

УДК 631.46:579.0

МОНИТОРИНГ ЦЕЛЛЮЛАЗНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ КАК БИОЛОГИЧЕСКОГО ИНДИКАТОРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ СТЕПНОГО ЗАУРАЛЬЯ ПОСЛЕ ВВЕДЕНИЯ ЗАПОВЕДНОГО РЕЖИМА

© Л.Н. Плеханова, А.В. Потапова (Прохорова)

Ключевые слова: залежные земли; самовосстановление; микробиологическая активность почв; целлюлазная активность почв.

Рассмотрены темпы разложения целлюлозы в целинных и залежных черноземах степного Зауралья (на примере почв заповедника «Аркаим» в Челябинской области). Приведен прогноз самовосстановления целлюлазной активности почвы залежей до показателей целины на основании 10-летних наблюдений в период после заповедания. Согласно прогнозу, целлюлазная активность изученной залежи на неогеновых глинах долинного склона будет приближаться к целинной к 2045 г. в линейном тренде, через 57 лет после прекращения сельскохозяйственного использования в виде распахки. В то же время залежь на четвертичных супесях центра долины уже пришла к зональным показателям, через 25 лет после начала заповедания.

Степь и лесостепь среди природных зон России подверглись наиболее сильной антропогенной трансформации. Многолетние наблюдения за изменениями биологической активности почв дают представления о направлении и результатах самовосстановления микробиоценозов залежей после снятия антропогенного воздействия, позволяя выработать стратегию природопользования в нарушенных местообитаниях. Одним из показателей скорости биологической трансформации растительных остатков в биоценозе является целлюлазная активность почв как интегральный индикаторный показатель биологической активности почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения динамики целлюлазной активности черноземов велись нами с 1999 по 2011 гг. на территории лесничества Степное Ильменского государственного заповедника, расположенного в степной зоне Челябинской области в пределах приподнятого Зауральского пенепплена. Лесничество широко известно как заповедник «Аркаим» и находится в долине, образованной при слиянии рек Б. Караганки (приток р. Урал) и р. Утяганки. *Заповедный режим введен с 1991 г.*, в связи с открытием археологических памятников эпохи бронзы.

Климат резко континентальный с малоснежной и холодной зимой, сухим и жарким летом. Вегетационный период 170 дней, за год выпадает 250–330 мм осадков, из них 45 % летом и 12 % зимой, за вегетационный период всего 130–180 мм. Характер летних осадков преимущественно ливневый. При малооблачной погоде почва сильно нагревается (до 65 °С) и подвергается действию суховея (до 30 м/с). Годовая испаряемость в 1,5–2 раза превышает годовое количество осадков. Коэффициент увлажнения равен 0,44–0,77, ГТК Селянинова не превышает 0,8–1,0 (по станции Бреды – 1,1). *Заморозки в глубоких долинах на 2–5 °С интенсивней, чем на открытых территориях, а на вершинах сопков они на 2 °С слабее.*

Сохранение кор выветривания Зауральского пенепплена стало возможным благодаря режиму унаследованной стабилизации, характеризующемуся малыми градиентами тектонических движений при медленном общем поднятии. Сегодня остатки неогеновой озерно-аллювиальной равнины уступают по распространенности на междуречьях лишь четвертичным суглинкам. Пребывание территории на всем ее этапе континентального развития в денудационном звене осадочно-седиментационного цикла геологического круговорота благоприятствовало сохранению в сфере почвообразования редких по свойствам субстратов: позднепалеозойских, мезозойских, палеогеновых, неогеновых пород, палеогеновых кор выветривания, часто перекрывающиеся небольшим по мощности чехлом четвертичных суглинков. *Именно на неогеновых глинах расположены наши площадки наблюдения 3 и 4, по которым мы даем столь длительный прогноз самовосстановления.*

Для степной зоны Урала региональным условием дифференциации свойств почв в пространстве является ландшафтная асимметрия, связанная с широтным простиранием рек региона. Короткие и крутые склоны обращены преимущественно к югу, а длинные и пологие ориентированы на север. Так, при изучении зависимости ферментативной активности южных черноземов под целинной растительностью от экспозиции склона выявлены различия между черноземами северных и южных склонов (у южных ниже) по энергии разложения клетчатки [1]. В пределах средней высотнo-ландшафтнoй ступени ландшафтная асимметрия обуславливает развитие долинных типов местностей преимущественно на левобережьях рек [2], как и в нашем случае на площадках 1–2.

В целом растительность заповедника можно охарактеризовать как производную от зонального типа (разнотравно-типчаково-ковыльных степей) со значительными вкраплениями «внезональных» элементов – осиново-березовых, лиственнично-березово-сосновых колков, луговой степи, полынно-типчаковой степи. В

Таблица 1

Некоторые химические свойства черноземов обыкновенных маломощных глубококарбонатных супесчаных на неоген-четвертичных отложениях

Горизонт	Глубина, см	pH водн	Ca ²⁺ обм.	Mg ²⁺	Na ⁺	ЕКО	Гумус	Сумма солей	CaCO ₃
			мг-экв на 100 г почвы				%		
A _{ПАХ}	0–25	6,6	8,8	1,5	0,1	10,9	3,3	0,02	1,0
AB	25–40	7,0	9,3	1,1	0,1	10,9	1,5	0,02	1,0
B	40–55	7,8	22,1	1,4	0,1	23,8	1,4	0,04	3,3
B _{ca}	55–90	8,2	22,8	1,6	0,1	24,7	0,7	0,04	6,9
BC	90–135	8,0	23,2	1,5	0,2	25,0	0,2	0,04	5,9
C	135–200	–	–	–	–	42,6	–	–	–

геоботаническом отношении территория заповедника относится к Евразийской степной области. Здесь наиболее часто встречаются разнотравно-ковыльные степи и их эдафические варианты, от богаторазнотравных до дерновинно-злаковых гигрогидрофитными и петрофитными элементами. Значительную роль в сложении этих сообществ играют эвриксерофитные и мезоксерофитные дерновинные злаки: *Stipa capillata*, *Festuca valesiaca*, *Stipa tirsia*, *Stipa zalesski* (преимущественно по южным склонам и западинам), с участием корневищных и рыхлодерновинных злаков, с обильным по влажным местам лугово-степным разнотравьем с 3–4-ярусным сомкнутым травостоем.

Особенности почвенно-растительного покрова определяются как общеклиматическими условиями, так и разнообразием геолого-геоморфологических условий – наличием мелкосопочника с остатками кор выветривания, озерно-аллювиальной поверхностью неогенового и четвертичного периодов и поверхностями уровней бывших подпрудных озер позднеплейстоценового и голоценового возраста, а также пойменной поверхностью низкого, среднего и высокого уровней.

Почвы черноземного типа являются наиболее распространенными на территории заповедника и характерны для степной зоны в целом, площадки мониторинга мы расположили на распаханых в 1960-е гг. черноземах, переведенных в залежи в связи с заповеданием. Площадки 1 и 2 расположены на придолинном плакоре, 317 м над у. м., с зональной целиной, являющейся эталонной для Красной Книги почв, кадастровый № 75 [3]. Целлюлазная активность почв сравнивалась в парах «залежь–целина» для элементов рельефа: на низкой аллювиальной террасе с черноземом супесчаным расположены площадки 1 и 2, некоторые химические свойства почвы приводим в табл. 1 (анализы выполнены в центре коллективного пользования ИФХиБПП РАН), на пологом склоне долины, 332 м над у. м., на черноземе обыкновенном маломощном суглинистом – площадки 3–4.

Природным заповедникам отводится важная роль в осуществлении экологического мониторинга, и наша работа решает задачи слежения за фоновым эталоном и регенерационными трендами самовосстановления залежей. Аналогичные исследования степных черноземов велись только в Центрально-Черноземном заповеднике [4], что позволяет считать наши результаты уникальными в региональном плане.

До введения заповедного режима на залежах производились подсевы многолетних трав, и геоботаниче-

ски массивы этих земель к началу наблюдений являлись лугами. Залежь площадки 2 была залужена *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC в 1982 г., на залежи площадки 4 проводили залужение *Bromopsis inermis* Leyss. в 1988 г. Геоботанические описания позволяют говорить о том, что растительность эспарцетовой залежи по видовому составу и сложению близка к естественной, с отличиями лишь по проективному покрытию (на залежи показатель ниже). Состояние костровой залежи является весьма стабильным и представляет собой практически чистый костровый луг с редким вкраплением сорных растений, тогда как на сравнимой с ней целине мы видим разнотравно-ковыльную степь.

Апликационные методы разрабатывались при определении биологической активности почвы и рекомендовались для широкого использования Е.Н. Мишутиным с соавт. [5–6], давая возможность приблизиться к определению протекания процессов в природных условиях луговых биоценозов, оценить микробно-экологические пейзажи по генетическим горизонтам.

Закладка опытов проводилась нами в пяти повторностях для каждого срока экспозиции. Определение целлюлазной активности основывалось на учете остаточной массы нерасщепленной целлюлозы (апликационный метод) [7–8]. К почвенной стенке прикладывали стерилизованные льняные полотна, укрепленные с внешней стороны на полиэтиленовой пленке. Закладка осуществлялась в слой 0–20 см на срок, близкий к длительности всего вегетационного сезона с последовательным снятием каждый месяц сезона. Экспериментально закладка полотен осуществлялась глубже – 0–40 см (в 2001, 2003–2004 и 2004–2005 гг.). Годичные экспозиции полотен закладывались в 2004–2009 гг.

Ежедневные показатели температуры и влажности воздуха предоставлены нам метеорологической станцией специализированного историко-культурного и природно-ландшафтного центра «Аркаим». Применялись методы традиционного химического анализа почв, апликационный метод закладки полотен, сравнительно-хронологический, сравнительно-географический и почвенно-археологический методы оценки почвенных профилей. Результаты опыта обработаны с помощью факторного дисперсионного анализа с использованием пакетов программ ANOVA/COHORT и STATISTICA 6. Также для оценки действия факторов (глубина, угоды, почва, срок) применялся критерий Дункана (Duncan's Multiple Range Test) с расчетом доверительного интервала (НСП) при 95 % значимости результата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамика целлюлазной активности прослеживается внутри вегетационного сезона, где велика зависимость от поступающих тепла и влаги, причем для степного Зауралья лимитирующим является фактор влаги. Для изученных площадок на глубине 0–40 см зависимость интенсивности целлюлозоразлагающей активности микроорганизмов от температуры воздуха является прямой тесной, $r = 0,82$ (корреляции Пирсона); зависимость от количества выпавших осадков является прямой средней, $r = 0,60$. Максимум биологической активности на всех изученных почвах приходится на слой 10–20 см, что обусловлено длительным сохранением влаги на этой глубине.

Результаты факторного дисперсионного анализа зависимости целлюлазной активности черноземов от угодья (залежь/целина), почвы (площадки 1, 2 и 3, 4), глубины закладки полотна позволяют заключить: разницы между активностью микроорганизмов на целине и залежи является достоверной.

Отметим, что на черноземе обыкновенном супесчаном целлюлазная активность выше на целине под разнотравно-ковыльной луговой степью. Биота целины находится в равновесном состоянии и наиболее устойчива к погодным изменениям. При этом находящаяся рядом залежь (разнотравно-ковыльный луг, ранее – эспарцетовый луг) демонстрирует наибольшую зависимость от изменений температуры и влажности воздуха вследствие антропогенной нарушенности.

Для сравнения интенсивности целлюлозоразлагающей активности за разные годы мы рассчитали скорости разложения льняного полотна в сутки (табл. 2) и среднюю скорость за вегетационный сезон. Для первой группы площадок, расположенных на аллювиальной террасе, скорость разложения целлюлозы на залежи начинает повышаться в сезоны 2005–2006 гг., достигает целинных значений 2007 г. и далее держится на этом уровне, т. е. залежь достигает целинных значений по показателям целлюлазной активности (экспозиции годовичные) через 16 лет после введения заповедного режима (табл. 3, рис. 1а) и через 25 лет после последней вспашки с посевом трав, что объясняется циклами сукцессионной динамики сообществ и соответствует полному циклу восстановления степной растительности при сукцессионной динамике степных фитоценозов (15–20 лет) [9–10].

Первоначальные высокие скорости разложения целлюлозы на залежи соответствуют сохранению в растительном покрове эспарцета, который обогащает почву азотом и не конкурирует с микроорганизмами за этот ресурс. Как известно, скорость разложения целлюлозы находится в прямой зависимости от содержания доступного микроорганизмам азота [11]. Этот период соответствует I–II стадии сукцессии с постепенным снижением участия бобовых. III стадия характеризуется высоким доминированием *Calamagrostis epigeios*, который более требователен к содержанию азота в почве. Тем самым он выступает конкурентом микроорганизмов в питании, замедляя их рост и активность [12]. Это соответствует нашим данным по снижению скорости разложения целлюлозы. На IV стадии доминируют растения *Calamagrostis epigeios*, *Poa angustifolia*, *Bromopsis inermis*, *Stipa zaleskii*, *Elytrigia intermedia*, *Arrhenatherum elatius*, чья потребность в азоте ниже, чем у вейникового сообщества III стадии.

Таким образом прослежена зависимость скорости разложения целлюлозы почвенной биотой от характера растительного ценоза.

Вторая группа площадок находится на склоне Аркаимской долины южной экспозиции. Для данной территории подобное расположение обуславливает более низкую, чем на равнине биологическую активность [13]. Сукцессия растительности также отличается от первой группы площадок, т. к. участок был засажен ко-страми (Костер (кострец) безостый *Bromopsis inermis* (Leyss). *Holub*, *Bromus inermis* Leyss.), которые в типичных случаях являются доминантами и содоминантами на всех этапах восстановления залежи и имеют сходные с ковылем требования к условиям среды.

Кострец безостый – эксплерент; без внесения удобрений через 10 лет его численность в фитоценозе снижается [8]. Однако в нашем случае кострец безостый остается доминантом залежного фитоценоза на протяжении всего времени наблюдения, что можно связать с особенностями почвы (тяжелый суглинок), плотное сложение которой не дает корням растений проникнуть вглубь. Корни костреца как рыхлокустового злака в норме не проникают в почву глубже 10 см. Таким образом, особенности сложения почвы благоприятствуют длительному сохранению за кострецом доминирующей роли. В целом, в отличие от ранее рассмотренной залежи, участок является более стабильным.

Тренд биологической активности на суглинистых целине и залежи (площадки 3–4) в слое 0–20 см показывает возрастание скорости деструкции с течением времени (с мая по сентябрь, в течение трех лет). Однако на залежи процесс происходит активнее, поскольку на залежи восстанавливается биота, а целина равнове-

Таблица 2

Динамика целлюлазной активности за вегетационные сезоны

Площадки	Глубина, см	Средняя скорость разложения полотна, %/сут.		
		1999 г.	2000 г.	2001 г.
Целина 1	0–10	0,39	0,63	0,51
	10–20	0,39	0,48	0,49
Залежь 2	0–10	0,44	0,45	0,34
	10–20	0,39	0,44	0,42
Целина 3	0–10	0,36	0,36	0,40
	10–20	0,30	0,43	0,44
Залежь 4	0–10	0,16	0,23	0,21
	10–20	0,16	0,26	0,32

Таблица 3

Динамика целлюлазной активности при годовичных экспозициях

Площадка	Глубина, см	Скорость разложения полотна при сроке экспозиции 1 год (приведено по году снятия), %/сут.				
		2004	2005	2006	2007	2009
Целина 1	0–10	0,17	0,12	0,15	0,18	0,14
	10–20	0,19	0,14	0,14	0,19	0,18
Залежь 2	0–10	0,09	0,09	0,07	0,18	0,15
	10–20	0,16	0,07	0,13	0,26	0,15

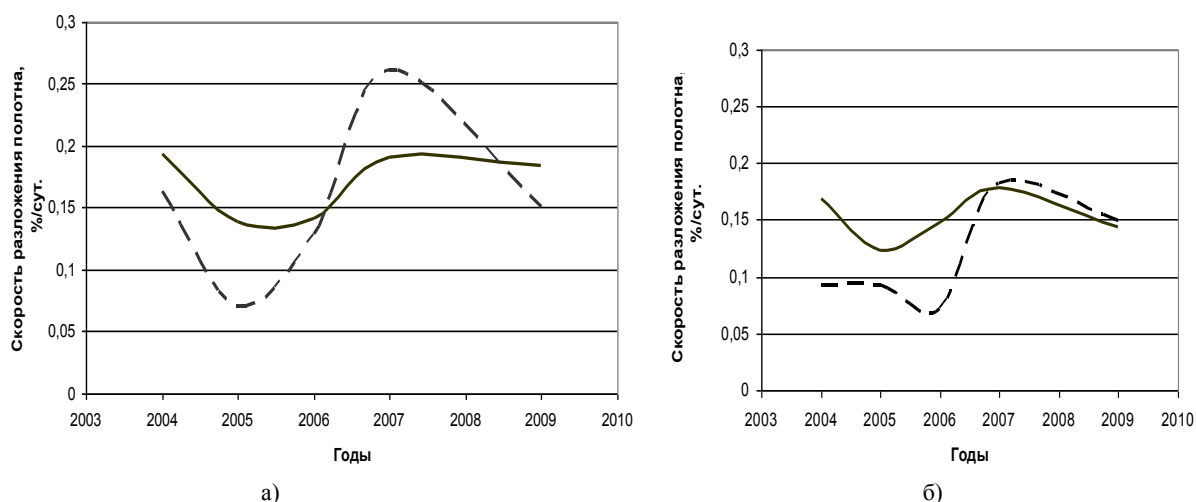


Рис. 1. Интенсивность целлюлолитической активности черноземов супесчаных при прекращении антропогенного воздействия (по данным годичных экспозиций, а – слой с глубины 0–10 см; б – слой 10–20 см). Условные обозначения: — — целина 1; — — — залежь 2

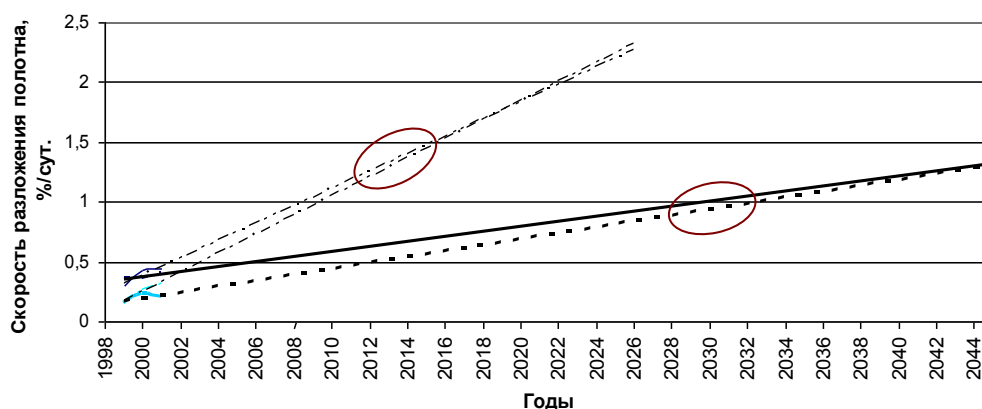


Рис. 2. Оценка интенсивности целлюлазной активности чернозема суглинистого на целине и залежи в линейном тренде самовосстановления микробного сообщества почв после прекращения распашки. Условные обозначения: линейные тренды — — — — залежь 4, 0–10 см; — — — — целина 3, 0–10 см; — залежь 4, 10–20 см; — — целина 3, 10–20 см

на. Для этих почв мы посчитали возможным дать прогноз восстановления одного из интегральных показателей биологической активности почвы – целлюлазной активности (рис. 2). Согласно прогнозу, на полное самовосстановление микробной активности почв до целинных значений в линейном тренде понадобится от 30 до 50 лет в заповедном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На залежах на черноземах супесчаных наблюдается положительная динамика целлюлазной активности. Легкий гранулометрический состав почв, плакорный участок, положение в центре долины способствуют самовосстановлению залежи, геоботанически приближенной к целине. Зафиксированная среднегодовая целлюлозоразлагающая активность почвы этой залежи в слое 0–10 см достигла равновесных целинных значений в 2007 г., через 25 лет после последнего подсева трав; в слое 10–20 см – на год раньше, в 2006 г.

Для черноземов суглинистых динамика биологической активности разнотравно-ковыльной степи и кустового луга сходна при доминировании абсолютных значений на целине. Состояние залежи площадки 4 является стабильным, соответствует кустовому лугу (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), целлюлазная активность микробных сообществ в слое 0–20 см в целом очень низкая, причем сообщества целины достоверно активнее сообществ залежи. Суглинистый с переходом к глине гранулометрический состав почв, расположение на делювиальном склоне долины, где метеорологически фиксируется более низкая температура, чем в центре долины, генетическое происхождение почв на редком субстрате – озерно-аллювиальной поверхности с неогеновыми глинами – способствуют сохранению необычайно устойчивой растительности чистого кустового луга и медленному восстановлению биологической активности почв. Согласно построенному линейному трендовому прогнозу, биологическая активность этой залежи в слое 10–20 см достигнет значений цели-

ны к 2022 г., через 34 года после последнего подсева костров, в слое 0–10 см – через 57 лет, к 2045 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Милякова Е.А.* Зависимость ферментативной активности черноземов южных Общего Сырта от экспозиции склона // Биология – наука XXI века: тез. докл. Междунар. конф. Пушино, 2003. С. 415–416.
2. *Чибилев А.А.* Долинные типы местностей Общего Сырта и вопросы их мелиорации // Речные системы и мелиорация: материалы 14 пленума геоморфологической комиссии АН СССР. Новосибирск, 1977. С. 108–111.
3. *Плеханова Л.Н.* Некоторые результаты работ по созданию Красной Книги почв Челябинской области // Вестник ЧелГУ. 2010. № 8 (189). Экология. Природопользование. Вып. 4. С. 29–35.
4. *Савченко Л.А., Бойко О.С., Оликова И.С.* Целлюлозоразрушающая активность мощного типичного чернозема в зависимости от режима его использования и экологических факторов // Многолетняя динамика природных процессов и биологическое разнообразие заповедных экосистем Центрального Черноземья и Алтая // Тр. Центрально-Черноземного госзаповедника. М.: КМК Scientific Press Дев, 1997. Вып. 15. С. 30–44.
5. *Мишустин Е.Н., Востров И.С.* Аппликационные методы в почвенной микробиологии // Микробиол. и биохим. иссл. почв. Киев: Урожай, 1971. С. 3–12.
6. *Методы почвенной микробиологии и биохимии* / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1980. 224 с.
7. *Мишустин Е.Н., Петрова А.Н.* Определение биологической активности почвы // Микробиология. 1963. Т. 32. Вып. 3. 479–483.
8. *Почвенный и биотический мониторинг заповедных экосистем.* М.: КМК Scientific Press LTD, 1996. 105 с.
9. *Миронычева-Токарева Н.П.* Сукцессии степных экосистем при полном заповедании (на примере заповедника «Аркаим») // Степи и лесостепи Зауралья: материалы к исследованиям: тр. музея-заповедника «Аркаим». Челябинск: Крокус, 2006. С. 31–43.
10. *Миронычева-Токарева Н.П., Левит А.И.* Деградация пастбищных угодий южной степной зоны Челябинской области // Аркаим. По страницам древней истории Южного Урала. Челябинск: Изд-во Крокус, 2004. С. 185–190.

11. *Mendelsohn Irving A., Sorrell Brian K., Brix Hans, Schierup Hans-Henrik, Lorenzen Bent, Maltby Edward.* Controls on soil cellulose decomposition along a salinity gradient in a *Phragmites australis* wetland in Denmark // Aquatic Botany. 1999. V. 64. № 3–4. P. 381–398.
12. *Работнов Т.А.* Экология луговых трав. М.: Изд-во МГУ, 1985. 176 с.
13. *Русанов А.М., Милякова Е.А.* Роль ландшафтной асимметрии в формировании почв и почвенного покрова Предуралья // Вестник ОГУ. 2005. № 4. С. 108–113.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ.

Поступила в редакцию 7 июля 2014 г.

Plekhanova L.N., Potapova (Prokhorova) A.V. SOIL CELLULOSE ACTIVITY MONITORING AS BIOLOGICAL INDICATOR OF STEPPES URAL RESERVOIRS RECOVERING AFTER PROTECTED MODE INTRODUCTION

Dynamics of cellulose decomposition activity of chernozems in steppe zone of Ural Plateau are investigated (on example of reserve Arkaim in Chelyabinsk region). As objects of studies were the soils with natural vegetation as well as unploughed soils. The observations carried out during last 10 years after introduction reserved mode. The purpose of the observations was to study natural reconstruction of soil microbial properties after stopping the agricultural treatment. According to the forecast the integralny indicator of soil biological activity – cellulase activity – reservoir analysis will approach the virgin by 2045, 57 years after the cessation of agricultural use in the form of plowing. At the same time the deposit in quaternary sandy of valley's center already reached zonal rates after 25 years of the beginning of work.

Key words: cellulose decomposition; natural reconstruction; agricultural treatment; unploughed soils; cellulase activity of soil.

Плеханова Людмила Николаевна, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушино-на-Оке, Московская область, Российская Федерация, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: dianthus1@rambler.ru

Plekhanova Lyudmila Nikolaevna, Institute of Physical-Chemical and Biological Problems in Soil Science RAS, Pushchino-on-Oka, Moscow region, Russian federation, Candidate of Biology, Associate Professor, Senior Scientific Worker, e-mail: dianthus1@rambler.ru

Потапова (Проخورова) Анна Викторовна, Костромской государственный университет им. А.Н. Некрасова, г. Кострома, Российская Федерация, аспирант, e-mail: dianthus1@rambler.ru

Potapova (Prokhorova) Anna Viktorovna, Nekrasov Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation, Postgraduate Student, e-mail: dianthus1@rambler.ru