферментов класса оксидоредуктаз. Активность каталазы, например, можно рассматривать как показатель функциональной активности микробиоты в различных экологических условиях, и она изменяется в торфяном профиле в пределах 0,6–2,6  $\text{см}^3 \text{O}_2$ /(г\*2 мин). Еще В. Ф. Купревич (Купревич, 1974) указывал, что в почве высокоактивный кислород, образующийся при участии каталазы, играет ответственную роль в переносе электронов при синтезе органических соединений. Показатели каталазы в исследуемых торфяных почвах при сравнении с вышеупомянутой оценочной шкалой активности ферментов для минеральных почв оказываются очень низкими. Они составляют только 8,8 % от значений для минеральных почв, что вызывает большое сомнение, так как процессы разложения углеводов, азотсодержащих веществ и образование высокомолекулярных веществ происходят активно по всему органогенному профилю торфяных почв. Более высокую активность каталаза имеет в поверхностном слое 0,6 м (2,2–2,6  $\text{см}^3 \text{O}_2$ /(г\*2 мин)). Известно также, что в разложении перекиси водорода участвуют и неферментные катализаторы, такие как соединения железа и марганца. И в пойменных торфяных почвах содержание железа резко преобладает над всеми другими зольными элементами. Таким образом, в пойменных почвах активны оба вида каталазы: ферментативная и неферментативная.

Ферриредуктазы восстанавливают соединения железа, используя кислород окиси железа в качестве акцептора электронов в окислительно-восстановительных процессах. При этом  $Fe_2O_3$  восстанавливается в закисную форму  $FeO$ . Оптимальные условия для протекания этого процесса создаются при одновременном наличии в среде окисленных форм железа, подвижных органических веществ и кислорода. Активность ферриредуктаз в торфяных почвах высокая (75,3–120,0 мг восстановленного  $Fe^{2+}/100$  г) и составляет самый большой процент от этого фермента в минеральной почве из всех рассматриваемых ферментов (75 %). Активность фермента резко увеличивается на глубине 100 см, что определяется усилением восстановительных условий в торфяном профиле.

Реакция в окислительно-восстановительной системе сульфаты  $\rightleftharpoons$  сульфиды проходит в 2 стадии. На первой стадии сульфаты восстанавливаются до сульфитов с участием фермента сульфатредуктазы, а на второй – до сульфидов с помощью фермента сульфитредуктазы. Эти ферменты относятся к числу наиболее сложных ферментов. Активность сульфатредуктазы по профилю торфяных почв характеризуется крайней неравномерностью. Низкая ее активность отмечается в верхнем 20 см слое (1,5–8,0 мг восстановленного  $SO_4^{2-}/(г*48$  ч)). Активность данного фермента увеличивается с глубиной, где, надо полагать, и происходит реализация второй стадии восстановления сульфатов. Начиная с глубины 50–60 см окислительно-восстановительный потенциал в торфяных почвах изменяется от +200 до –200 мВ, что и создает условия для протекания 2 стадии восстановления сульфатов. Подтверждением этому служит запах сероводорода – конечного продукта в реакции восстановления сульфатов, который отмечается, например, при прокладке мелиоративных каналов.

С глубиной увеличивается также активность нитрат- и нитритредуктаз (соответственно до 0,8 мг восстановленного  $NO_3^-/(г*24$  ч) и 1,4 мг восстановленного  $NO_2^-/(г*24$  ч)). По сравнению с их активностью в минеральных почвах в исследуемых почвах активность нитрат- и нитритредуктаз в 2 раза ниже. Эти ферменты восстанавливают нитраты в почве до газообразных окислов азота. Пределы изменения нитратредуктаз по профилю составляют 0,2–0,8 мг восстановленного  $NO_3^-/(г*24$  ч), нитритредуктаз 0,8–1,4 мг восстановленного  $NO_2^-/(г*24$  ч).

Таблица 3

Ферментативная активность целинных торфяных почв

Глубина, см	Инвертаза <sup>1</sup>	Уреаза <sup>2</sup>	Каталаза <sup>3</sup>	Ферриредуктаза <sup>4</sup>	Сульфатредуктаза <sup>5</sup>	Нитратредуктаза <sup>6</sup>	Нитритредуктаза <sup>7</sup>	Пероксидаза <sup>8</sup>	Полифенолоксидаза <sup>8</sup>
0–20	42,2	1,5	2,2	87,8	2,8	0,7	0,9	0,31	0,40
20–40	36,3	0,5	2,5	77,5	1,5	0,3	0,8	0,34	0,31
40–60	36,8	0,3	2,6	75,3	4,7	0,8	0,9	0,28	0,38
60–80	41,0	0,4	0,6	77,9	3,3	0,2	1,1	0,27	0,26
80–100	37,3	0,4	1,3	120,0	8,0	0,7	1,4	0,39	0,25
Доля от содержания в минеральных пойменных почвах, %									
	47,8	38,4	8,8	75,0	42,7	34,0	30,9	25,4	42,0

Примечание к таблице. 1 – мг глюкозы/(г\*4 ч); 2 – мг  $NH_3^-/(г*24$  ч); 3 –  $см^3 O_2/(г*2$  мин); 4 – мг восстановленного  $Fe^{2+}/100$  г; 5 – мг восстановленного  $SO_4^{2-}/(г*48$  ч); 6 – мг восстановленного  $NO_3^-/(г*24$  ч); 7 – мг восстановленного  $NO_2^-/(г*24$  ч); 8 – мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин).

Пероксидазы и полифенолоксидазы играют важную роль в процессах гумификации. Они участвуют в превращении органических соединений ароматического ряда в компоненты

гумуса. В исследуемых почвах эти ферменты высокой активностью не отличаются. Активность пероксидазы изменяется от 0,27 до 0,39 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин). Надо полагать, органическое вещество торфяных почв не является легкодоступным для его использования ферментами. В составе органического вещества исследуемых торфяных почв, как выше было упомянуто, наблюдается высокое содержание нерастворимого остатка 50,8–53,3 % (см. табл. 1). Но можно отметить возрастание активности пероксидазы (до 0,39 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин)) в нижней части профиля, в которой возможно накапливаются более доступные формы органического вещества.

Осушение пойменных торфяных почв и последующее их окультурирование приводит к глубоким преобразованиям их режимов, в том числе биологического, и прежде всего к изменению активности ферментов (Лагутина, Шалагинова, 2016). В таблице 4 приведены экстремальные и средние значения активности инвертазы, уреазы и каталазы в торфяных почвах поймы реки Кии за трехлетний период исследований, в который вошли разные годы по погодным условиям: сухой, близкий к среднемуголетним и влажный. В осушаемых почвах значительно увеличивается активность всех ферментов. Так, в осушаемых торфяных почвах средние значения инвертазы изменяются в пределах 13,6–40,9 мг глюкозы/(г\*4 ч), экстремальные значения – 2,0–67,8 мг глюкозы/(г\*4 ч), в то время как в торфяной целинной почве (болото Караколь) эти значения равны соответственно 9,3–23,5 и 0,8–36,5 мг глюкозы/(г\*4 ч). Степень осушения торфяной почвы также оказывает влияние на активность инвертазы. Большая активность инвертазы отмечается на варианте дренажа 1,3×25 м. По экстремальным значениям активность инвертазы изменяется в пределах 2,0–67,3 мг глюкозы/(г\*4 ч), а на варианте дренажа 0,8×25 м 5,0–55,1 мг глюкозы/(г\*4 ч).

Подобная закономерность по эффекту осушения наблюдается и в активности уреазы. Изучение активности фермента, принимающего участие в трансформации азота в торфяных почвах, представляет особый интерес, так как азот в торфяных почвах находится в основном в органической форме. Следует отметить, что уреазы имеет широкое распространение в торфяных почвах и может действовать в сравнительно широком диапазоне pH. Активность уреазы в среднем по профилю осушаемых вариантов изменяется в экстремальных значениях в пределах 0,1–4,7 мг NH<sub>3</sub>/(г\*24 ч). Более высокая ее активность проявляется в почвах с глубоким вариантом дренажа 1,3×25 м. Активность уреазы в экстремальных значениях в целинных почвах (болото Караколь) ниже – 0,2–2,9 мг NH<sub>3</sub>/(г\*24 ч). Наибольшие значения отмечаются в поверхностном слое 0–20 см.

Аналогичная закономерность отмечается и по распределению в торфяных почвах каталазы. Наименьшую активность каталаза проявляет в целинных торфяных почвах и ее значения имеют самые низкие показатели в профиле 2,1–4,6 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(г\*2 мин) с наибольшими значениями в слое 0–20 см, которые постепенно снижаются к подстилающей породе, оставаясь в 1,5–2 раза выше, чем в осушаемых почвах на обоих вариантах дренажа. В торфяных почвах на варианте дренажа 1,3×25 м пределы изменения активности каталазы имеют интервал 1,7–9,4 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(г\*2 мин), на варианте 0,8×25 м – 1,5–6,2 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(г\*2 мин).

Таким образом, можно отметить более высокую активность ферментов инвертазы, уреазы и каталазы в торфяных почвах на осушаемых вариантах и, в особенности, на варианте дренажа 1,3×25 м по сравнению с целинной торфяной почвой. Вместе с тем наибольший урожай многолетних трав был получен на варианте дренажа 0,8×25 м (107,8 ц/га сена против 74,8 ц/га на варианте 1,3×25 м и 23,4 ц/га на контроле без осушения). Согласно сопутствующим показателям (гидротермический, окислительно-восстановительный и пищевой режим) в почвах варианта дренажа 0,8×25 м были созданы оптимальные условия для формирования высокого урожая. Учитывая же широкий интервал изменения активности инвертазы в осушаемых почвах, можно предположить, что процесс трансформации органического вещества торфов в мелиорируемых торфяных почвах на период исследований находился на стадии процесса превращения углеводной части органического вещества. Вместе с тем в целинных торфяных почвах болота в пойме реки Кии (см. табл. 1) значения активности ферментов еще ниже, чем это наблюдается в целинных почвах болота Караколь.

Таблица 4

## Ферментативная активность осушаемых торфяных почв в пойме реки Кии

Вариант использования	Глубина, см	Инвертаза <sup>1</sup>	Уреаза <sup>2</sup>	Каталаза <sup>3</sup>
Торфяная осушаемая, вариант дренажа 1,3×25 м	0–20	$\frac{13,5-67,3}{38,0\pm 2,6}$	$\frac{0,7-4,2}{1,8\pm 0,1}$	$\frac{6,7-9,4}{7,7\pm 1,3}$
	20–40	$\frac{2,0-59,8}{24,1\pm 1,3}$	$\frac{1,5-4,7}{2,6\pm 0,1}$	$\frac{2,9-5,4}{4,2\pm 1,1}$
	40–60	$\frac{9,1-66,6}{29,4\pm 2,1}$	$\frac{0,9-1,5}{0,5\pm 0,3}$	$\frac{2,3-3,9}{3,1\pm 0,8}$
	60–80	$\frac{7,4-29,5}{20,6\pm 2,4}$	$\frac{0,4-1,5}{0,7\pm 0,2}$	$\frac{1,7-3,3}{2,3\pm 0,1}$
	80–100	$\frac{8,6-27,1}{13,6\pm 0,9}$	$\frac{0,8-1,9}{1,0\pm 0,1}$	$\frac{2,1-3,0}{2,4\pm 0,1}$
Торфяная осушаемая, вариант дренажа 0,8×25 м	0–20	$\frac{13,5-55,1}{40,9\pm 4,3}$	$\frac{0,5-2,5}{1,1\pm 0,1}$	$\frac{4,5-6,2}{5,4\pm 1,1}$
	20–40	$\frac{24,9-43,1}{33,5\pm 3,1}$	$\frac{0,4-0,8}{0,6\pm 0,1}$	$\frac{2,6-5,8}{4,2\pm 0,7}$
	40–60	$\frac{5,5-35,9}{21,9\pm 1,1}$	$\frac{0,2-0,5}{0,3\pm 0,0}$	$\frac{1,7-4,2}{2,8\pm 0,2}$
	60–80	$\frac{4,5-24,9}{14,8\pm 0,7}$	$\frac{0,1-0,6}{0,3\pm 0,0}$	$\frac{2,2-2,5}{2,2\pm 0,0}$
	80–100	$\frac{5,0-24,1}{18,0\pm 0,9}$	$\frac{0,2-0,6}{0,3\pm 0,0}$	$\frac{1,5-2,3}{1,8\pm 0,1}$
Торфяная, целинная (Караколь)	0–20	$\frac{10,5-36,5}{23,5\pm 2,3}$	$\frac{1,8-2,9}{2,3\pm 0,1}$	$\frac{2,2-3,7}{2,9\pm 0,3}$
	20–40	$\frac{0,8-22,5}{11,6\pm 1,2}$	–	$\frac{2,1-3,3}{2,6\pm 1,2}$
	40–60	$\frac{8,6-18,5}{12,2\pm 1,2}$	$\frac{0,3\pm 0,9}{0,5\pm 0,0}$	$\frac{3,2-4,3}{3,7\pm 0,8}$
	60–80	$\frac{1,0-17,7}{9,3\pm 0,8}$	$\frac{0,2-0,4}{0,3\pm 0,0}$	$\frac{2,3-4,6}{3,2\pm 0,2}$
	80–100	$\frac{3,4-19,0}{11,2\pm 0,4}$	$\frac{0,3-0,4}{0,3\pm 0,0}$	$\frac{2,7-4,1}{3,1\pm 0,1}$

Примечание к таблице. Числитель – экстремальное содержание за период наблюдений, знаменатель – среднее содержание; 1 – мг глюкозы/(г\*4 ч); 2 – мг NH<sub>3</sub>/(г\*24 ч); 3 – см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(г\*2 мин); «±» – доверительный интервал; «–» – не определяли; 0,8×25 м – глубина закладки дрен × междреннее расстояние.

Отсюда следует, что степень активности ферментов в пойменных торфяных почвах носит многофункциональный характер. Выделить основные факторы, регулирующие уровень ферментативной активности торфяных почв пока затруднительно и, как выше уже указывалось, для торфяных почв необходимо разработать шкалу оценки их ферментативной активности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время уже нет сомнения в необходимости оросительных, осушительных и оросительно-осушительных систем не только в южно-таежной подзоне, но и во всей таежной зоне Западной Сибири. Однако почвы – это ресурс биосферы, и в случае их разрушения заменить или импортировать их невозможно. Воздействие может быть сбалансированным формированием почв высокого уровня плодородия, а может быть разбалансированным с изъятием энергии, заключенной в почве, за счет быстрой траты естественных питательных ресурсов, что приведет к потере почвенного плодородия.

Получены показатели плодородия притеррасных почв поймы реки Кии (бассейн Оби) (согласно фракционному составу органического вещества и азота).

Определен диапазон изменения ферментативной активности в пойменных торфяных целинных почвах: инвертаза 36,3–42,2 мг глюкозы/(г\*4 ч), уреазы 0,3–1,5 мг NH<sub>3</sub>/(г\*24 ч), каталазы 0,6–2,6 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(г\*2 мин), ферриредуктазы 75,3–120,0 мг восстановленного Fe<sup>2+</sup>/100 г, сульфатредуктазы 1,5–8,0 мг восстановленного SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/(г\*48 ч), нитратредуктазы 0,2–0,8 мг восстановленного NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/(г\*24 ч), нитритредуктазы 0,8–1,4 мг восстановленного NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(г\*24 ч), пероксидазы 0,27–0,39 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин), полифенолоксидазы 0,25–0,40 мг 1,4 п-бензохинона/(г\*30 мин).

Проведенные нами исследования на мелиорируемых почвах на примере реки Кии (бассейн реки Оби) показывают, что дренажная система с вариантом дренажа 0,8×25 м создает должный уровень оптимизации биологического режима в пойменных торфяных осушаемых почвах и обеспечивает самый высокий урожай многолетних трав. Процесс активизации биологического режима в пойменных торфяных осушаемых почвах реализовался за 3-хлетний период на стадии активности ферментов гидролаз. Наши исследования показали значимость энзимологического фактора как индикатора экологического состояния торфяной почвы.

Выявлено, что существующая оценка ферментативной активности для минеральных почв (Звягинцев, 1978) не подходит для оценки биологического состояния торфяных почв и поэтому \*возникает необходимость ее разработки непосредственно для торфяных почв.

В условиях общей экологической обеспокоенности, когда к почве все более повышается интерес как к ресурсу биосферы, необходим новый качественный уровень в развитии мелиоративного проектирования, который заключается в учете биологического состояния мелиорируемой торфяной почвы с оценкой его по критериям ферментативной активности.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-26-00161, <https://rscf.ru/project/24-26-00161/>*

### Список литературы

- Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Аврова А. Ф. Сезонная активность почвенной пероксидазы в осушенных болотных сосняках Западной Сибири: системно-экологический анализ // Почвоведение. – 2023. – № 10. – С. 1244–1258. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600774>.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
- Купревич В. Ф. Почвенная энзимология // Научные труды. – Минск, 1974. – Т. 4. – 402 с.
- Лагутина Т. Б., Шалагинова Л. Н. Влияние разных видов дренажных систем длительного срока эксплуатации на режим осушения пойменных торфяных почв // Мелиорация и водное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 42–46.
- Мажайский Ю. А., Томин Ю. А., Тазина С. В., Икроми Ф., Павлов А. А. Оптимизация параметров почвенных режимов лугов Окской поймы // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2017. – № 3 (32). – С. 3–7.
- 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.
- Пономарева В. В., Николаева Т. А. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. – 1961. – № 5. – С. 88–95.
- Пыленок П. И. Влияние седиментации на качество аллювиальной почвы в пойме реки Ока // Агрофизика. – 2020. – № 4. – С. 7–13.
- Технический анализ торфа. – М.: Недра, 1992. – 358 с.
- Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник АН Республики Башкортостан. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 14–24.
- Хазиев Х. Ф. Ферментативная активность почв. – М., 1976. – 180 с.
- Burns R. G., De Forest J. L., Marken J. Soil enzymes in changing environment: current knowledge and future directions // Soil Biology and Biochemistry. – 2013. – Vol. 58, N 2. – P. 216–247.
- Kim S. Y., Zhou X., Freeman C., Kang H. Changing thermal sensitivity of bacterial communities and soil enzymes in a bog peat in spring, summer and autumn // Applied Soil Ecology. – 2022. – Vol. 173. – Article 104382.
- Makoi J. H., Ndakidemi P. A. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem // African Journal of Biotechnology. – 2008. – Vol. 7, N 3. – P. 181–193.

Szajdak L. W., Inisheva L. I., Lapshina E. D., Styła K., Gaca W., Meysner T., Szczepański M. The xanthine oxidase and phenol oxidase activity of natural peat and peat-moorsh soils // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present Proceedings of the Fourth International Field Symposium (Novosibirsk, August 4–17, 2014). – Tomsk: Publishing House of Tomsk University, 2014. – P. 30–32.

**Inisheva L. I., Porokhina E. V., Efimova S. A., Antonenko S. A. Enzymatic Activity of Soils in a Floodplain Ecosystem** // Ekosistemy. 2024. Iss. 39. P. 7-15.

The paper presents the results of studies on the biological activity of peat soils in the near-terrace part of the Kii river floodplain (Ob River basin, Tomsk region). Indicators of their fertility are given based on the fractional composition of organic matter and nitrogen. The range of changes in enzymatic activity in floodplain virgin peat soils was determined: invertase 36.3–42.2 mg glucose/(g\*4 h), urease 0.3–1.5 mg NH<sub>3</sub>/(g\*24 h), catalase 0.6–2.6 cm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(g\*2 min), ferrireductase 75.3–120.0 mg reduced Fe<sup>2+</sup>/100 g, sulfate reductase 1.5–8.0 mg reduced SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/(g\*48 h); nitrate reductase 0.2–0.8 mg reduced NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/(g\*24 h), nitrite reductase 0.8–1.4 mg of reduced NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/(g\*24 h), peroxidase 0.27–0.39 mg 1.4 n-benzoquinone/(g\*30 min), polyphenol oxidase 0.25–0.40 mg 1.4 n-benzoquinone/(g\*30 min). It was found that the drainage system with a drainage option of 0.8×25 m created the proper level of optimization of the biological regime in drained floodplain peat soils and provided a high yield of perennial grasses. The process of activation of the biological regime was realized over a 3-year period at the stage of hydrolase enzyme activity. The research clearly demonstrated the importance of the enzymatic factor as an indicator of the ecological state of peat soils. It was revealed that existing assessments of enzymatic activity for mineral soils are not suitable for assessing the biological state of peat soils and therefore in the future it is necessary to develop it directly for peat soils.

*Keywords:* floodplain, river basin, Ob River, peat soils, soil properties, hydrolases, oxidoreductases..

*Поступила в редакцию 17.04.24  
Принята к печати 02.07.24*