

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОДОРОДИЯ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЛЫВАНИИ РИСА

© 2019 г. О. А. Гуторова^{1,2,*}, В. А. Романенков^{3,4}, А. Х. Шеуджен^{1,2}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт риса
350921 Краснодар, п. Белозерный, 3, Россия*

² *Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина
350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия*

⁴ *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

**E-mail: oksana.gutorova@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.12.2018 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 10.07.2019 г.

Изучена динамика показателей плодородия лугово-черноземной почвы за 12-летний интервал времени на 3-х участках разного пользования рисовой оросительной системы, функционирующей с 1937 г. в Красноармейском р-не Краснодарского края: бессменный посев риса, рисовый севооборот, залежь. Различия оценивали по набору из 19 физических и физико-химических показателей с помощью дискриминантного анализа. Наибольший вклад в разделении сравниваемых участков вносили показатели, отражающие процессы гумификации и дегумификации, лессивирования, выщелачивания и уплотнения почвы. В общей выборке дискриминация определялась 8-ю показателями почвенного плодородия: величиной рН, содержанием обменного калия, илистой фракции, общего азота, подвижного фосфора и калия, фульвокислот и пористостью. Анализ выборки для верхних горизонтов выявил роль содержания гумуса, обменного калия, подвижного фосфора, плотности сложения и порсодержащих карбонатов, обменного калия, фракции ила, общего азота и подвижного фосфора. Наибольшая трансформация свойств почвы отмечена в условиях бессменного возделывания риса.

Ключевые слова: показатели плодородия, лугово-черноземная почва, длительное возделывание, рис.

DOI: 10.1134/S0002188119100077

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ведущих факторов, влияющих на свойства почв, используемых в рисосеянии, является ежегодное затопление рисового поля оросительной водой в течение 4–5 мес. Степень и скорость трансформированности почв рисовых агроландшафтов зависят от их генезиса и продолжительности периода возделывания риса, приводящие как устойчивым, так и временным изменениям их свойств [1]. Кратковременные изменения, в основном приуроченные к верхним слоям почвенного профиля, связаны с кольматацией и периодической сменой окислительно-восстановительных условий. Они не отражаются на классификации почв, но их суммарный эффект в итоге может привести к появлению постоянных признаков,

сказывающихся на их классификационном положении [2].

Цель работы – определить тенденции к изменению показателей плодородия лугово-черноземной почвы в условиях рисосеяния Кубани во временном интервале.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на рисовой оросительной системе ЭСП ФГУ “Красное” Красноармейского р-на Краснодарского края. Объект – лугово-черноземная почва. Почвенно-климатические условия опубликованы ранее [3].

Путем сопоставления материалов современного состояния лугово-черноземной почвы (2016 г.)

с материалами почвенных исследований, полученных в 2004 г., был проведен анализ изменения ее свойств, режимов и процессов во времени в зависимости от сельскохозяйственного использования. В пределах рисовой оросительной системы, функционирующей с 1937 г., на одних и тех же участках с интервалом 12 лет были заложены почвенные разрезы: участок 1 – бессменный посев риса в течение 80 лет, без внесения удобрений; участок 2 – возделывание риса в севообороте согласно технологии, принятой в предприятии по рекомендациям ВНИИ риса [4]; участок 3 – залежь, расположенная на рисовой оросительной системе с момента ее эксплуатации, в рисовый севооборот не вовлекалась.

Различия между 3-мя участками почвы изучали по комплексу показателей с помощью дискриминантного анализа – метода многомерной статистики для классификации 2-х или более групп совокупностей на основе нескольких переменных одновременно, реализованного в работе с помощью модуля программы STATISTICA 12 [5, 6]. Для оценки использованы индивидуальные данные образцов, отобранных и проанализированных из пахотного (Апах) и подпахотного (А) горизонтов почвы в условиях рисосеяния, а также из гумусово-аккумулятивного (Ад+А) и переходного гумусового горизонтов (АВ) в условиях залежи. Сроки отбора – 2004 и 2016 гг., общий объем выборки – $n = 72$ образца.

Плодородие почвы складывается из большого количества свойств и признаков как естественных, так и приобретенных в процессе агрогенеза, а также условий внешней окружающей среды. Учесть влияние каждого из перечисленных выше факторов при диагностике почв очень сложно. Поэтому из всего многообразия свойств почвы комплекс почвенных показателей включал 19 переменных. В дальнейшем из общего массива данных были отобраны наиболее информативные показатели, определяющие различия между исследованными участками. Средние данные представлены в табл. 1. Аналитическую часть исследования сопровождали определением содержания подвижного фосфора и калия по Чирикову; общего гумуса – методом Тюрина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову–Гриндель; запаса гумуса на единицу площади – с учетом плотности горизонтов; водорастворимого гумуса – по Кубелю–Тиманну; содержание общего азота – методом сжигания почвенных образцов в токе кислорода с помощью прибора Vario EL III (Германия); карбонатов – газоволюметрическим методом; поглощенных оснований – в 1.0 н. $\text{CH}_3\text{COONH}_4$; измерением $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ – потенциомет-

рическим методом; определением группового состава гумуса – пирофосфатным методом по Кононовой–Бельчиковой; гранулометрического состава почвы – методом пипетки с обработкой пирофосфатом натрия; плотности почвы ненарушенного сложения – по Качинскому; общей пористости – расчетным методом на основании плотности твердой фазы и плотности сложения; пористости аэрации – исходя из показателей общей пористости и объема пор, занятых водой [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование дискриминантного метода в стандартном режиме позволило выделить статистически значимые различия между сравниваемыми участками (Wilks' Lambda: 0.00019 approx. $F(38, 102) = 191.00$ $p < 0.0000$). Разделение сравниваемых участков проведено эффективно – лямбда Уилкса близка к нулю при высоком уровне значимости. Первая дискриминантная функция обеспечила учет в совокупности 76% общей дисперсии, остальные 24% учла вторая функция (табл. 2).

В дискриминантном анализе различают 2 типа коэффициентов: нестандартизованные и стандартизованные. На основе коэффициентов первого типа можно получить уравнение для каждой группы по исходным величинам переменных, позволяющее определить собственно величину дискриминантной функции. Стандартизованные коэффициенты позволяют судить об относительном вкладе конкретной переменной в величину дискриминантной функции и оценить роль каждого признака в межгрупповых различиях. Если абсолютная величина коэффициента (без учета знака) для данной переменной у всех значимых дискриминантных функций невелика, то ее можно исключить, уменьшив их число. Эта процедура называется “определение информативного списка признаков” [9].

В работе в информативный список отбирали те показатели, чьи коэффициенты намного больше других. Так как в образовании пространства, дифференцирующего участки, участвуют первая и вторая дискриминантные функции, выбор показателей проводили с учетом их вкладов в обе функции. Поскольку информативная ценность самих функций, выраженная в величине процента учета ими дисперсии комплекса признаков различна, то их учитывали при объединении коэффициентов 2-х функций в единую меру (средневзвешенные). Для выбора информативных показателей в стандартном режиме строгой формализованной процедуры нет [9]. Нами был

Таблица 1. Исходные данные для дискриминантного анализа

Показатель	Горизонт*	Средние**					
		2004 г.			2016 г.		
		участок 1	участок 2	участок 3	участок 1	участок 2	участок 3
Гумус общий (Г, %)	Апах (Ад+А)	2.88	3.12	3.78	2.27	3.04	4.71
	А (АВ)	2.53	3.01	2.21	1.91	2.90	2.01
Гумус водорастворимый (C _{вов} , % С)	Апах (Ад+А)	0.00203	0.00435	0.00442	0.00190	0.00429	0.00646
	А (АВ)	0.00214	0.00280	0.00343	0.00246	0.00495	0.00317
Запас гумуса (Г _з , т/га)	Апах (Ад+А)	95.62	94.35	137.59	72.19	90.20	157.76
	А (АВ)	60.64	112.94	69.62	61.12	130.85	62.05
Гуминовые кислоты (С _{ГК} , % С)	Апах (Ад+А)	24.20	32.18	41.15	20.71	31.81	43.95
	А (АВ)	24.80	31.00	21.77	21.00	30.01	22.30
Фульвокислоты (С _{ФК} , % С)	Апах (Ад+А)	20.88	16.28	14.90	24.80	17.00	15.11
	А (АВ)	21.87	15.74	19.00	23.77	16.52	20.00
Са ²⁺ , мг-экв/100 г	Апах (Ад+А)	20.16	25.20	26.88	16.74	24.00	26.35
	А (АВ)	22.68	28.56	24.36	20.60	24.61	24.20
Mg ²⁺ , мг-экв/100 г	Апах (Ад+А)	6.72	8.40	5.88	7.73	7.93	5.61
	А (АВ)	5.88	6.72	6.72	10.30	7.32	6.25
Na ⁺ , мг-экв/100 г	Апах (Ад+А)	1.18	1.00	1.55	1.34	1.14	1.47
	А (АВ)	1.36	1.00	1.64	1.40	1.22	1.63
K ⁺ , мг-экв/100 г	Апах (Ад+А)	0.82	1.18	1.73	0.62	1.18	1.87
	А (АВ)	1.12	1.27	0.61	0.96	1.20	0.62
P ₂ O ₅ , мг/100 г	Апах (Ад+А)	2.77	3.73	18.14	1.90	3.53	20.82
	А (АВ)	10.04	7.30	5.40	11.37	8.36	5.46
K ₂ O, мг/100 г	Апах (Ад+А)	20.20	24.40	46.61	17.22	22.86	52.00
	А (АВ)	18.67	13.88	10.30	13.60	12.77	10.06
Общий азот (N _{общ} , %)	Апах (Ад+А)	0.139	0.227	0.357	0.089	0.210	0.438
	А (АВ)	0.095	0.181	0.162	0.063	0.175	0.173
Карбонаты (% CaCO ₃)	Апах (Ад+А)	0.44	0.38	0.70	0.25	0.29	0.59
	А (АВ)	0.62	0.53	1.06	0.50	0.61	1.10
Реакция среды (рН _{Н₂О} , ед.)	Апах (Ад+А)	6.55	6.84	7.67	6.06	6.39	7.48
	А (АВ)	7.48	7.20	8.24	7.19	7.19	8.27
Илистая фракция (<0.001 мм, %)	Апах (Ад+А)	28.90	42.40	31.80	27.67	40.80	32.0
	А (АВ)	29.80	42.60	29.30	33.87	41.70	29.60
Физическая глина (<0.01 мм, %)	Апах (Ад+А)	54.00	72.00	57.90	56.60	68.73	58.60
	А (АВ)	50.80	73.90	56.70	62.03	70.70	57.00
Плотность сложения (d _v , г/см ³)	Апах (Ад+А)	1.66	1.26	1.32	1.59	1.29	1.33
	А (АВ)	1.41	1.34	1.50	1.60	1.41	1.47
Общая пористость (P _{общ} , %)	Апах (Ад+А)	40.1	53.3	50.8	41.1	52.0	50.4
	А (АВ)	47.8	50.7	44.6	41.4	48.9	46.6
Пористость аэрации (P _а , %)	Апах (Ад+А)	5.11	12.80	14.67	1.24	12.10	10.67
	А (АВ)	4.40	9.00	8.80	1.07	5.50	7.75

Примечание. Обозначения показателей те же в табл. 3–8.

*. **Участки 1–3, горизонты почвы обозначены в методике.

Таблица 2. Результаты дискриминантного анализа для общей выборки ($n = 72$)

Дискриминантная функция	Собственное значение	Лямбда Уилкса	χ^2	Степень свободы	Уровень значимости
1	124.974	0.0002	513.46	38	0.0000
2	40.332	0.0242	223.30	18	0.0000

Таблица 3. Стандартизованные коэффициенты дискриминантных функций в полном комплексе показателей для общей выборки ($n = 72$)

Показатель	Дискриминантная функция		Средневзвешенные коэффициенты
	первая	вторая	
Г, %	0.22	0.50	28.72
Г _з , т/га	1.55	0.17	121.88*
С _{вов} , % С	0.89	0.67	83.72
pH _{H₂O} , ед.	1.34	0.51	114.08*
СаСО ₃ , %	0.74	1.06	81.68
Са ²⁺ , мг-экв/100 г	0.08	0.19	10.64
Mg ²⁺ , мг-экв/100 г	0.01	0.18	5.08
К ⁺ , мг-экв/100 г	2.76	1.97	257.04*
Na ⁺ , мг-экв/100 г	0.08	0.47	17.36
<0.001 мм, %	0.92	0.03	70.64
<0.01 мм, %	0.56	0.65	58.16
d _v , г/см ³	0.31	1.15	51.16
P _{общ} , %	1.58	0.32	127.76*
P _а , %	0.27	0.58	34.44
N _{общ} , %	3.03	3.01	302.52*
P ₂ O ₅ , мг/100 г	2.93	0.25	228.68*
K ₂ O, мг/100 г	3.74	1.13	311.36*
С _{ГК} , % С	0.78	0.70	76.08
С _{ФК} , % С	1.11	0.16	88.2

*Наиболее весомые вклады в дискриминантные функции.

использован следующий подход: информативными считали показатели, чьи вклады превышали 100 у.е. (табл. 3). В разделение 3-х участков рисовой оросительной системы наиболее существенный вклад внесли 7 показателей: запас гумуса, величина рН, содержание обменного калия, общего азота, подвижных фосфора и калия, пористость почвы.

Необходимо отметить, что 3 из них относятся к стандартным агрохимическим показателям, характеризующим краткосрочные изменения плодородия почвы (рН_{H₂O}, содержание подвижных фосфора и калия). Остальные показатели являются более стабильными, характеризуют динамику органического вещества почвы во времени, ее

физическое и физико-химическое состояние. Очевидно, что в межгрупповых различиях сравниваемых участков играли роль как быстро изменяющиеся показатели, так и обладающие более длительной временной динамикой, что обосновало необходимость проведения мониторинговых исследований с постоянной периодичностью, характеризующих изменения свойств почвы.

Анализ уровня значимости *F*-критерия показал, что наиболее значимыми для дискриминации участков являлись показатели содержания в почве общего азота, подвижных форм фосфора и калия, а также общая пористость (табл. 4). При этом дискриминантный анализ на основе учтен-

Таблица 4. Анализ дискриминантных функций в полном комплексе показателей общей выборки ($n = 72$)

Показатель	Wilks' Lambda	Partial Lambda	<i>F</i> -remove (2.51)	<i>p</i> -level	Toler.	1-Toler. (R^2)
Г, %	0.00019	0.9900	0.2575	0.77396	0.0336	0.9664
Г _з , т/га	0.00022	0.8710	3.7769	0.02954	0.0533	0.9467
С _{вов} , % С	0.00024	0.7863	6.9312	0.00217	0.1743	0.8257
pН _{Н₂О} , ед.	0.00024	0.7985	6.4348	0.00322	0.0989	0.9011
СаСО ₃ , %	0.00022	0.8694	3.8294	0.02822	0.0794	0.9206
Са ²⁺ , мг-экв/100 г	0.00019	0.9876	0.3209	0.72694	0.3017	0.6983
Мg ²⁺ , мг-экв/100 г	0.00019	0.9919	0.2074	0.81340	0.2463	0.7537
К ⁺ , мг-экв/100 г	0.00023	0.8259	5.3737	0.00763	0.0153	0.9847
Na ⁺ , мг-экв/100 г	0.00022	0.8877	3.2271	0.04790	0.5121	0.4879
<0.001 мм, %	0.00026	0.7503	8.4883	0.00066	0.2973	0.7027
<0.01 мм, %	0.00023	0.8247	5.4189	0.00735	0.2411	0.7589
d _v , г/см ³	0.00025	0.7638	7.8862	0.00104	0.1711	0.8289
P _{общ} , %	0.00027	0.7147	10.1773	0.00019	0.1111	0.8889
P _а , %	0.00022	0.8639	4.0173	0.02398	0.3333	0.6667
N _{общ} , %	0.00032	0.6045	16.6847	0.00000	0.0220	0.9780
P ₂ O ₅ , мг/100 г	0.00027	0.7016	10.8430	0.00012	0.0348	0.9652
К ₂ O, мг/100 г	0.00027	0.7044	10.7026	0.00013	0.0196	0.9804
С _{ГК} , % С	0.00020	0.9781	0.5708	0.56867	0.0201	0.9799
С _{ФК} , % С	0.00025	0.7812	7.1428	0.00184	0.1762	0.8238

Примечание. Wilks' Lambda – лямбда Уилкса; Partial Lambda – частная лямбда Уилкса; *F*-remove – величина *F*-критерия, связанная с соответствующей частной лямбдой Уилкса; *p*-level – уровень значимости критерия *F*-remove; Toler. – коэффициент множественной корреляции данной переменной со всеми другими переменными модели; 1-Toler. (R^2) – толерантность, мера избыточности переменной в модели. То же в табл. 5, 7, 8.

ных 19-ти переменных позволил достичь 100% корректных отнесений почвенных образцов к каждому своему участку.

Следующим этапом было определение наиболее информативных переменных, основанное на проведении пошагового дискриминантного анализа с последовательным исключением неинформативных индексов (алгоритмический подход). Использование метода в информативном режиме позволило также выделить различия между 3-мя участками (Wilks' Lambda: 0.00088 approx. $F(16, 124) = 254.18 p < 0.0000$).

В первой графе табл. 5 приведен список информативных показателей, которые были отобраны для модели, позволяющей наилучшим образом разделить сравниваемые участки. В его перечень из первоначально 19-ти учтенных вошли: величина рН, содержание обменного калия, фракции ила, общая пористость, содержание общего азота, подвижных фосфора и калия, углерода фульвокислот. При сокращении списка до 8-ми показателей первая дискриминантная

функция обеспечила учет в совокупности 77% общей дисперсии (76% в полном списке), вторая – 23%. Доля (в %) корректных отнесений почвенных образцов к каждому своему участку также не изменилась (100%). При этом изменчивость первой дискриминантной функции определялась различиями 7-ми показателей: величины рН, содержания обменного калия, илистых фракций, фульвокислот, подвижных фосфора и калия, а также пористости: их вклады (коэффициенты) значительно превышали вклад общего азота (1.82, 3.07, 1.17, 0.79, 1.63, 3.72, 0.89 против 0.29 соответственно). Изменчивость второй функции определена различиями по содержанию в почве общего азота и обменного калия. При этом выделялись весомые вклады содержания обменного калия и подвижного фосфора в пространстве 2-х дискриминантных функций (табл. 6). Таким образом, наиболее информативными при разделении участков разного пользования в условиях рисовой оросительной системы и изменяющимися во времени оказались показатели гранулометрического со-

Таблица 5. Анализ дискриминантных функций на информативном комплексе показателей общей выборки ($n = 72$)

Показатель	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (2.62)	p-level	Toler.	1-Toler. (R^2)
pH _{H₂O} , ед.	0.00214	0.4082	44.9382	0.00000	0.1669	0.8331
K ⁺ , мг-экв/100 г	0.00186	0.4700	34.9575	0.00000	0.0243	0.9757
<0.001 мм, %	0.00265	0.3306	62.7750	0.00000	0.4797	0.5203
P _{общ} , %	0.00146	0.6000	20.6667	0.00000	0.3206	0.6794
N _{общ} , %	0.00237	0.3693	52.9330	0.00000	0.0540	0.9460
P ₂ O ₅ , мг/100 г	0.00120	0.7266	11.6618	0.00005	0.0685	0.9315
K ₂ O, мг/100 г	0.00172	0.5082	29.9971	0.00000	0.0316	0.9684
C _{ФК} , % С	0.00123	0.7140	12.4150	0.00003	0.3378	0.6622

става, физических и физико-химических свойств лугово-черноземной почвы.

Проведение пошагового дискриминантного анализа с последовательным исключением в выборке для верхних горизонтов сравниваемых участков выявило влияние 5-ти показателей почвы: содержания общего гумуса, обменного калия, подвижного фосфора, а также плотности и пористости (табл. 7). Проведение этого же анализа, но только для нижних горизонтов, позволило выделить влияние 6-ти показателей в дискриминацию сравниваемых участков: запаса гумуса, содержания карбонатов, обменного калия, илстых фракций, общего азота и подвижного фосфора (табл. 8). Список показателей для верхних и нижних горизонтов во многом сходен с результатами анализа общего массива данных, отражающих направленность почвообразовательного процесса, обусловленного выносом или накоплением органических веществ, карбонатов, минеральных элементов, илстых частиц как компонентов

устойчивого функционирования почв оросительной системы.

Выращивание риса бессменно с 1937 г. без внесения удобрений сильно отразилось на гумусном и окислительно-восстановительном режиме лугово-черноземной почвы. В ней довольно много содержится подвижного железа, представленного преимущественно трехвалентной окисленной формой (94.3–95.7% от суммы FeO + Fe₂O₃). Двухвалентные соединения железа составляют всего лишь 4.3–5.7% от суммы, и их количество не отличалось в севооборотном поле (4.7–5.6% от суммы). Это противоречило литературным данным, указывающим на накопление в почве восстановленных форм железа в бессменных посевах риса [10–13]. Поскольку в почве под бессменной культурой риса, выращиваемой без применения удобрений, сильно выражены процессы дегумификации (содержание гумуса за 12 лет снизилось с 2.88 до 2.27% на фоне его фульватизации – C_{ГК} : C_{ФК} = 0.84), восстановительные процессы при ежегодном постоянном ее затоплении развиваются за счет минерализации запасов гумуса. Потери гумуса составили 0.61% (23.4 т/га), ежегодные потери – 0.05% (1.95 т/га), содержание общего азота снизилось на 0.050%, или в 1.5 раза при увеличении соотношения C : N с 12 до 15. Содержание подвижных форм фосфора и калия снизилось на 31.0 и 15.0% соответственно. Почва через 12 лет из разряда низкой по обеспеченности фосфором стала очень низкой. Сумма обменных оснований сократилась на 8.4% в результате снижения в почвенно-поглощающем комплексе (ППК) долей катионов Ca²⁺ (с 69.9 до 63.3%) и K⁺ (с 2.8 до 2.3%) на фоне увеличения доли Mg²⁺ с 23.3 до 29.3% от суммы. Особенно заметные изменения в ППК произошли в подпахотном горизонте, что отразилось на физическом состоянии почвы, обладающей большой плотностью сложения и чрез-

Таблица 6. Стандартизованные коэффициенты дискриминантных функций в информативном комплексе показателей общей выборки

Показатель	Первая дискриминантная функция	Вторая дискриминантная функция
pH _{H₂O} , ед.	1.82	0.56
K ⁺ , мг-экв/100 г	–3.07	–3.64
<0.001 мм, %	–1.17	0.23
P _{общ} , %	–0.89	0.70
N _{общ} , %	0.29	3.50
P ₂ O ₅ , мг/100 г	1.63	1.21
K ₂ O, мг/100 г	3.72	–1.42
C _{ФК} , % С	0.79	–0.50

Таблица 7. Анализ дискриминантных функций в информативном списке показателей для выборки верхних горизонтов ($n = 36$)

Показатель	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (2.28)	p-level	Toler.	1-Toler. (R^2)
Г, %	0.00017	0.2565	42.0233	0.00000	0.1094	0.8906
K ⁺ , мг.-экв./100 г	0.00014	0.2969	34.3417	0.00000	0.1736	0.8264
d_v , г/см ³	0.00008	0.5366	12.5217	0.00012	0.5317	0.4683
P _{общ.} , %	0.00009	0.4646	16.7069	0.00001	0.7829	0.2171
P ₂ O ₅ , мг/100 г	0.00057	0.0751	178.6480	0.00000	0.2436	0.7564

Таблица 8. Анализ дискриминантных функций в информативном списке показателей для выборки нижних горизонтов ($n = 36$)

Показатель	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (2.28)	p-level	Toler.	1-Toler. (R^2)
Г _з , т/га	0.00018	0.2637	39.0888	0.00000	0.5062	0.4938
CaCO ₃ , %	0.00012	0.4152	19.7202	0.00000	0.4632	0.5368
K ⁺ , мг.-экв./100 г	0.00017	0.2794	36.0986	0.00000	0.4822	0.5178
<0.001 мм, %	0.00015	0.3319	28.1819	0.00000	0.3970	0.6030
N _{общ.} , %	0.00010	0.4674	15.9500	0.00002	0.3410	0.6590
P ₂ O ₅ , мг/100 г	0.00009	0.5321	12.3091	0.00015	0.4543	0.5457

мерной низкой пористостью. Плотность подпахотного горизонта увеличилась на 13.5%, или ежегодно на 1.1% (на 0.016 г/см³), общая пористость уменьшилась на 6.4% (табл. 1).

Аналогичная трансформация физических и физико-химических показателей плодородия почвы за тот же период, но значительно в меньшей степени, проявлялась при возделывании риса в севообороте. В пахотном горизонте сумма поглощенных оснований уменьшилась на 4.4% с преобладанием катиона Ca²⁺ до 70.0% от суммы, содержание подвижного фосфора – на 5.4%, подвижного калия – на 6.3%; общего гумуса – на 0.08%, общего азота – на 0.017%, запасы гумуса – на 4.15 т/га, или ежегодно на 0.35 т/га, что в 5.5 раза меньше, чем при выращивании риса бессменно. Заметные изменения затронули подпахотный горизонт почвы: уменьшилась сумма обменных оснований на 8.5% в результате снижения доли Ca²⁺ и повышения доли Mg²⁺, ухудшились физические показатели (табл. 1).

За время пребывания залежной почвы на рисовой оросительной системе усилились гидроморфные признаки вследствие поднятия грунтовых вод к поверхности. Если в 2004 г. они залежали на глубине 140 см, то через 12 лет – на 40 см выше. При затоплении почв рисовых полей участок залежи испытывал подтопление, на что указывало разрастание на участке гидрофитно-зла-

ковой растительности. Такие условия повлияли на уплотненное сложение почвы и выщелачивание из верхних горизонтов карбонатов, а также на повышенное содержание в ней общего и водорастворимого гумуса, общего азота, подвижных форм фосфора и калия вследствие разложения растительных остатков, поверхность которой плотно задернена естественной растительностью. Содержание последних было больше в 1.5–2.0, 1.5–3.0, 1.5–5.0, 6.0–11.0 и 2.0–3.0 раза соответственно, чем в условиях рисового севооборота и бессменной культуры риса. Ухудшение физических свойств и заметных изменений в ППК за последние 12 лет в залежи не отмечено (табл. 1).

Наблюдения за динамикой содержания карбоната кальция в почве рисовой оросительной системы позволили выявить его миграционную активность из верхних в нижележащие горизонты. За 12 лет его содержание в почве уменьшилось в 1.2–1.8 раза (табл. 1).

На основании высокой корреляции показателей плотности и пористости ($r = -0.91$), реакции среды и карбонатов ($r = 0.92$), гумуса – с общим азотом, гуминовыми кислотами, подвижным калием ($r = 0.90, 0.94$ и 0.9 соответственно), обменного калия – с азотом, гумусом, подвижным фосфором и калием ($r = 0.81, 0.89, 0.80$ и 0.83); а также азота – с общим и водорастворимым гумусом, азота – с гуминовыми кислотами и подвижным

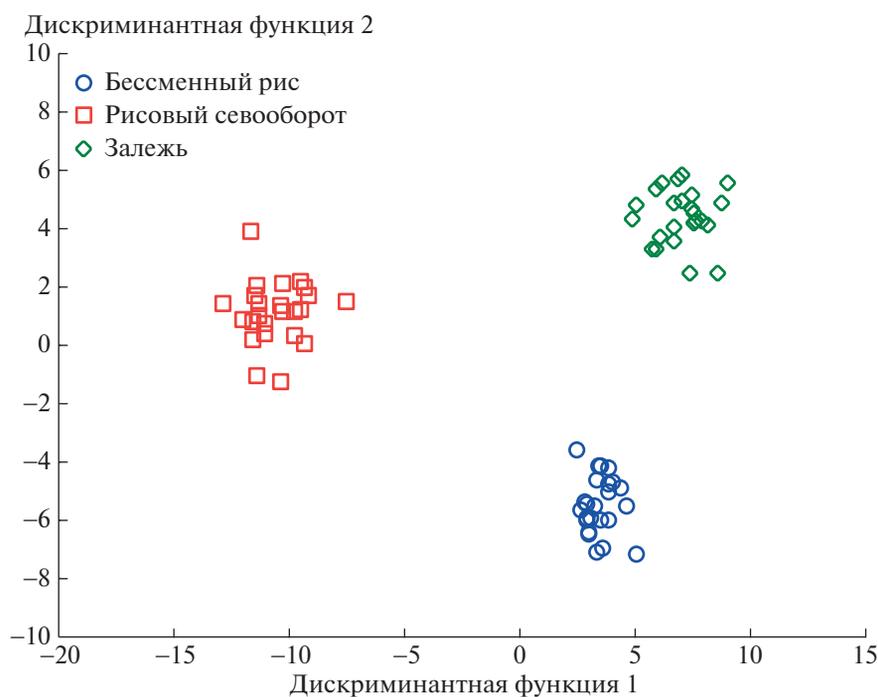


Рис. 1. Распределение участков лугово-черноземной почвы разного пользования в пространстве 2-х дискриминантных функций.

калием ($r = 0.90$ и 0.83 , $r = 0.97$ и 0.87), запаса гумуса – с общим азотом и обменным калием ($r = 0.83$ и 0.89), и более низкой: фульвокислот – с физическими показателями ($r = -0.75$ и -0.77) и азотом ($r = -0.77$), илистых частиц – с плотностью и пористостью ($r = -0.58$ и 0.65 соответственно) выделили их особое влияние на изменение свойств лугово-черноземной почвы во времени. Окончательные выводы можно сделать по результатам количественного анализа межгрупповых расстояний Махаланобиса, вычисляемых между центрами исследованных объектов в полном (табл. 4) и сокращенном (табл. 5) списках показателей, достоверность которых оценивали с помощью критерия Фишера.

Результаты исследования показали, что ранги парных межгрупповых расстояний Махаланобиса полностью сохранились при снижении числа парных сравнений во втором анализе, т.е. при сокращенном (информативном) списке показателей (табл. 9). Максимальными различиями характеризовались севооборот и залежь (686 и 328 у.е. соответственно при полном и сокращенном списке). Второй ранг расстояния занимало сравнение бессменного посева риса и севооборота (527 и 249 у.е.), а наименьшие различия обнаружены между бессменной культурой риса и залежью (266 и 118 у.е. соответственно).

Наименьшее расстояние Махаланобиса между залежью и бессменным рисом по сравнению с другими парными сравнениями можно объяснить заметной трансформацией исходных свойств почвы. Промежуточное положение по расстоянию занимают участки рисового севооборота и бессменного возделывания риса. Дистанция между данными группами большая, учитывая разницу в технологии выращивания риса.

Таким образом, сравниваемые участки лугово-черноземной почвы разного сельскохозяйственного использования различались комплексом из 8-ми показателей, и эти различия хорошо объяснимы, если учитывать условия почвообразования каждого из них: бессменный посев риса, сильно отличающийся от других ежегодным затоплением почвы без смены предшественника и внесения удобрений; рисовый севооборот – полным соблюдением технологии выращивания риса; залежь – не использованием в условиях рисосеяния.

На рис. 1 представлено распределение сравниваемых участков лугово-черноземной почвы разного пользования в пространстве первой и второй дискриминантных функций, которое достаточно четко иллюстрирует их разделение с помощью 8-ми отобранных показателей.

Характерные для бессменной культуры риса по сравнению с севооборотным полем более низ-

кие величины рН (меньше на 0.29–0.33 ед.), значительная доля фульвокислот в составе общего гумуса почвы (больше на 4.6–7.8% С), а также низкое содержание обменного калия в ППК (меньше на 30.5–47.5%), подвижных форм фосфора и калия (меньше на 25.7–46.2 и 17.2–24.7% соответственно) определялись коэффициентами первой дискриминантной функции. При наблюдаемой тенденции к изменению физико-химических показателей как при бессменном выращивании риса, так и в севообороте, различия между участками во времени будут только усиливаться. Ухудшение физического состояния лугово-черноземной почвы на участке бессменного посева риса, а именно высокая плотность пахотного и подпахотного горизонтов и соответственно, чрезмерно низкая их пористость по сравнению с севооборотным полем, в условиях которого подпахотный горизонт также сильно уплотнился, было еще одним важным фактором, прогрессирующим во времени.

Содержание в почве общего азота, обменного калия и подвижного фосфора, вносящих большие вклады во вторую дискриминантную функцию, позволяет достичь наибольшего разделения участков залежи, бессменного посева риса и рисового севооборота. Содержание общего азота в гумусово-аккумулятивном горизонте залежи превышало его количество в пахотных горизонтах бессменного посева риса в 2.5–5.0 раза и рисового севооборота в 1.5–2.0 раза, обменного калия – в 2.0 и 1.5 раза, подвижного фосфора – в 6.5–11.0 и 5.0–6.0 раза соответственно. Диагностированные изменения во времени указывали на уменьшение содержания элементов питания в условиях рисосеяния, и, наоборот, на накопление азота, высокое содержание фосфора и закрепление обменного калия почвенно-поглощающим комплексом в залежной почве.

Сравнимые участки лугово-черноземной почвы разного пользования при рисосеянии различались по гранулометрическому составу. Тяжелосуглинистой разновидностью обладали участки, занятые под бессменным посевом риса и залежью с содержанием физической глины 56.6 и 58.6% соответственно. Легкоглинистым гранулометрическим составом (68.7%) характеризовалась почва, используемая в рисовом севообороте. Такие различия обусловлены неоднородностью почвообразующих пород, представленных алювиальными легкими глинами, средними и тяжелыми суглинками в условиях рисового севооборота, бессменного посева риса и залежи соответственно. Это определенным образом характеризует пестроту плодородия почв рисовой оросительной систе-

Таблица 9. Расстояния Махаланобиса между центроидами участков на полном и информативном комплексах показателей, у.е.

Участок	Бессменный рис	Севооборот	Залежь
Бессменный рис	—*	527 (2)	266 (3)
Севооборот	249 (2)	—	686 (1**)
Залежь	118 (3)	328 (1)	—

*Выше главной диагонали приведены расстояния Махаланобиса, определенные в полном списке, ниже – информативном.

**Ранг расстояния.

мы. При этом отмеченные тенденции к увеличению содержания илистой фракции и карбонатов с глубиной почвы могут являться отражением процессов лессивирования и выщелачивания, выраженных во времени как при бессменном возделывании риса, так и в условиях севооборота. Это подтвердили результаты пошагового дискриминантного анализа, проведенного для нижних горизонтов, позволившего установить информативный вклад фракции ила и карбонатов в дискриминацию сравниваемых участков (табл. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дискриминантный анализ позволил установить трансформацию физических и физико-химических показателей лугово-черноземной почвы под воздействием культуры риса во времени (рН_{Н₂О}, содержание обменного калия, фракции ила, общего азота, подвижных фосфора и калия, углерода фульвокислот, общей пористости), обусловившие в наибольшей степени изменения ее плодородия, затронувшие пахотные и подпахотные горизонты и дальнейшую направленность почвообразовательных процессов. Для пахотных горизонтов выявлена роль содержания общего гумуса, обменного калия, подвижного фосфора, плотности их сложения и пористости, для подпахотных – запаса гумуса, содержания карбонатов, обменного калия, илистой фракции, общего азота и подвижного фосфора. В условиях рисосеяния изменения консервативных показателей плодородия почвы – гумуса, илстых частиц, карбонатов, отражающих развитие дегумификации и/или гумификации, лессиважа, выщелачивания, а также ухудшение физических и катионно-обменных свойств являются весьма очевидными. Происходящие во времени изменения имеют деградиационный характер и требуют постоянного контроля за состоянием почв, вовлеченных в рисосеяние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуторова О.А., Шеуджен А.Х. Морфогенетические особенности рисовой лугово-черноземной почвы // Рос. сел.-хоз. наука. 2016. № 4. С. 53–56.
2. Neue H.U. Management of physical properties of soils. Fifth international soil management workshop on classification and management of rice-growing soils. Taiwan, Roc., December 11–23, 1988.
3. Гуторова О.А., Шеуджен А.Х., Ладатко А.Г. Подвижность водорастворимого органического вещества почвы при возделывании риса // Докл. РАСХН. 2012. № 1. С. 28–30.
4. Система рисоводства Краснодарского края: Рекомендации / Под ред. Харитонов Е.М. Краснодар: ВНИИ риса, 2005. 340 с.
5. Щеглов С.Н. Применение биометрических методов для ускорения селекционного процесса плодовых и ягодных культур. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2005. 106 с.
6. Халафян А.А. Статистический анализ данных. STATISTICA 6.0. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2005. 307 с.
7. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Орлова Е.Е. Методы изучения содержания и состава гумуса. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 145 с.
8. Лабораторно-практические занятия по почвоведению: уч. пособ. СПб.: Проспект науки, 2009. 320 с.
9. Тюрин В.В., Щеглов С.Н. Дискриминантный анализ в биологии: монография. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2015. 126 с.
10. Бахманиар М.А. Изменение свойств почв при различных сроках возделывания рисовой культуры // Почвоведение. 2008. № 1. С. 95–101.
11. Кириенко Т.Н. Рисовые поля Украины и пути оптимизации почвообразовательных процессов. Львов: Вища шк. Изд-во Львов. ун-та, 1985. 184 с.
12. Николаева С.А., Андреева Н.П., Дерюжинская В.Д., Цветнова О.Б., Щеглов А.И. Почвенно-мелиоративное состояние окультуренных территорий дельты Кубани // Повышение продуктивности почв рисовых полей. М.: Наука, 1985. С. 15–23.
13. Бочко Т.Ф., Авакян К.М., Шеуджен А.Х., Харитонов Е.М., Черниченко И.Д., Суетов В.П. Окислительно-восстановительные процессы в почвах рисовых полей Кубани. Майкоп: ГУРИПП “Адыгея”, 2002. 52 с.

Dynamics of Fertility Indicators of Meadow Chernozem Soil with Long-Term Rice Cultivation

O. A. Gutorova^{a,b,#}, V. A. Romanenkov^{c,d}, and A. Kh. Sheudzhen^{a,b}

^aAll Russian Rice Research Institute
p. Belozerny 3, Krasnodar 350921, Russia

^bI. T. Trubilin Kuban State Agrarian University
ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia

^cM. V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, 1, p. 12, Moscow 119991, Russia

^dD. N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute for Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: oksana.gutorova@mail.ru

The dynamics of indicators of fertility of meadow-chernozem soil for 12 year time intervals was studied in three areas of different use of rice irrigation system, functioning since 1937 in Krasnoarmeysky district of Krasnodar region: permanent rice, rice crop rotation, deposit. Differences were assessed by a set of 19 physical and physico-chemical parameters using discriminant analysis. The greatest contribution to the separation of the compared sites was made by indicators reflecting the processes of humification and dehumification, loessing, leaching and soil compaction. In the total sample, discrimination is determined by eight indicators of soil fertility: pH, exchangeable potassium, clay fraction, total nitrogen, mobile phosphorus and potassium, fulvic acids and porosity. Sampling analysis for the upper horizons reveals the role of humus, exchangeable potassium, mobile phosphorus, addition density and porosity, for the lower levels – humus supply, carbonates, exchangeable potassium, sludge fraction, total nitrogen and mobile phosphorus. The greatest transformation of soil properties was observed in the conditions of permanent rice cultivation.

Key words: dynamics of fertility indicators, meadow chernozem soil, long-term rice cultivation.