



# ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>


Обзор

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ

**Хазиев Ф.Х.**

Уфимский Институт биологии Уфимского  
федерального исследовательского центра РАН, Уфа  
E-mail: [bashbal@mail.ru](mailto:bashbal@mail.ru)

Ферментативная активность характеризует интенсивность биохимических процессов в почве. Приводится системно-экологическая концепция ферментативной активности почв, согласно которой формирование и функционирование ферментативной активности почвы представляет собой экологически обусловленный процесс поступления, иммобилизации и проявления активности ферментов в почве. Показана многофункциональная зависимость ферментативной активности от внутрипочвенных свойств, природных и антропогенных факторов, таких как физические, агрохимические, физико-химические свойства, гидротермический режим, физико-географические условия, агротехнологии, нефтяное загрязнение почв. Показана перспективность использования ферментативных показателей в мониторинге почв.

*Ключевые слова:* почва, ферменты, ферментативная активность, системно-экологическая концепция, экологические факторы, мониторинг почв

DOI: [10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92)

## ECOLOGICAL RELATIONS OF THE ENZYMATIC ACTIVITY OF SOIL

**Khaziev F.Kh.**

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research  
Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa  
E-mail: [bashbal@mail.ru](mailto:bashbal@mail.ru)

Enzymatic activity characterizes the intensity of biochemical processes in the soil. Provides system-environmental concept of the enzymatic activity of soils, whereby the creation and functioning of soil enzymatic activity is an environmentally induced by admission process, immobilization and the activity of enzymes in the soil. Shows a multifunctional enzyme activity dependence of soil properties, of natural and anthropogenic factors, such as physical, agrochemical, physico-chemical properties of the soils, hydrothermal, physico-geographical conditions, agrotechnology, oil contamination of the soil. It is shown that the enzymatic indicators are perspective in monitoring of the soil.

*Keywords:* soil enzymes, enzyme activity, system-environmental concept, environmental factors, soil monitoring

*Поступила в редакцию:* 18.08.2018

Ферментативная активность многофакторная и многофункциональная характеристика почв. Как наиболее адекватно отражающий изменений свойств почв этот показатель успешно применяется при мониторинге динамики почв [Казеев и др., 2004] в условиях естественно-эволюционного развития и в результате антропогенных (агрогенных и техногенных) трансформаций.

По ферментативному разнообразию почва – самая богатая природная система, поскольку ферменты всех организмов в конечном итоге поступают в почву. Почва "как биохимическая система" [Ковда, 1973] или "как система связанных (иммобилизованных) ферментов [McLaren, 1974] формируется и функционирует в качестве единого целого с согласованными и направленными биохимическими процессами, протекающими в ней, в результате многочисленных ферментативных реакций обмена веществом и энергией в биогеоценозах.

Ферменты в почвах играют важную биогеохимическую роль. Будучи мощными катализаторами биохимических процессов, они обеспечивают успешное осуществление системой "почва–микроорганизмы" ее главной общей планетарной функции – разрушения первич-

ного органического вещества и синтеза вторичного, обогащения почвы биогенными элементами и гумусом. Тем самым ферменты участвуют в осуществлении важнейших биогеоценологических функций почвы – функции катализатора биохимических процессов и функции трансформатора веществ и энергии, находящихся в биогеоценозе или поступающих в него. Осуществляя функциональные связи между почвой и населяющими ее живыми организмами через механизмы вещественно-энергетического обмена, ферменты способствуют поддержанию целостности биогеоценоза (экосистемы) [Burns et al., 2013; Хазиев, 1982, 2015], тем самым играют важную роль в экосистемных процессах и характеризуют качественное состояние почв [Karaca et al., 2011; Allison, 2006; Makoi, Ndakidermi, 2008].

**Экологическая концепция формирования ферментативной активности почв**

Ферментный пул почвы представляет собой сложный комплекс по составу и состоянию ферментов, поступающих в почву из различных источников – микроорганизмов, растений и почвообитающей фауны.

		Ферментативная активность почвы							
		абиотические ферменты							
Происхождение	накопленные в почве ферменты					постоянно выделяемые внеклеточные ферменты		Внутриклеточные ферменты делящихся микроорганизмов, корней растений, почвенной фауны	
	связанные с клетками микроорганизмов			несвязанные с клетками					
	в неделящихся живых клетках	в мертвых клетках	в клеточных фрагментах	происходившие из микроорганизмов и почвенной фауны		Происходившие из корней растений	Из микроорганизмов		Из корней растений
				Внутриклеточные ферменты разрушающихся клеток	Внеклеточные ферменты				
Локализация в почве		в жидкой фазе почвы					в организмах		
		связанные с почвенными компонентами							

**Рис.1. Состав ферментного пула почвы [по Skujins,1976]**

Ферментный пул почвы составляют (рис. 1): не связанные внеклеточные ферменты, постоянно индуцированно выделяемые микроорганизмами, корнями растений и фауной в процессе их жизнедеятельности, которые могут находиться в жидкой фазе почвы и связываться с почвенными компонентами (иммобилизация); накопленные в почве ферменты, связанные с клетками микроорганизмов (не делящихся живых и неживых клеток, клеточных фрагментов) и несвязанные с клетками (внутриклеточные ферменты разрушающихся клеток микроорганизмов и корней растений). Основную часть ферментного пула почвы составляют связанные (иммобилизованные) ферменты. Суммарная активность накопленных (иммобилизованных) и свободных внеклеточных ферментов отражает общую ферментативную активность почвы.

Почва является сложным системным образованием с относительно устойчивым ферментным уровнем и составом ферментов, характерными для определенного типа почвообразования. Формирование ферментного потенциала почвы, так же как и формирование самой почвы в целом, представляет собой сложный процесс, обусловливаемый взаимодействием экологических факторов почвообразования.

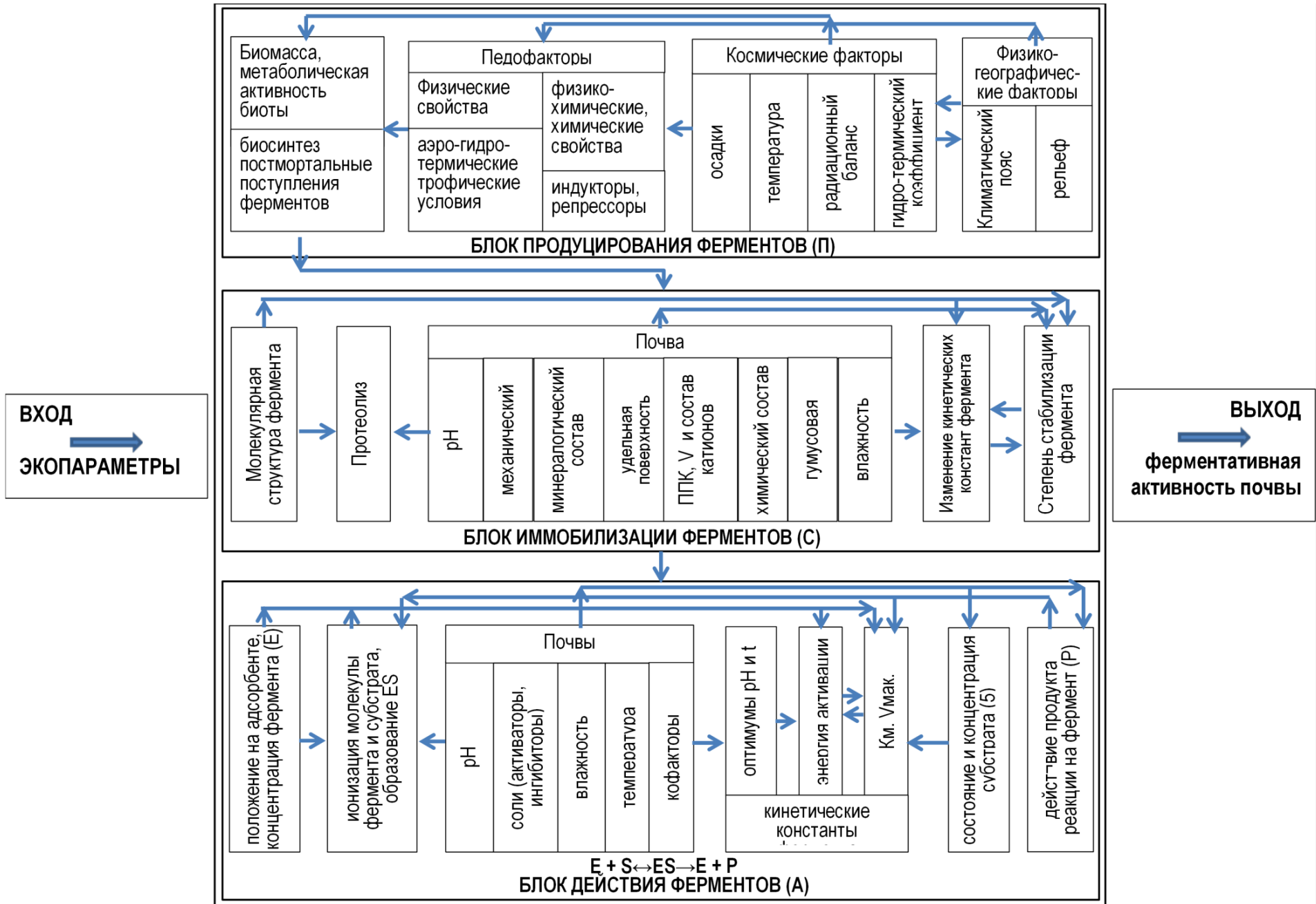


Рис.2. Концептуальная модель формирования ферментативной активности почвы

Ферменты в почве не синтезируются, а поступают из живых организмов. В соответствии с системно-экологическим принципом анализа ферментативной активности, разработанным нами [Хазиев, 1982], создание ферментного потенциала почвы и его динамика представляет собой единство процессов поступления ферментов в почву, их стабилизации (иммобилизации) и действия (активности) в почве (рис. 2).

В свою очередь, эти процессы обусловлены экологическими факторами: это – свойства самой почвы как среды обитания продуцентов ферментов, гидротермические режимы, геоморфология ландшафтов, физико-географические условия, разнообразие растительности, антропогенные воздействия и др. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения образования ферментного уровня почвы на основе экологических законов, постулирующих единство и взаимосвязанность природных процессов [Миркин, Наумова, 2005].

Предложенная системно-экологическая концепция разработана используя простую модель системного анализа сложных систем, каковой является почва, модели «черного ящика». Такая модель успешно использована И.П. Герасимовым [1975] для обоснования трехчленной формулы почвообразования – «факторы - процессы - почва». Эта модель при исследовании ферментативной активности почвы позволяет проследить за процессом формирования определенного ферментного уровня почвы и его динамики путем изучения состояния и взаимодействия экологических факторов («входы» в схеме) и характера изменения при этом уровня ферментативной активности («выходы») и оценить роль каждого из факторов. Факторы и процессы, обуславливающие во взаимодействии ферментативную активность почвы, показаны в центральной части модели, представляющей собой «черный ящик», как блок продуцирования (блок П), блок иммобилизации (стабилизации) (блок С) и блок действия (активности) ферментов (блок А). В результате взаимодействия экологических параметров (в «черном ящике») в почве формируется адекватная конкретным экологическим условиям ферментативная активность [Хазиев, 1982]. Выводом из анализа динамики ферментативной активности в связи с динамикой экопараметров являются системные принципы управления ферментативной активностью почвы через воздействие на доминантные компоненты экологических факторов - химического состава и физического состояния почвы, гидротермического режима, состава микробо- и фитоценозов экосистемы использованием различных агротехнологий, а также перспективность показателей уровня ферментативной активности в комплексе параметров экологического мониторинга почв (энзимодиагностика). Эта концепция является основной теоретической базой учения о ферментативной активности почв.

Основываясь на стратегии системно-экологического метода, мы проанализировали значение ведущих педопараметров, физико-географических и климатических условий Южного Урала в формировании и динамике ферментного уровня почвы как в естественных условиях, так и в условиях антропогенного воздействия на почву. Ниже приводятся в кратком изложении результаты исследований, не вдаваясь в подробности о причинно-следственных связях ферментативной активности с экологическими параметрами, которые имеются в известных публикациях [Хазиев, 1982, 2015]. Из обобщения следует, что при мониторинге почв по ферментативной активности необходимо учитывать экологические условия конкретного объекта. В исследованиях определялась активность наиболее важных ферментов, участвующих в превращении органических соединений углерода, азота, фосфора – инвертазы, фосфатазы, протеазы, уреазы, и окислительно-восстановительные дегидрогеназы и каталазы, которые обеспечивают почвенный метаболизм в целом.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ

**Физические свойства и ферментативная активность почв.** Важнейшие свойства почв обуславливаются *гранулометрическим составом*, в частности, сорбционная емкость, что определяет степень иммобилизации поступающих в почву ферментов. Чем выше сорбционная емкость почвы, тем больше адсорбируется ферментов [Звягинцев, 1977]. Большая часть ферментного пула почвы сосредоточена в мелкодисперсных фракциях (менее 0,001 мм). Установлено, что наиболее высокая активность у легкоглинистого чернозема выщелоченного, легко- и среднесуглинистые почвы имеют пониженную активность.

Аналогичная зависимость ферментативной активности наблюдается и от *удельной поверхности почв*, находящейся в прямой зависимости от гранулометрического состава и содержания гумуса. Почвы с большей удельной поверхностью, соответственно с большей емкостью поглощения и иммобилизации ферментов, характеризуются более высокой активностью.

Различные *структурные агрегаты почвы* не равнозначны по ферментативной активности. Гидролитические ферменты локализованы в основном в микроагрегатах – во фракциях менее 0,25 мм, окислительно-восстановительные ферменты дегидрогеназы и каталазы – в более крупных агрегатах. Большой активностью характеризуются водопрочные агрегаты [Хазиев 1982; Vach, Hofmockel, 2014]. Активность гидролитических ферментов выше на поверхности, дегидрогеназы и каталазы – внутри агрегатов.

Структурностью почвы тесно связана *плотность сложения* (объемная масса). Структурность и плотность определяют водные, теплофизические, газовые режимы микробиологическую активность в почвах и условия поступления ферментов в почву. В пределах плотности пахотных почв (1,0-1,2 г/см<sup>3</sup> – оптимальная плотность) активность гидролитических ферментов с ростом плотности снижается, активность дегидрогеназы и каталазы возрастает. Рыхление повышает ферментативную активность [Хабиров и др., 1977].

Существенную роль в ферментативной активности почвы играют состав *газовой фазы и газовый режим* в почве. В почвах при насыщении кислородом активность гидролитических ферментов и каталазы возрастала, дегидрогеназы – снизилась, а насыщение почв CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> оказывало противоположное влияние [Хазиев, 1982].

**Физико-химические свойства и ферментативная активность почв.** Основные физико-химические характеристики почв – (рН, почвенный поглощающий комплекс, емкость поглощения, состав поглощенных катионов, ОВП-потенциал) в существенной степени определяют уровень ферментативной активности. С этими свойствами связаны иммобилизация (закрепление) и сохранение активности ферментов. Почвы с большей емкостью поглощения, высокой насыщенностью поглощающего комплекса основаниями (Са, Mg) и имеющие близкие к нейтральной реакцию среды имеют более высокую ферментативную активность. Исследованные нами почвы Приуралья, имея относительно высокую емкость поглощения в связи с преимущественно тяжелым гранулометрическим составом и высокой гумусированностью, а также значительную степень насыщенности основаниями (дерново-подзолистые и серые лесные до 70-85%, черноземы до 90-98%), характеризуются благоприятными свойствами поглощающего комплекса для накопления ферментов и проявления ферментативной активности. В этих почвах благоприятное соотношение и поглощенных оснований: в их составе преобладают Са (до 80%) и Mg (9-25%). Однако при относительно благоприятных свойствах поглощающего комплекса для иммобилизации и сохранения в активном состоянии поступающих в почву ферментов, описываемые почвы имеют пониженную ферментативную

активность по сравнению с почвами западноевропейских и южных фаций [Казеев и др., 2014; Галстян, 1974; Щербаков и др., 1984]. Это главным образом следует отнести за счет более слабой деятельности продуцентов ферментов в результате относительно менее благоприятных климатических условий почвообразования.

Связи ферментативной активности с рН не однозначны в связи с тем, что для действия каждого фермента требуются оптимальное значение кислотности, в основном близкое к нейтральной и слабокислой. Так как почвы региона характеризуются относительно слабой кислотностью, рН-условия для основных ферментов в них благоприятны.

**Агрохимические свойства и ферментативная активность почв.** Роль агрохимических свойств почв в формировании ферментного потенциала почвы рассматривается с различных позиций: как условия для жизнедеятельности продуцентов ферментов (микроорганизмов, растений) (трофические условия) и как среда для функционирования поступающих в почву ферментов в качестве активаторов или ингибиторов их. В этом отношении особенное значение имеет содержание микроэлементов.

Связь ферментативной активности с устойчивыми химическими свойствами (например, валовой химический состав) четко не проявляется, наиболее тесная связь обнаруживается с динамичными агрохимическими свойствами - содержанием подвижных форм фосфора, азота и калия, особенно в условиях внесения в почву удобрений. Так, с содержанием подвижных форм фосфора, нитратов и аммония положительно коррелируют активность инвертазы, протеазы, уреазы, дегидрогеназы, фосфатазы. Однако высокое содержание фосфора подавляет фосфатазу. Тесная сопряженность ферментативной активности с агрохимическими свойствами почв наблюдается в их сезонной динамике. В целом уровень ферментативной активности характеризует состояние пищевого режима в почве [Shi, 2011].

**Гумус и ферментативная активность почв.** Гумус - главный компонент почвы, определяющий уровень ферментативной активности. Во всех случаях - в генетически различных почвах с разным содержанием гумуса, в изменении в пределах почвенного профиля (уменьшение к низу), при изменении гумусного состояния под влиянием различных агротехнологий, в частности внесения в почву органики, наблюдается положительная корреляция с содержанием гумуса. Так, в зональных почвах активность ферментов выше в черноземах, чем в серых лесных и дерново-подзолистых почвах; она возрастает при обогащении почвы гумусом внесением органических удобрений. Особенно тесные связи наблюдаются с содержанием и динамикой неспецифических органических соединений в составе гумуса, например, углеводов с инвертазой, азоторганических соединений с протеазой, фосфорорганических соединений с фосфатазой [Хазиев, 1982].

Установлена тесная связь между динамикой содержания органического вещества в почве и активностью пероксидазы и фенолоксидазы, с действием которых связан синтез гумуса в почве [Sinsabaugh, 2010; Zavarzina, 2011]. Влияние гумуса на ферментативную активность почвы многостороннее, как косвенное, через воздействие на продуценты ферментов, так и прямое - на сами ферменты, поступающие в почву. Косвенная роль почвенного гумуса в создании ферментативной активности почвы проявляется путем воздействия его на жизнедеятельность почвенных организмов и растений. С одной стороны, в гумусе накоплены основные запасы питательных веществ и биогенных зольных элементов, с другой - в значительной степени гумусом определяются такие важные физико-химические и водные свойства почвы, как структурность, буферность, емкость обмена, влагоемкость, водопроницаемость и т.д. Эти свойства почвы, определяя пищевой, водный, тепловой и воздушный режимы, обу-

словливают интенсивность жизнедеятельности, физиологическое состояние и биомассу микроорганизмов и растений и этим самым поступление ферментов в почву.

Прямое действие почвенного гумуса на ферментативную активность основано на связывании молекул ферментов с гумусовыми кислотами в почве, образуя фермент-гумусовые комплексы. При этом ферменты в почве закрепляются, сохраняя свою активность, и становясь защищенными от действия протеаз микроорганизмов. Также может проявиться и ингибирующий эффект гуминовых кислот на активность ферментов [Ladd, Butler, 1975]. Из черноземов выделяли гумус-амилазные и гумус-фенолоксидазные комплексы. Оказалось, что пероксидазы локализованы в высокомолекулярных фракциях гумусовых кислот, полифенолоксидазы – в низкомолекулярных [Гулько, Хазиев, 1992].

**Гидротермический режим в почве.** Наиболее важными из педоэкологических условий являются *температура и влажность*, определяющие функционирование всех звеньев процесса формирования и динамики ферментативной активности почв (рис.2). Оптимальной температурой для активности ферментов в почвах является 50-60°C, выше и ниже которых активность снижается. Полная инактивация происходит при 100°. При отрицательных значениях температуры актуальная активность практически не проявляется, при этом потенциальная активность сохраняется на исходном уровне [Галстян. 1974; Хазиев, 1976].

Как избыток, так и недостаток влажности отрицательно сказываются на активности ферментов. Она наиболее сильно модифицируется при высушивании почвы. В воздушно-сухой почве активность снижается на 20-30 % и более, а при реувлажнении восстанавливается.

В естественных условиях уровень ферментативная активность почв зависит от температуры воздуха и почвы, а также от количества атмосферных осадков и запасов воды в почве.

Различны оптимальные значения сочетания температуры и влажности для активности ферментов у почв, сформированных в различных климатических условиях. Наиболее благоприятные гидротермические условия создаются при сочетании температуры 20-30° и влажности 40-60 % от полной влагоемкости. В почвах в лесостепной зоне ферментативная активность лимитируется преимущественно температурой, в южных степных почвах – влажностью [Хазиев, 1976].

**Особенности динамики ферментативной активности почв.** Динамика ферментативной активности почв весьма различна как по направлению, так и по амплитудам колебаний во времени, в основном в зависимости от гидротермического режима в почве. Она подвержена *суточной, сезонной и круглогодичной динамике*. В летние месяцы в соответствии с динамикой температуры в дневные часы актуальная активность повышена, ночью происходит снижение ее.

Ферментативная активность почв тесно связана с изменениями общего климатического режима [Henry, 2012]. В природных зонах с различным климатическим режимом, выделяются следующие типы сезонной динамики ферментативной активности в почвах: 1) с летним максимумом - при пониженной активности весной и осенью, что наблюдается в лесостепной зоне с континентальным и умеренным климатом; 2) с летним минимумом - при повышенной активности весной и (или) осенью, что характерно для степных и сухостепных почв южного Предуралья и Зауралья, а в условиях засушливого лета и для почв лесостепной зоны; 3) относительно выровненный ход динамики – при устойчивом водно-термическом режиме в течение вегетационного периода.

Годичный ход ферментативных процессов в почве также тесно связан с динамикой влажности и температуры почвы. В почвах наблюдались зимние максимумы или сохранение на прежнем уровне потенциальной активности гидролитических ферментов, в летние месяцы – снижение. Актуальная активность, определяемая при естественной отрицательной температуре почвы, в зимний период не проявляется [Хазиев, 1982].

**Физико-географические условия и ферментативная активность почв.** Действие зонально-географического фактора на ферментный потенциал почвы многостороннее, что исходит из зональности климатических условий, распространения почв, растительности и микробных комплексов. Сравнительный анализ изменения ферментативной активности почв по природным зонам равнинного Предуралья показал, что наиболее высокую активность имеют почвы степной зоны (черноземы), менее активны почвы лесостепной (серые лесные) и лесной зон (дерново-подзолистые). В межзональном изменении ферментативная активность почв связана с климатическими характеристиками - температурным и водным режимом и свойствами почв. В пределах зоны наиболее активны почвы южных экосистем, в горно-лесной зоне определяется высотным уровнем. В горно-лесных почвах активность гидролитических ферментов снижается от высокогорного пояса к среднегорным и низкогорным, а активность каталазы и дегидрогеназы в такой последовательности возрастает. В пойменных почвах зональность не проявляется. Почвы прирусловой поймы характеризуются низкой, центральной части – средней и притеррасной части – высокой ферментативной активностью [Хазиев, Хабиров, 1983].

**Сравнительная ферментативная активность генетически различных почв.** В связи с формированием почв в различных гео- и биоэкологических условиях с различиями свойств и внутрипочвенных гидротермических и окислительно-восстановительных условий, почвы различного генезиса существенно отличаются друг от друга по ферментативной активности. В генетическом ряду равнинных почв ферментативная активность возрастает от дерново-подзолистых к серым лесным почвам и черноземам. Среди подтипов черноземов наиболее высокую активность имеют выщелоченные и типичные; активность типичных карбонатных, южных и обыкновенных, особенно солончаковатых и солонцеватых разновидностей последних, понижена. В почвенном профиле по генетическим горизонтам ферментативная активность сосредоточена в основном в перегнойном горизонте А. В черноземах активность распространяется на большую глубину, включая и иллювиальные горизонты [Хазиев, 1982].

Общей для всех генетически различных почв является четкая связь ферментативной активности с содержанием гумуса, механическим составом и рН. Сравнительные исследования показали, что по уровню ферментативной активности почвы региона уступают почвам Центрально-Черноземной зоны, Южных районов России, Украины и приближаются к почвам Сибири, особенно при пересчете ферментативную активность на единицу веса гумуса (насыщенность гумуса ферментом) [Казеев и др., 2004; Щербаков и др., 1984].

**Влияние эрозии на ферментативную активность почв.** При эрозии из почвы водно-воздушными потоками удаляются мелкодисперсные органо-минеральные фракции, где сосредоточена основная часть иммобилизованного ферментного пула почвы. В связи с этим эродированные почвы имеют пониженную ферментативную активность. Так, в слабо-, средне- и сильноэродированных серых лесных почвах активность инвертазы ниже на 25, 40, 50%, а в черноземе выщелоченном, соответственно, на 10, 24 и 40%. Относительное снижение ферментативной активности при эрозии в черноземах менее выражено при большей



потере ферментного пула в связи с более высокой активностью и большей мощностью гумусового профиля этих почв.

Степень эродированности почв наиболее адекватно отражают активность инвертазы и протеазы и эти ферменты рекомендуются как мониторинговые параметры. При проведении противозерозионных мероприятий происходит повышение ферментативной активности почв [Хазиев и др., 1982].

**Ферментативная активность почв в естественных и агроэкосистемах.** При сельскохозяйственном освоении естественных ландшафтов, особенно при распашке почв, происходят существенные изменения ферментативной активности. Напряженность ферментативных процессов в почвах естественных ландшафтов значительно выше, чем в пахотных почвах агроэкосистем. Почвы, находящиеся под целинной лугово-степной и лесной растительностью и долголетней залежью, характеризуются более высокой активностью, при распашке она снижается. При заселении почвы вновь естественным фитоценозом (оставление под залежь, лесопосадка) существенно активизируются ферментативные процессы. Различия в активности почв антропогенных и естественных экосистем охватывают весь почвенный профиль. При этом высокая напряженность биологических процессов в естественных почвах характерна главным образом для верхнего корнenasыщенного слоя почвенного профиля. В пахотных почвах ферментативная активность распространена на большую глубину почвенного профиля, чем в естественных луговых и подлесных почвах.

**Роль агроэкологических факторов в ферментативной активности почв.** Как показывали выше, внутрипочвенная экологическая обстановка (гидротермический режим, гранулометрический состав, физико-химические и агрохимические свойства, химический состав) определяет уровень ферментативной активности почв. В почвах агроэкосистем она контролируется различными агротехнологиями – системой механической обработки, внесением удобрений, возделыванием различных культур, мелиорацией. В этом аспекте выполнен большой объем исследований, которые проанализированы в обстоятельном обзоре [Shi, 2011].

**Удобрения.** Действие химических соединений в составе удобрений на ферментативную активность может быть как прямое (ингибиторы или активаторы действия ферментов), так и косвенное (влияние на рост и развитие почвенных организмов и растений - продуцентов ферментов). В целом удобрения являются мощным фактором воздействия на ферментативную активность почв. На всех почвах более эффективным оказалось полное минеральное удобрение (NPK), особенно в комплексе с органическими, в отличие от отдельных видов. При этом действие минеральных удобрений на различные ферменты не одинаковое. Высокие дозы фосфорных удобрений снижали активность фосфогидролитических ферментов, а при низких дозах их активность возрастала. По азотным удобрениям повышалась активность всех ферментов, особенно фосфатазы и инвертазы. Установлена значительная активация ферментов, особенно протеазы и фосфатазы, при использовании микроэлементов цинка и марганца на черноземах. Стабильно высокая ферментативная активность достигается при систематическом внесении в почву удобрений, особенно органических совместно с минеральными [Хазиев, 1982].

**Обработка почвы.** Механическая обработка почвы коренным образом изменяет ход и направление почвенно-биологических процессов. К росту ферментативной активности приводит такая система обработки, которая прогрессивно улучшает агрофизические свойства, микробиологическую деятельность, плодородие почвы в целом.

На полевых опытах установлено, что на черноземах выщелоченном и карбонатном и серой лесной почве положительное действие на ферментативную активность оказала глубокая обработка с внесением удобрений и чередование ее с мелкой в севообороте. Чередование глубокой обработки с мелким рыхлением формирует более мощный пахотный слой с повышенной ферментативной активностью. При поверхностной обработке почвы активный слой формируется только в верхней части пахотного слоя. В целом в почвах более оптимальные условия для равновесия потенциала гидролитических и окислительно-восстановительных ферментативных процессов складывается на фоне отвальной вспашки и других почвозащитных систем обработки, особенно на эродированных почвах при внесении органо-минеральных удобрений.

**Мелиорация.** В республике из почвенно-мелиоративных работ наибольшее распространение получили орошение и осушение. В условиях орошаемого земледелия в первую очередь достигается улучшение водного режима почвы, что, следовательно, вызывает изменение и других свойств, в том числе и ферментативной активности.

Динамика активности различных ферментов после орошения неодинакова. Активность фосфатазы, инвертазы и дегидрогеназы через день после полива резко возросла, несмотря на постепенное уменьшение влажности почвы в послеполивной период. Активность уреазы слабо реагировала на изменение влажности почвы при поливе. При поливе влияние минеральных удобрений на ферментативную активность значительно сильнее, чем без полива, особенно в засушливые годы. На фоне с поливом сильнее проявляется прогрессивная сторона различных систем обработки по влиянию на ферментативную активность, особенно при разноглубинно-переменной обработке.

Коренные изменения в свойствах переувлажненных почв вносит осушительная мелиорация, в т.ч. и на ферментный уровень почвы и его динамичность во времени.

На пойменных торфяно-глеевой и лугово-зернисто-глеевой почвах, осушенных комбинированным способом, произошли неоднозначные изменения их свойств, особенно солевого состава почв, что существенно отразилось в направлении эволюции их ферментативной активности. В целом при осушении и нормальном использовании осушенных массивов, возрастает особенно активность гидролитических ферментов, в почве усиливаются минерализационные процессы. При этом высокую ферментативную активность стимулирует внесение минеральных удобрений, причем более сильно в торфяно-глеевую почву, чем в минеральную лугово-зернисто-глеевую [Хазиев, 1982].

**Влияние сельскохозяйственных растений на ферментативную активность почвы.** Вклад растений в ферментный пул почвы осуществляется как прямым путем в результате выделения внеклеточных ферментов корневой системой в процессе метаболизма и внутриклеточных ферментов при микробном разложении растительных остатков, так и косвенным, проявляя ризосферный эффект на почвенную микрофлору, активизируя их жизнедеятельность корневыми экссудатами. Высокой ферментативной активностью отличаются ризосферы бобовых растений, в отличие от злаковых культур. В соответствии с этим ферментативная активность почвы под посевами бобовых растений повышенная. Так, в опытах чернозем оподзоленный под горохом и под клевером по активности гидролитических ферментов существенно превосходил почву под яровой пшеницей, озимой рожью и овсом. Влияние отдельных видов растений проявляется не только в год жизни, но и в последующие годы. Это установлено при изучении эффективности клевера, гороха и озимой ржи в качестве предшественников яровой пшеницы в севообороте.

Существенно влияет на ферментативную активность почвы возделывание растений в севообороте или монокультуре. Так, в 6-польном севообороте и бессменном возделывании отдельных сельскохозяйственных культур установлено, что в условиях плодосмена активность выше, чем под бессменными посевами. Под действием удобрений несколько снижается степень выраженности одностороннего воздействия бессменных посевов на активность ферментов. Возделывание бобовых растений и севообороты являются важными агроприемами поддержания высокой ферментативной активности в почве.

#### **Ферментативная активность почв при загрязнении нефтью и их рекультивации.**

Большие площади почвенного покрова республики испытывают деградирующее воздействие нефтепромышленных предприятий в результате механических разрушений почвы и загрязнения [Габбасова, 2004]. Высокотоксичные загрязнители почвы – нефть, нефтепродукты, промышленные растворы – вызывают существенные изменения ферментативной активности почв. На серых лесных почвах на территориях Арланского и черноземах Шкаповского месторождений была установлена существенная трансформация ферментного пула почвы при загрязнении этими ингредиентами. Подавляется активность гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов, что зависит от концентрации, состава нефти и продолжительности взаимодействия с почвой: высокие концентрации нефти (>10%) ингибируют активность ферментов, низкие (<1%) стимулируют, особенно окислительно-восстановительные ферменты. Из компонентов нефти парафиновые и циклопарафиновые углеводороды активизируют, а ароматические – ингибируют активность ферментов.

По мере биодеградации углеводородов нефти с течением времени активность постепенно восстанавливается. Ускорение разрушения нефти в почве достигается улучшением аэрации путем рыхления почвы, внесением навоза, минеральных удобрений, что приводит к росту ферментативной активности.

Особенно сильно подавляется ферментативная активность при загрязнении нефтепромышленными растворами, в составе которых содержатся высокие концентрации солей и тяжелых металлов, которые являются ингибиторами ферментов [Новоселова, Волкова, 2016].

Разработаны технологии рекультивации деградированных при нефтедобыче почв, основанные на улучшении аэрации и пищевого режима, использовании стимуляторов роста, интродукции в почву активных углеводородоокисляющих микроорганизмов в составе биопрепаратов [Габбасова, 2004].

**Загрязнение тяжелыми металлами и ферментативная активность почв.** Почвы в промышленных зонах городов, в районах размещения горнодобывающих предприятий, вдоль автомагистралей, иногда сельскохозяйственных угодий, особенно при применении высоких доз минеральных удобрений, загрязняются тяжелыми металлами. Исследования, проведенные на различных почвах республики, показали, что тяжелые металлы, особенно высокие их концентрации, в существенной степени влияют на общую биологическую, в том числе и на ферментативную активность почв [Новоселова, Волкова, 2016]. Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность не всегда однозначно, но в большинстве случаев подавляют, что зависит от вида металлов, самих ферментов, свойств почв. Малые концентрации (обычно ниже ПДК) иногда повышают активность некоторых ферментов, с ростом концентрации она подавляется. В опытах показано, что Pb, Zn, Cu, Cd подавляли активность гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов в почвах, что зависело от концентрации металлов и времени взаимодействия. Черноземы более устойчивы к действию тяжелых металлов и значительно нивелируют отрицательное влияние их на ферментативную активность.

**Ферментативная активность как диагностический показатель при мониторинге почв (энзимодиагностика).** Ферментативная активность является одним из чувствительных показателей тех или иных изменений, происходящих в почвах как в процессе их естественного эволюционного развития, так и под воздействием антропогенных факторов, о чем свидетельствует выше изложенная информация по результатам наших исследований и литературные данные. Поэтому обоснованно рекомендуется использовать показатели ферментативной активности в почвенно-мониторинговых исследованиях. Выбор того или иного фермента определяется решаемой задачей и характером антропогенного фактора. Наиболее показательными являются те ферменты, которые обеспечивают наиболее важные метаболические процессы в почве. Из гидролитических ферментов наиболее информативны: инвертаза, фосфатаза, протеаза, уреазы, из окислительно-восстановительных – дегидрогеназа. Предложен комплексный метод биологического мониторинга почв – интегральный показатель биологического состояния почв (ИБПС), представляющий собой суммарный показатель активности некоторых ферментов и групп микроорганизмов [Казеев и др., 2004].

Таким образом, уровень ферментативной активности почв определяется совокупным действием естественных и антропогенных экологических факторов. Показатели активности ферментов эффективно использовать как диагностический показатель при характеристике генетических особенностей почв, оценке эффективности агротехнологий – удобрений, обработки почвы, севооборотов, мелиорации, уровня плодородия, характеристике фосфатного и азотного состояний почв, влияния эрозии, загрязнения почв пестицидами и нефтью, оценке эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв и в других мониторинговых исследованиях природной среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габбасова И.М. Деградация и рекультивация почв Башкортостана. Уфа: Гилем. 2004. 304 с.
2. Галстян А.Ш. Ферментативная активность почв Армении. Ереван: Айастан. 1974. 274 с.
3. Герасимов И.П. Опыт генетической диагностики почв СССР на основе элементарных почвенных процессов // Почвоведение. 1975. № 5. С. 3-10
4. Гулько А.Е., Хазиев Ф.Х. Фенолоксидазы почв: продуцирование, иммобилизация, активность // Почвоведение. 1992. № 10. С. 55-61.
5. Звягинцев Д.Г. Проблемы биохимии почв // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 1977. № 1. С. 74-84.
6. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России. Ростов-на-Дону. 2004. 350 с.
7. Ковда В.А. Основы учения о почвах. М.: Наука. 1973. Т. 1. 447 с.
8. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Основы общей экологии. М.: Университетская книга. 2015. 200 с.
9. Новоселова Е.И., Волкова О.О. Влияние моно- и полизагрязнения тяжелыми металлами на ферментативную активность почв // Тез. Докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Белгород. 2016. Ч. 1. С. 193-194.
10. Хабиров И.К., Гарифуллин Ф.Ш., Хазиев Ф.Х. Влияние плотности и влажности на биохимические свойства выщелоченного чернозема // Азотный фонд и биохим. свойства почв Башкирии. Уфа: БФАН СССР. 1977. С. 104-117.

11. Хазиев Ф.Х. Температура и влажность как экологические факторы биологической активности почв // Экология. 1976. № 6. С. 50-55
12. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука. 1982. 203 с.
13. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник АН РБ. 2015. Т.10. № 2. С. 14-24.
14. Хазиев Ф.Х., Хабиров И.К. Физико-географические факторы и ферментативная активность почв // Почвоведение. 1983. № 11. С. 57-65.
15. Хазиев Ф.Х., Хабиров И.К., Агафарова Я.М. Ферментативная активность эродированных почв // Биол. науки. 1982. № 4. С. 89-93.
16. Щербаков А.П., Михновская А.Д., Хазиев Ф.Х. Сравнительная характеристика микробиологических и ферментативных показателей черноземов Европейской части СССР // Почвоведение. 1984. № 10. С. 45-52.
17. Allison S.D. Soil minerals and humic acids alter enzyme stability: implications for ecosystem processes // Biogeochemistry. 2006. V. 81. № 6. P. 361-373.
18. Bach S.M., Hofmockel K.S. Soil aggregate isolation method of intra-aggregate extracellular enzyme activity // Soil Biology & Biochemistry. 2014. V. 69. № 1. P. 54-62.
19. Burns R.G., DeForest J.L., Marxen J. et al. Soil enzymes in changing environment: Current knowledge and future directions // Soil Biology & Biochemistry. 2013. V. 58. № 2. P. 215-234.
20. Henry H.A. Soil extracellular enzyme dynamics in changing climate // Soil Biology & Biochemistry. 2012. V. 47. № 1. P. 53-59.
21. Karaca A., Cetin S.C., Turgay O.S., Kizilkaya R. Soil enzymes as indication of soil quality // Soil Enzymology. Berlin: Springer-Verlag. 2011. P. 119-148.
22. Ladd J.N., Butler J.H.A. Humus-enzyme systems and synthetic organic polymer-enzyme analog // Soil Biochemistry. N.Y.: Marcel Dekker. 1975. V. 4. P. 143-194.
23. Makoi J.H., Ndakidemi P.A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem // African Journ. of Biotech. 2008. V. 7. № 3. P. 181-191.
24. McLaren A.D. Soil as system of bound enzymes // Chem. and Ind. 1974. № 7. P. 316.
25. Shi W. Agricultural and ecological significance of soil enzymes: soil carbon sequestration and nutrient cycling // Soil Enzymology. Berlin :Springer-Verlag. 2011. P. 43-61
26. Sinsabaugh R.I. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil // Soil Biology & Biochemistry. 2010. V. 47. № 3. P. 391-404.
27. Skujins J.J. Extracellular enzymes in soil // CRC Crit. Rev. Microbiol. 1976. V. 4. P. 383-421.
28. Zavarzina A.G. Heterophase synthesis of humic acids in soils by immobilized phenol oxidases // Soil Enzymology. Berlin: Springer-Verlag. 2011. P. 187-205.