Экология

УДК 631.4:631.8(470+213.1) DOI: 10.26105/AE.2018.4.79.009

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ БИОЛОГИЧЕСКИМИ И АГРОХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ БУРЫХ ЛЕСНЫХ КИСЛЫХ ПОЧВ ВЛАЖНО-СУБТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Людмила Степановна Малюкова [1], Елена Вячеславовна Рогожина [2], Дарья Викторовна Струкова [3]

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт цветоводства и субтропических культур»
354002 Краснодарский край, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28

[1] – д. б. н., гл. н. с. лаб. агрохимии и почвоведения, проф. РАН; e-mail: MalukovaLS@mail.ru
[2] – н. с. лаб. агрохимии и почвоведения; e-mail: RogojinaEW@yandex.ru
[3] – к. б. н., с. н. с. лаб. агрохимии и почвоведения; e-mail: strukovadaria@gmail.com

Для диагностики состояния агрогенно-измененных почв по биологическим показателям необходимо установить зависимости последних от комплекса свойств почв, изменяющихся с их окультуриванием. С этой целью были проведены сопряженные исследования (в сезонной и годовой динамике) агрохимических и биологических свойств бурых лесных кислых почв (основного зонального подтипа) влажно-субтропической зоны России и рассчитаны корреляционные связи между ними. Была установлена средняя и высокая теснота связи показателей биологической активности (численность актинобактерий, активность уреазы и каталазы) с pH_{KCl} (r = 0,51–0,77), обменной кислотностью (r = –0,49–0,89), обменными формами кальция (r = 0,49–0,80) и магния (r = 0,55–0,76), а также с содержанием гумуса (r = 0,42–0,55). Среди таксономических групп микроорганизмов более чувствительным показателем изменения агрохимических свойств почв была численность актинобактерий, которая коррелировала со многими свойствами (pH_{KCl}, содержанием гумуса, обменных форм кальция, магния, подвижных фосфатов, различных форм азота).

Ключевые слова: *агрогенно-измененные почвы, минеральные удобрения, диагностика, агрохимические свойства, ферментативная активность, бактерии, актинобактерии, микромицеты, корреляция.*

Современные глобальные экологические проблемы, среди которых особое место занимает деградация почв, ставят задачу их сохранения, восстановления и бережного отношения к ним при использовании в сельском хозяйстве. Для оценки состояния агрогенно-измененных почв с целью разработки или корректировки агротехнологий используется комплекс наиболее важных агрохимических, физико-химических и биологических свойств [1]. В этом аспекте особое значение приобретает изучение биологических свойств, как наиболее чувствительных тест-индикаторов в обнаружении стрессовых состояний почв и экосистем [2–7]. Многие исследователи [8–10] при анализе этих показателей отмечают проблемы методического характера, противоречивость экспериментальных данных, полученных в различных экологических условиях, сложность их экстраполяции на другие типы почв и агроэкосистемы. Поэтому для зональных типов почв необходимо изучение общих закономерностей изменения биологических свойств почв как важнейших типовых характеристик при различных вариантах землепользования, а также поиск наиболее чувствительных и информативных показателей.

В этой связи была поставлена цель – исследовать корреляционные связи показателей биологической активности бурых лесных кислых почв с их агрохимическими свойствами в условиях длительно эксплуатируемых агроценозов чайной плантации в субтропической зоне России.

Методика. Исследования проводили на основном зональном подтипе почв – бурых лесных кислых почвах (плантация чая (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) и естественный фитоценоз). Исходно почва классифицировалась как бурая лесная кислая малогумусная мощная легкоглинистая на элюво-делювии аргиллитов. Почва перед закладкой опыта характеризовалась в плантажированном горизонте низким содержанием гумуса (2,5–3,2 % – по Тюрину); сильнокислой реакцией среды (pH_{KCl} около 4,0); средней и высокой обеспеченностью основными элементами: легкогидролизуемым азотом (90–110 мг/кг – по Тюрину), подвижными фосфором и калием (320–380 мг P_2O_5/кг и 225–280 мг K_2O/кг, соответственно); содержание подвижного алюминия (по Соколову) составляло 31–42 мг/100 г; степень насыщенности основаниями – 48–51%. Длительное (в течение 15–20 лет) применение различных

видов и доз макро- и микроудобрений в полевых опытах, проводившихся в насаждениях чая, привело к формированию участков (10 и 50 м^2), различающихся по комплексу агрохимических показателей (табл. 1).

Выборка (100 образцов) включала почвы естественного фитоценоза, варианта опыта без применения удобрений, варианта с длительным применением NPK и вариантов NPK+Ca; NPK+Mg; NPK+B; NPK+S; NPK+Zn; NPK+Mg+Zn+B.

В течение вегетационного периода (апрель–июнь–август–октябрь 2015 и 2016 гг.) проводили 3-точечные отборы почвенных образцов из слоя 5–20 см, наиболее подверженного агрогенному воздействию.

Определение основных агрохимических показателей изучаемых почв выполняли по общепринятым методикам [11]: pH_{KCl} – потенциометрически (ионометр pH-121); азот легкогидролизуемый (по Тюрину и Кононовой), азот нитратный (ди сульфофеноловым методом), азот аммиачный (с реактивом Несслера), фосфор подвижный (по Ониани) с колориметрическим окончанием (на приборе УСФ-01); калий подвижный по Ониани (на приборе КВАНТ-АФА). Определение ферментативной активности почв проводили в свежих образцах методами в модификации А.Ш.Галстяна: каталазы – газометрически; уреазы – колориметрически (прибор УСФ-01) [12]. Учет численности микроорганизмов проводили в свежих образцах методом разведений и высевом почвенной суспензии на элективные среды: бактерии на МПА, актинобактерии на среде Гаузе-1 с добавлением пенициллина (1 мг/л) и нистатина (50 мг/л) и микромицеты на подкисленной среде Чапека [13]. Обработка экспериментального материала проведена методом корреляционного анализа с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Для бурых лесных кислых почв изученных фитоценозов были установлены диапазоны варьирования показателей биологического компонента почв: численности основных таксономических групп микроорганизмов – бактерий, актинобактерий и микромицетов (табл. 2), активности почвенных ферментов – каталазы и уреазы (табл. 3). Экспериментальные данные демонстрировали значительные флуктуации численности сапротрофных бактерий, в меньшей степени – актинобактерий и грибов, обусловленные динамикой гидротермического режима почв и агрогенными факторами. Ферментативная активность, обусловленная деятельностью живых организмов, также варьировала в значительных пределах. В ряду рассматриваемых фитоценозов и типов землепользования прослеживались выявленные ранее тенденции влияния различных видов минеральных удобрений на биологическую активность почв [14–16]. Максимальная численность основных таксономических групп микроорганизмов была характерна для почв фоновой территории и варианта без применения минеральных удобрений (табл. 2). При внесении макроудобрений происходило существенное (на порядок) снижение численности актинобактерий; менее выражено было влияние макроудобрений на микромицеты; отсутствие угнетения проявлялось в отношении сапротрофных бактерий. Активность ферментов каталазы и уреазы также существенно варьировала в сезонной динамике в зависимости от ценоза и применяемых видов минеральных удобрений (табл. 3), что отмечалось нами и ранее [14, 16].

В целом, было установлено, что с увеличением кислотности почв снижалось содержание обменных форм кальция ($r = -0,89$) и магния ($r = -0,81$) и возрастало содержание подвижных фосфатов ($r = 0,74$).

Корреляционный анализ связи показателей биологических и агрохимических свойств бурых лесных кислых почв показал их существенную сопряженность (табл. 4). Особенно важным показателем уровня плодородия почв является содержание органического вещества и его наиболее стабильной специфической части – гумуса, определяющей структуру почв, водно-воздушный и питательный режимы. Именно гумус, согласно многочисленным исследованиям [17–19], коррелирует с биологическими показателями, что подтверждает представление о том, что накопление органического вещества и сопряженное с ним повышение биологической активности почвы являются компонентами единого процесса трансформации вещества. Не являются исключением и изученные почвы, для которых также выявлена прямая корреляция показателей биологической активности (кроме численности бактерий) с содержанием в почвах гумуса.

Уровень pH_{KCl}, изучаемых бурых лесных почв колебался в вариантах опыта в пределах 2,54–4,29 (табл. 1). Кислотность является основным лимитирующим почвенным фактором произрастания чайного растения, относящегося к ацидофилам. Показатели кислотности определяют также количественный и качественный состав микробоценоза (основного продуцента ферментов) и влияют на сохранение активности ферментов [17]. Все изученные показатели кислотности почв (pH_{KCl}, $H_{гидр.}$, $H_{обм.}$) коррелировали с численностью актинобактерий, что обусловлено их высокой чувствительностью к активности ионов H^+ в среде [20]; эта связь для гидролитической и обменной кислотности была обратной.

Аналогичная связь с показателями кислотности почв была установлена для активности уреазы, в меньшей степени – каталазы, которые,

1. Диапазоны варьирования агрохимических свойств в вариантах опыта с учетом сезонной динамики (апрель–октябрь)

	Фитоценоз, варианты землепользования	pH_{KCl}	Гумус, %	$N_{лг}$	P_2O_5	K_2O
				мг/кг		
	Буково-грабовый лес (фон)	3,58–3,81	4,7–6,0	109–111	153–172	348–368
Плантация чая	без применения агрохимических средств	3,86–4,29	3,7–4,8	94–96	151–217	347–447
	длительное применение макроудобрений	3,07–3,31	3,7–4,4	97–197	428–1014	250–430
	длительное применение макро- и микроудобрений	2,54–3,50	3,6–5,2	99–345	149–931	204–573

в свою очередь, коррелировали с численностью актинобактерий, по-видимому, являясь продуктами их метаболизма. Корреляционные отношения показателей кислотности почв с уреазой и с каталазой были обнаружены и в исследованиях [21]. Численности бактерий и грибов не коррелировали с показателями кислотности почв, что демонстрировало их более высокую толерантность в сравнении с актинобактериями.

Для содержания аммиачного азота в почвах, так же как и гумуса, прослеживалась положительная связь с численностью микромицетов и актинобактерий и отрицательная – с численностью бактерий. Отрицательные коэффициенты корреляции получены практически для всех биологических показателей с содержанием в почве легкогидролизуемого азота, а для микромицетов и актинобактерий и с содержанием нитратного азота, последующая трансформация которого может приводить к образованию токсичных нитрозоаминов [22]. В меньшей степени показатели состояния микробоценоза коррелировали с содержанием в почвах фосфора и калия. В литературе имеется мнение, что связь активности некоторых ферментов (в частности протеазы и уреазы) с содержанием в почве азота, фосфора и калия носит переменный характер: небольшие концентрации этих солей повышали активность, очень высокие – снижали [21]. Почвы чайных плантаций в процессе окультуривания и длительного применения фосфорных удобрений, а также в связи со спецификой химического состава (высокое содержание оксидов и гидроксидов железа и алюминия) накапливали фосфаты [23]. На этом фоне численность актинобактерий, активность каталазы и уреазы имели обратную корреляцию с содержанием подвижного фосфора, возможно, опосредованную параллельным увеличением кислотности почв. Содержание в почвах обменного калия положительно коррелировало только с численностью бактерий.

В проведенных исследованиях также была установлена связь активности ферментов (каталазы и уреазы) с численностью микроорганизмов, в частности актинобактерий ($r = 0,79$ и $r = 0,56$, соответственно). Согласно литературным данным, эта связь, возможно, имеет сложный характер и опосредована другими факторами – продукцией экзоферментов корней и представителей животного эдафона [24, 25].

Заключение. Таким образом, установлены коэффициенты корреляции между агрохимическими и биологическими свойствами почв, позволяющие оценить их взаимосвязь. Приведенные данные свидетельствуют о том, что показатели структурно-функционального состояния микробоценоза (численность основных таксономических групп микроорганизмов и активность почвенных ферментов) в наибольшей степени коррелировали с содержанием гумуса и кислотностью почв. Невысокая степень связи обнаружена между биологическими показателями и концентрацией в почвах подвижных форм азота, фос-

2. Диапазоны варьирования численности основных групп почвенных микроорганизмов в вариантах опыта с учетом сезонной динамики (апрель–октябрь)

	Фитоценоз, варианты землепользования	Сапротрофные бактерии ($x10^6$)	Актинобактерии ($x10^3$)	Микромицеты ($x10^3$)
		КОЕ/г абс. сух. почвы		
	Буково-грабовый лес (фон)	1,3 – 55,8	122,3 – 406,1	56,8 – 108,5
Плантация чая	без применения агрохимических средств	4,0 – 44,2	129,2 – 314,7	26,6 – 37,8
	длительное применение макроудобрений	4,0 – 25,7	13,3 – 35,1	22,7 – 49,9
	длительное применение макро- и микроудобрений	0,9 – 55,3	10,4 – 234,9	9,0 – 87,1

3. Диапазоны варьирования ферментативной активности почв в вариантах опыта с учетом сезонной динамики (апрель–октябрь)

Фитоценоз, варианты землепользования		Каталаза, мл O_2 / 1 г почвы за 1 мин.	Уреаза, мг NH_3 / 10 г за 24 ч
Буково-грабовый лес (фон)		2,3 – 11,4	9,9 – 21,1
Плантация чая	без применения агрохимических средств	1,8 – 6,2	12,4 – 21,8
	длительное применение макроудобрений	0,1 – 3,0	0,2 – 5,0
	длительное применение макро- и микроудобрений	0,1 – 4,7	0,1 – 9,1

фора и калия, вносимых с удобрениями. Среди изученного комплекса показателей биологической активности почв наиболее информативными являлись численность актинобактерий, активность каталазы и в особенности уреазы, которые коррелировали со многими изученными агрохимическими свойствами.

Литература:

1. *Козлова Н.В., Малюкова Л.С.* Методический подход к оценке бурых лесных кислых почв чайных плантаций субтропиков РФ по степени агрогенных изменений / Актуальные вопросы плодоводства и декоративного садоводства в начале XXI века: Мат-лы междунар. науч.-практ. конф., 22–26 сентября 2014 г.; ВНИИЦиСК. – Сочи, 2014. – С. 413–422.
2. *Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почвы и шкала для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
3. *Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. – Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2003. – 350 с.
4. *Trasar-Cepeda C., Leiror M.C., Gil-Sotres F.* Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality // Soil Biology and Biochemistry. – 2008. – № 40. – P. 1–10.
5. *Егоров В.С.* Агроэкологическая оценка действия и последействия разных систем удобрения в агроценозах на дерново-подзолистых почвах: Автореф. дисс. … д.б.н. – М., 2006. – 48 с.
6. *Garcıa-Ruiz R., Ochoa V., Hinojosa M. B., Carreira J. A.* Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems // Soil Biology and Biochemistry. – 2008. – V. 40. – P. 2137–2145.
7. *Беседина Т.Д., Янушевская Э.Б.* Методика диагностики состояния почв садовых экосистем влажных субтропиков при применении пестицидов // Субтропическое и декоративное садоводство. – Сочи, 2013. –Т. 48. – С. 244–278.
8. *Dick R.P.* Soil enzyme activities as indicators of soil quality. / DoranW. (Ed.), Defining Soil Quality for Sustainable Environment // Soil Science Society of America, Special Publication 35. SSSA-ASA, Madison, WI. – 1994. – P. 107–124.
9. *Bandick A.K., Dick R.* Field management effects on soil enzyme activities // Soil Biology and Biochemistry. – 1999. – №31. – P. 1471–1479.
10. *Caldwell B.A.* Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review // Pedobiologia. – 2005. – № 49. – P. 637–644.
11. Агрохимические методы исследования почв [отв. ред. А.В. Соколов]. – М.: Наука, 1975. – 656 с.
12. Практикум по агрохимии [Под ред. В.Г. Минеева]. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 687 с.
13. Методы почвенной микробиологии и биохимии. [Под ред. Д.Г. Звягинцева]. М.: Изд-во МГУ, 1991. – 303 с.

4. Коэффициенты линейной корреляции между показателями биологической активности и агрохимическими свойствами почв (n = 100)

Агрохимические показатели почв	Активность почвенных ферментов		Численность таксономических групп микроорганизмов		
	каталаза	уреаза	актинобактерии	микромицеты	бактерии
Гумус	0,42	0,49	0,55	0,50	н/з
pH_{KCl}	0,51	0,75	0,77	н/з	н/з
$H_{гидр.}$	н/з	–0,82	–0,47	н/з	н/з
$H_{обм.}$	–0,49	–0,89	–0,76	н/з	н/з
Ca^{2+}	0,49	0,76	0,80	н/з	н/з
Mg^{2+}	0,55	0,72	0,76	н/з	н/з
$N_{лг}$	– 0,31	–0,41	–0,37	–0,34	н/з
NO_3^-	–0,32	–0,47	–0,50	–0,34	н/з
NH^{4+}	н/з	н/з	0,30	0,41	–0,53
P_2O_5	–0,44	–0,66	–0,57	н/з	н/з
K_2O	н/з	н/з	н/з	н/з	0,46

Примечание: н/з – незначимые на 5% уровне вероятности коэффициенты корреляции.

14. *Струкова Д.В., Малюкова Л.С.* Активность ферментов каталазы и фосфатазы в бурых лесных кислых почвах чайных плантаций субтропиков России // Субтропическое декоративное садоводство. – Вып. 42. – Т. 2. – Сочи, 2009. – С. 118–127.
15. *Рогожина Е.В., Костина Н.В., Малюкова Л.С.* Оценка азотфиксирующей способности почв садовых агроценозов субтропической зоны России. // Вестник Московского университета. Сер. Почвоведение. – 2011. – № 1. – С. 35–38.
16. *Малюкова Л.С., Рогожина, Струкова Д.В.* Влияние длительного применения минеральных удобрений на биологическую активность почв чайных плантаций // Агрохимический вестник. – 2012. – № 2. – С. 15–17.
17. *Хазиев Ф.Х., Гулько А.Е.* Ферментативная активность почв агроценозов и перспективы ее изучения // Почвоведение. – 1991. – №8. – С. 88–103.
18. Witter E., Martensson A.M., Garcia F.V. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures // Soil Biology and Biochemistry. – 1993. – № 25, pp. 659–669. doi: 10.1016/0038-0717(93)90105-K
19. *Leita L., De Nobili M., Mondini C., Muhlbachova G., Marchiol L., Bragato G., Contin M.* Influence of inorganic and organic fertilization on soil microbial biomass, metabolic quotient and heavy metal bioavailability // Biology and Fertility of Soils. – 1999. – № 28, pp. 371–376. doi: 10.1007/s003740050506.
20. *Широких И.Г., Широких А.А., Родина Н.А., Полянская Л.М., Бурканова О.А.* Влияние кислотности почвы и токсичности алюминия на структуру микробной биомассы в ризосфере ячменя // Почвоведение. – 2004. – № 8. – С. 961– 966.
21. *Моисеева В.К.* Микробиологические и биохимические процессы превращения азота в дерново-подзолистых почвах: Автореф. дисс. … к. б. н. – Таллин, 1975. – 19 с.
22. *Barabasz W., Albińska D., Jaśkowska M., Lipiec J.* Biological Effects of Mineral Nitrogen Fertilization on Soil Microorganisms // Polish Journal of Environmental Studies. – 2002. – Vol. 11, No. 3. – P. 193– 198.
23. *Малюкова Л.С., Козлова Н.В.* Динамика плодородия бурых лесных кислых почв чайных плантаций при длительном применении различных видов и доз минеральных удобрений // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 34–41.
24. *Евдокимова Н.В.* Влияние удобрений на биологическую активность дерново-подзолистой почвы: Автореф. дисс. … к. б. н. – М.: Минсельхоз СССР, ТСХА, 1975. – 19 с.
25. *Самохвалов С.М.* Микрофлора и биологическая активность дерново-подзолистой почвы в условиях нового агрокомплекса: Автореф. дисс. … к. б. н. – М.: МГУ, 1973. – 25 с.

Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V.

ANALYSIS OF CORRELATIONS BETWEEN BIOLOGICAL AND AGROCHEMICAL PROPERTIES OF BROWN FOREST ACIDIC SOIL OF HUMID SUBTROPICAL ZONE OF RUSSIA

The relationships between biological parameters and the complex of soil properties changing under their cultivation should be installed to perform diagnostics of the agrogene-modified soils state by biological indicators. For this purpose the combined studies (in seasonal and annual dynamics) of agrochemical and biological properties of brown forest acid soils belonging to the main soil type of humid-subtropical zone of Russia were carried out and correlations between the investigated properties were calculated. The average and high density of correlation between biological activity indices (actinobacteria number, urease and catalase activity) and pH_{KCl} (r = 0.51–0.77), exchangeable acidity (r = –0.49–0.89), exchangeable calcium (r = 0.49–0.80) and magnesium (r = 0.55–0.76), as well as with humus content (r = 0.42–0.55) was established. Among the taxonomic groups of microorganisms, actinobacteria were the most informative indicator to the change of soil agrochemical properties, the number of which correlated with many of the agrochemical properties (pH_{KCl}, humus content, exchangeable forms of calcium, magnesium, mobile phosphates, various forms of nitrogen).

Keywords: *agrogene-modified soils, fertilizers, diagnostics, agrochemical properties, enzymatic activity, bacteria, actinobacteria, micromycetes, correlation.*