

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОТВЕТА КУЛЬТУР ОВОЩНОГО СЕВООБОРОТА НА ТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯА.И. ИВАНОВ^{1, 2}, В.В. ЛАПА³, А.А. КОНАШЕНКОВ¹, Ж.А. ИВАНОВА¹

В агрофитоценозе существенную роль в пространственно-временной изменчивости условий произрастания играет неоднородность свойств почв, отмечаемая практически повсеместно. Эффективным инструментом управления продуктивностью культур в таких условиях должны стать точные системы удобрения. Их потенциал наиболее перспективен в благоприятных почвенно-климатических условиях северо-запада России при возделывании овощных культур. В выполненном нами стационарном микроповловом двухфакторном опыте в сосудах без дна площадью 1 м² искусственно сформировали верхнюю часть почвенного профиля (горизонты пахотный А_{пах} — 0-22 см и А_{2В} — 22-40 см), моделируя реально существующую литогенную мозаику агродерново-подзолистых песчаных, супесчаных, легкосуглинистых и среднесуглинистых почв слабой и хорошей степени окультуренности. Их минимальные, максимальные и средневзвешенные показатели в А_{пах} были следующими: рН_{KCl} — 4,34-6,35 и 5,40, содержание гумуса (по Тюрину) — 0,92-2,50 и 1,72 %, подвижных соединений фосфора и калия (по Кирсанову) — соответственно 125-550 и 390 мг/кг и 22-400 и 209 мг/кг. Исследовали культуры овощного севооборота редька черная (*Raphanus sativus* L.)—картофель (*Solanum tuberosum* L.)—свекла столовая (*Beta vulgaris* L.)—капуста белокочанная (*Brassica oleracea* L.)—морковь столовая (*Daucus sativus* L.). Сравнивали эффект органо-минеральных систем удобрения — зональной (ЗСУ, равномерное внесение удобрений) и двух точных (ТСУ-1 и ТСУ-2). В ЗСУ дозы удобрения по культурам определялись почвенными характеристиками: для редьки — известь (4,5 т/га) + N₉₅P₂₀K₁₂₅; картофеля — навоз (45 т/га) + N₁₀₀P₃₀K₉₀; свеклы — N₁₃₀P₅₀K₁₅₀; капусты — известь (2,1 т/га) + навоз (50 т/га) + N₁₂₀P₁₀K₉₀; морковь — N₁₀₀P₄₀K₁₃₀. В ТСУ-1 за 2 мес до посева редьки выполняли точное окультуривание почвы (внесение мелиорантов и удобрений: известь — 0-20 и 6,6 т/га; торф низинный — 0-900 и 390 т/га; фосфоритная мука — 0-750 и 94 кг/га по д.в.; сульфат калия — 0-1710 и 407 кг/га по д.в.). Далее органические и минеральные удобрения применялись в этом варианте перед посевом (посадкой) равномерно: для редьки — N₇₀K₆₀; картофеля — навоз (45 т/га) + N₈₀K₁₀₀; свеклы — N₁₀₀P₃₀K₁₃₀; капусты — навоз (50 т/га) + N₁₀₀P₁₀K₇₀; моркови — N₁₀₀P₁₀K₁₂₀. В ТСУ-2 все дозы в среднем были теми же, что в ЗСУ, но дифференцировались по каждому сосуду с учетом фактических свойств почвы. Повторность опытов 4-кратная. В полевом эксперименте точные органо-минеральные системы удобрения обеспечили повышение продуктивности овощного севооборота с 22,3 и 43,5 т/га зерновых единиц в контроле и ЗСУ до 47,9-49,4 т/га. Коэффициент вариации продуктивности севооборота снижался с 32 и 16 % в контроле и ЗСУ до 9 %, натуральная окупаемость удобрений повысилась на 21-49 %. Ответ культур на точные системы удобрения зависел от биологических особенностей, агротехники и почвенных условий. По убыванию отзывчивости культуры формировали ряд: редька черная > морковь столовая ≈ свекла столовая > картофель > капуста белокочанная. Отдача от точных систем удобрения относительно зональной снижалась при равномерном внесении высоких доз органических удобрений. Достоверное преимущество ТСУ-1 перед ТСУ-2 установлено только для столовых корнеплодов — редьки, свеклы и моркови. При проектировании точных систем удобрения следует учитывать убывающую чувствительность культур к оптимизации (снижению) доз удобрений на хорошо окультуренных участках поля в ряду капуста белокочанная > свекла столовая > морковь столовая > редька черная > картофель. Благодаря модельной дифференциации доз мелиорантов и удобрений и комплексной оптимизации свойств почвы точные системы удобрения элиминируют эффект неоднородности по окультуренности и гранулометрическому составу почв, доводя прибавку продуктивности и натуральной окупаемости удобрений до 28-42 и 21-67 % на песке, 17-26 и 25-47 % — на супеси, 30-31 и 49-55 % — на легком суглинке, 11-16 и 0-35 % — на среднем суглинке относительно таковых при ЗСУ.

Ключевые слова: пространственная неоднородность, почва, точная система удобрения, культуры, овощной севооборот, продуктивность, эффективность.

Оптимизация продукционного процесса в растениеводстве в основном базируется на приемах агротехники (1-4). Характерная для агрофитоценозов пространственно-временная изменчивость условий произрастания связана с динамичностью погодно-климатических (2), фитосанитарных условий (5, 6), дифференциацией почвенных свойств и режимов по элементам рельефа (7-11), исходной неоднородностью почв (12-15), неравномерным применением удобрений и мелиорантов (15-17) и фиксируется прак-

тически повсеместно (18-21). Отсутствие объективной оценки неоднородности среды считают важной причиной снижения эффективности удобрений как при интенсивной химизации (1970-1980-е годы в России), так и в настоящее время (1, 2). Решение проблемы потребовало новых, основанных на геоинформационных технологиях методических подходов (22-26) и специального планирования полевых экспериментов (22, 27). В совокупности с опытом регулирования питания растений это позволило выработать концепцию интегрированного управления продукционным процессом в агроэкосистемах (1-3, 28, 29) для повышения эффекта удобрений, снижения непродуктивных потерь биогенных элементов, защиты среды (30-33).

Инструментом здесь выступают точные системы удобрения с применением негенерализированных данных геоинформационных обследований почв и посевов, информационных технологий и прецизионного оборудования (2, 22, 27). Нечерноземная зона с контрастным и сложным почвенным покровом, выраженной неоднородностью агрофизических и агрохимических свойств, почвенно-климатическими условиями, благоприятными для действия удобрений, относится к региону, перспективным для применения прецизионных систем (1, 2, 15, 27). Один из факторов, определяющих их результативность, — биологические особенности питания культур и сортов (2, 34-36). Из-за его недооценки превосходство точных систем удобрения может не проявиться (33). Такие системы особенно актуальны для севооборотов овощных культур, различающихся по требованиям к почвенным условиям и питанию (2, 35-37).

В настоящем исследовании нами впервые показано, что точные системы удобрения позволяют вести эффективное овощеводство на фоне остро выраженной пестроты плодородия дерново-подзолистых почв, при этом отклик разных культур на такие системы индивидуален.

Цель работы заключалась в экспериментальном изучении особенностей и оценке параметров отзывчивости культур овощного севооборота на точные системы удобрения в условиях типичной для Нечерноземной зоны литогенной мозаики агродерново-подзолистых почв.

Методика. В стационарном микрополевым опыте (опорный пункт АФИ на базе КХ «Прометей», Гдовский р-н, Псковская обл., 2007-2011 годы) в полиэтиленовых сосудах без дна площадью 1 м² искусственно формировали верхнюю часть почвенного профиля: горизонты А_{пах.} (пахотный) — 0-22 см и А_{2В} — 22-40 см. Почвы для набивки сосудов (дерново-слабо-подзолистые песчаные, супесчаные, легко- и среднесуглинистые, слабой и хорошей окультуренности), составляющие контрастную почвенную структуру в форме литогенной мозаики (16), отбирали из соответствующих горизонтов. В А_{пах.} минимальные, максимальные и средневзвешенные значения рН_{KCl} составили соответственно 4,34-6,35 и 5,40, содержание гумуса (по Тюрину) — 0,92-2,50 и 1,72 %, подвижного фосфора и калия (по Кирсанову) — 125-550 и 390 мг/кг и 22-400 и 209 мг/кг.

Исследовали следующий севооборот сортов и гибридов: редька черная (*Raphanus sativus* L.) Зимняя круглая черная (ВНИИССОК, Россия)—картофель (*Solanum tuberosum* L.) Невский (Ленинградский НИИСХ, Россия)—свекла столовая (*Beta vulgaris* L.) Vikores («Bejo Zaden B.V.», Нидерланды)—капуста белокочанная (*Brassica oleracea* L.) Kuisor F₁ («Syngenta Seeds B.V.», Нидерланды)—морковь столовая (*Daucus sativus* L.) Narbonne F₁ («Bejo Zaden B.V.», Нидерланды). Схемы посадки (посева): 5×30 см (редька черная), 20×60 см (картофель), 5×30 см (свекла столовая), 30×60 см (капуста белокочанная) и 3×30 см (морковь столовая). Благоприятное фитосанитарное состояние посевов и посадок поддерживалось ручными прополками,

междурядными обработками, применением инсектицидов и фунгицидов.

Двухфакторная схема опыта включала восемь вариантов по фактору А — вид (степень окультуренности: слабая и хорошая) и разновидность (по гранулометрическому составу: песчаная, супесчаная, легкосуглинистая, среднесуглинистая) почвы, а также четыре варианта по фактору Б — вид органо-минеральной системы удобрения (контроль-0, без удобрений; зональная система удобрения, ЗСУ; точная система удобрения 1, ТСУ-1; точная система удобрения 2, ТСУ-2). В ЗСУ удобрения вносились равномерно (с учетом средних показателей по почвенной структуре) по схемам: редька черная (30 т/га корнеплодов) — известь (4,5 т/га) + $N_{95}P_{20}K_{125}$; картофель (40 т/га клубней) — навоз (45 т/га) + $N_{100}P_{30}K_{90}$; свекла столовая (30 т/га корнеплодов) — $N_{130}P_{50}K_{150}$; капуста белокочанная (60 т/га кочанов) — известь (2,1 т/га) + навоз (50 т/га) + $N_{120}P_{10}K_{90}$; морковь столовая (50 т/га корнеплодов) — $N_{100}P_{40}K_{130}$. В ТСУ-1 за 2 нед до посева проводили точное окультуривание (16) с применением мелиорантов и удобрений пролонгированного действия: извести — в среднем 6,6 т/га (min-max 0-20 т/га); торфа низинного — 390 т/га (0-900 т/га); фосфоритной муки — 94 кг/га по д.в. (0-750 кг/га); сульфата калия — 407 кг/га по д.в. (0-1710 кг/га). Далее органические и минеральные удобрения вносили перед посевом (посадкой) равномерно с учетом изменения свойств почвы: под редьку — $N_{70}K_{60}$; под картофель — навоз (45 т/га) + $N_{80}K_{100}$; под свеклу — $N_{100}P_{30}K_{130}$; под капусту — навоз (50 т/га) + $N_{100}P_{10}K_{70}$; под морковь — $N_{100}P_{10}K_{120}$. В ТСУ-2 дозы удобрений в среднем были те же, что в ЗСУ, но дифференцировались по каждому сосуду с учетом фактических свойств почвы: под редьку — известь (0-12 т/га) + $N_{70-120}P_{0-90}K_{60-200}$; картофель — навоз (30-65 т/га) + $N_{80-110}P_{0-110}K_{70-150}$; свеклу — $N_{90-170}P_{0-150}K_{80-240}$; капусту — известь (2,1 т/га) + навоз (30-70 т/га) + $N_{110-135}P_{0-60}K_{40-120}$; морковь — $N_{85-115}P_{10-90}K_{79-180}$. В качестве мелиорантов и удобрений использовались соответствующие действующим ГОСТ известняковая мука, аммиачная селитра, фосфоритная мука, суперфосфат двойной, калий сернокислый, калий хлористый (Россия), а также местные удобрения: торф низинный (влажность 65 %, зольность 24 %, $pH_{\text{вод.}}$ 6,1; N 1,05 %, P_2O_5 0,07 %, K_2O 0,04 %), навоз свиной подстилочный полуперепревший (влажность 72-75 %, $pH_{\text{вод.}}$ 6,4-6,8; N 0,45-0,49 %, P_2O_5 0,15-0,20 %, K_2O 0,24-0,29 %).

Учеты основной и побочной продукции проводили сплошным взвешиванием. Повторность в опыте 4-кратная.

Об отзывчивости на изучаемые факторы судили по средней (M), минимальной (m_{min}) и максимальной (m_{max}) урожайности, коэффициенту вариации (C_v , %) и натуральной окупаемости действующего вещества удобрений. Результаты учета продуктивности обрабатывали методом дисперсионного анализа (Statistica 7.0, «StatSoft, Inc.», США). Достоверность различий оценивали по F -критерию Фишера.

Результаты. Исследования подтвердили высокий агрономический эффект дифференциации доз удобрений с учетом пространственной неоднородности почвы на фоне variability урожайности в контроле 24-51 % (табл. 1). В ЗСУ при расчете оптимальных доз мелиорантов и удобрений по средневзвешенным агрохимическим показателям элементов структуры (в опыте — группа сосудов) продуктивность севооборота повысилась на 95 % к контролю, в ТСУ-2 с дифференцированным применением идентичных удобрений — на 115 % к контролю и на 10 % от таковой при ЗСУ. В ТСУ-1 с предварительным точным окультуриванием почвы показатели составили соответственно 122 и 14 %. По окупаемости удобрений точные системы превосходили зональную (ТСУ-1 на 49 %, ТСУ-2 на 21 %). При этом в рас-

чет окупаемости в ТСУ-1 не включали затраты на точное окультуривание почвы, смоделированные на более продолжительное последствие.

Все культуры положительно, но неодинаково реагировали на дифференциацию доз удобрений. Прибавка в ТСУ-1 и ТСУ-2 относительно ЗСУ урожайности редьки увеличилась на 69 и 36 %, картофеля — на 28 и 26 %, свеклы — на 39 и 20 %, капусты — на 21 и 16 %, моркови — 5 и 16 % при снижении пространственной вариабельности (C_v) относительно контроля и ЗСУ по тем же культурам соответственно в 1,9-2,6 и 1,4-1,9; в 1,8-2,4 и 1,3-1,8; в 1,6-1,8 и 1,1-1,3; в 2,2-2,7 и 1,0-1,2; 2,5-4,3 и 1,4-2,4 раза.

1. Продуктивность культур овощного севооборота и ее пространственная неоднородность в зависимости от варианта системы удобрения (микрополевой опыт, Псковская обл., 2007-2011 годы)

Вариант опыта	Урожайность, т/га			Прибавка урожайности		Окупаемость 1 кг NPK, з.ед.
	M	$m_{\min}-m_{\max}$	C_v , %	т/га	%	
Редька черная						
Контроль-0	14,1	7,0-29,0	45			
ЗСУ	21,8	15,0-41,0	33	7,7	55	5,1
ТСУ-1	27,1	23,8-43,0	17	13,0	92	16,0
ТСУ-2	24,6	18,5-42,0	24	10,5	74	7,0
НСР ₀₅	1,30					
Картофель						
Контроль-0	21,6	6,6-35,8	51			
ЗСУ	53,3	28,6-74,2	37	31,7	147	15,7
ТСУ-1	62,2	38,0-74,0	21	40,6	188	21,9
ТСУ-2	61,5	30,6-75,4	28	39,9	185	19,8
НСР ₀₅	2,60					
Свекла столовая						
Контроль-0	11,3	1,6-22,2	61			
ЗСУ	24,2	8,0-35,8	42	12,9	114	4,5
ТСУ-1	29,2	12,2-41,3	33	17,9	158	7,5
ТСУ-2	26,8	12,8-40,3	38	15,5	137	5,6
НСР ₀₅	1,60					
Капуста белокочанная						
Контроль-0	60,5	32,0-90,0	24			
ЗСУ	105,1	87,0-123,0	11	44,6	74	13,3
ТСУ-1	114,3	101,0-141,0	9	53,8	89	17,4
ТСУ-2	112,4	95,0-137,0	11	51,9	86	15,2
НСР ₀₅	4,40					
Морковь столовая						
Контроль-0	23,4	11,9-35,2	30			
ЗСУ	47,6	32,0-60,4	17	24,2	103	9,6
ТСУ-1	58,5	41,4-69,8	12	35,1	150	15,4
ТСУ-2	51,5	45,0-58,4	7	28,1	120	11,2
НСР ₀₅	1,55					
Севооборот (зерновые единицы)						
Контроль-0	22,3	12,8-32,3	32			
ЗСУ	43,5	30,7-51,9	16	21,2	95	9,9
ТСУ-1	49,4	39,6-53,8	9	27,1	122	14,8
ТСУ-2	47,9	41,1-53,5	9	25,6	115	12,0
НСР ₀₅	2,07					

Примечание. M — среднее, C_v — коэффициент вариации. При расчете окупаемости 70 % затрат NPK навоза отнесено на первую культуру, 30 % — на вторую. Описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

По относительной прибавке урожайности из изученных культур сформировался очевидный убывающий ряд по отзывчивости на точные системы удобрения: редька > морковь ≈ свекла > картофель > капуста. Неодинаковая реакция стала следствием различий как в биологии культур, так и в примененных системах удобрения и агротехники. В частности, внесение высокой дозы навоза под картофель и капусту в ЗСУ привело к частичному сглаживанию свойств почвы и, как следствие, ТСУ-1 и ТСУ-2 имели меньшее преимущество. В результате эти культуры, для которых свойственна высокая эффективность потребления питательных веществ (14, 32-35), по отзывчивости на дифференцированное применение мелиорантов и удобрений заняли в эксперименте 4-е и 5-е место при максимальной натуральной окупаемости удобрений. Прямым следствием сочетания этого фактора с

биологическими особенностями столовых корнеплодов, предъявляющих повышенные требования к агрофизическим свойствам почвы, стало достоверное преимущество ТСУ-1 перед ТСУ-2 у этих культур.

2. Эффективность системы удобрения в зависимости от вида культуры из овощного севооборота и степени окультуренности почвы (микрореповый опыт, Псковская обл., 2007-2011 годы)

Вариант опыта (фактор Б)	Показатели эффективности по видам почвы (фактор А)									
	слабоокультуренная почва					хорошо окультуренная почва				
	У, т/га	Сv, %	ПУ		О	У, т/га	Сv, %	ПУ		О
т/га			%	т/га				%		
Редька черная										
Контроль-0	9,7	22				19,0	32			
ЗСУ	17,7	13	8,0	82	5,2	26,0	32	7,0	37	5,1
ТСУ-1	26,3	15	16,6	171	20,5	27,9	26	8,9	47	11,7
ТСУ-2	22,3	13	12,6	130	7,5	26,7	35	7,7	41	6,6
НСР ₀₅ фактор А — 1,90; фактор Б — 1,30; взаимодействие АБ — 3,80 т/га										
Картофель										
Контроль-0	14,8	38				28,5	29			
ЗСУ	47,6	27	32,8	222	16,3	59,0	15	30,5	107	14,9
ТСУ-1	60,1	21	45,3	306	24,4	64,4	11	35,9	126	17,7
ТСУ-2	60,0	26	45,2	305	19,9	63,0	12	34,5	121	19,6
НСР ₀₅ фактор А — 3,70; фактор Б — 2,60; взаимодействие АБ — 7,40 т/га										
Свекла столовая										
Контроль-0	7,5	69				15,4	43			
ЗСУ	19,8	47	12,3	164	4,2	30,3	29	14,9	97	5,4
ТСУ-1	25,7	36	18,2	243	7,7	32,6	28	17,2	112	7,4
ТСУ-2	26,0	28	18,5	247	5,5	28,4	30	13,0	84	6,4
НСР ₀₅ фактор А — 2,30; фактор Б — 1,60; взаимодействие АБ — 4,50 т/га										
Капуста белокочанная										
Контроль-0	49,6	15				71,4	14			
ЗСУ	98,0	7	48,4	98	14,5	112,4	9	41,0	57	12,3
ТСУ-1	116,4	7	66,8	135	21,6	112,1	11	40,7	57	13,2
ТСУ-2	122,7	6	73,1	147	18,1	102,1	7	30,7	43	11,2
НСР ₀₅ фактор А — 6,20; фактор Б — 4,40; взаимодействие АБ — 12,40 т/га										
Морковь столовая (2011 год)										
Контроль-0	17,4	22				29,4	12			
ЗСУ	41,5	15	24,1	139	9,2	53,7	8	24,3	83	10,0
ТСУ-1	58,4	16	41,0	236	16,0	58,6	6	29,2	99	14,8
ТСУ-2	51,8	9	34,4	198	11,4	51,2	5	21,8	74	11,0
НСР ₀₅ фактор А — 2,19; фактор Б — 1,55; взаимодействие АБ — 4,38 т/га										
Севооборот, зерновые единицы (з.ед.)										
Контроль-0	16,9	20				27,8	18			
ЗСУ	38,9	15	22,0	130	10,2	48,2	10	20,4	73	9,6
ТСУ-1	48,5	13	31,6	187	17,6	50,4	9	22,6	81	13,0
ТСУ-2	48,9	11	32,0	189	12,6	47,0	8	19,2	69	11,3
НСР ₀₅ фактор А — 2,94; фактор Б — 2,07; взаимодействие АБ — 5,86 т/га										

Примечание. Сv — коэффициент вариации; У — урожайность, ПУ — прибавка урожайности, О — окупаемость 1 кг НРК, з.ед. Описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

Пространственная неоднородность свойств выражена и у слабо-, и у хорошо окультуренных почв (13, 16, 21). Поэтому дифференциация доз удобрений оправдана на почвах любой окультуренности. Однако если система удобрения базируется на перераспределении мелиорантов и удобрений в пользу слабоокультуренных почв, сохранить урожайность на хорошо окультуренной части удается не всегда (табл. 2). Лишь редька, картофель и морковь, то есть культуры, более пластичные по биологическим требованиям к почвенным условиям (14, 31, 33, 35), не снижали продуктивности при сокращении доз удобрений и известки (ТСУ-2). Более того, при этом картофель на хорошо окультуренной почве оказался очень чувствительным к сокращению дозы известняковой муки (с 4,5 до 2,3 т/га), внесенной под редьку черную, с достоверным увеличением урожайности клубней (на 9 % относительно таковой при ЗСУ). Напротив, у капусты и свеклы, более требовательных к условиям питания, при сокращении доз удобрений на хорошо окультуренной части делянки (ТСУ-2) достоверно снизилась продуктивность (на 6-9 %). То же отмечали у моркови. Таким образом, изученные

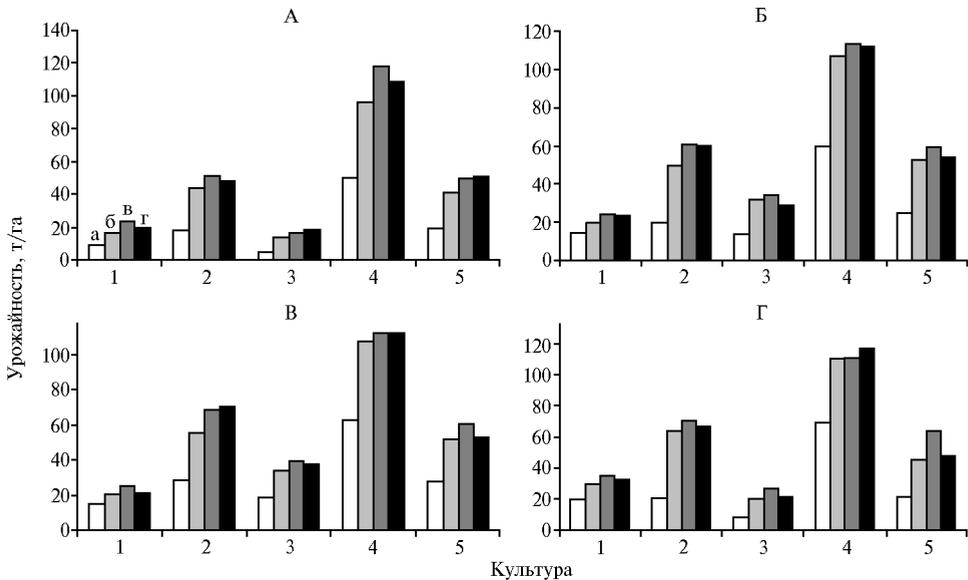
культуры формируют убывающий ряд по чувствительности к сокращению доз удобрений на хорошо окультуренных почвах: капуста > свекла > морковь > редька > картофель. Влияние ТСУ-1 на растения (за исключением капусты) на хорошо окультуренной почве было более стабильным и положительным (увеличение урожайности на 7-9 % относительно таковой при ЗСУ за счет последствий предварительного точного окультуривания).

Превосходство ТСУ-1 и ТСУ-2 ожидаемо оказалось особенно значительным на слабоокультуренной почве с увеличением прибавки урожайности на 49 и 26 % у редьки, 26 и 26 % у картофеля, 30 и 31 % у свеклы, 19 и 25 % у капусты, 41 и 25 % у моркови от полученной при применении ЗСУ. Вопреки ожиданиям, только для редьки и моркови на слабоокультуренной почве точное окультуривание, обеспечивающее комплексную оптимизацию агрофизических и агрохимических свойств всех почвенных разновидностей, было предпочтительнее, чем ТСУ-2. Для картофеля, капусты и свеклы на фоне относительно благоприятных погодноклиматических условий достаточной оказалась оптимизация почвенных свойств за счет перераспределения доз мелиорантов, органических и минеральных удобрений непосредственно перед посадкой (посевом) (ТСУ-2). В результате в целом по севообороту достоверное превосходство ТСУ-1 над ТСУ-2 по прибавке продуктивности (на 18 %) фиксировалось только на хорошо окультуренных почвах. Более значимым было повышение (на 15-40 %) окупаемости действующего вещества удобрений в этих вариантах.

В опыте внутривидовая пестрота почвенных условий связана преимущественно с агрофизической неоднородностью по гранулометрическому составу. Чувствительность к ней отражает C_v продуктивности, который в контроле у картофеля, свеклы и моркови на слабоокультуренной почве оказался в 1,3-1,8 раза выше, чем на хорошо окультуренной, у капусты — практически не изменялся, у редьки — снижался в 1,5 раза. Выраженное обособление последней относительно остальных культур, вероятно, связано с агротехническими особенностями ее возделывания во второй половине вегетационного периода после длительного полупарового использования почвы. В этот период вследствие длительной (до середины июля) инкубации в хорошо окультуренных песках, супесях, легких и средних суглинках формируется выраженная микробиологически обусловленная неоднородность азотного режима, что определяет высокую вариабельность урожайности у редьки, имеющей укороченный период активного корневого питания. Точные системы удобрения позволили почти полностью избежать различий в продуктивности культур на слабо- и хорошо окультуренной почве, снизив C_v соответственно в 1,5-1,8 и 2,0-2,3 раза.

Хотя удобрения обеспечивали высокие абсолютные и относительные прибавки урожайности на всех почвенных разновидностях, влияние гранулометрического состава оставалось весьма ощутимым (рис.). Комплексное действие этого фактора на продукционный процесс носило более фундаментальный характер. Вполне в соответствии с биологическими особенностями и агроэкологическими потребностями (14, 33-35) при смоделированной высокой неоднородности почвенных условий на неудобренном фоне урожайность редьки (19,6 т/га) и капусты (69,5 т/га) была выше на среднесуглинистой, картофеля (28,4 т/га), свеклы (18,7 т/га) и моркови (27,6 т/га) — на легкосуглинистой почве; минимальные показатели отмечали на песке. То есть культуры проявили индивидуальные предпочтения к водно-воздушному режиму и питанию и сформировали следующие ряды по продуктивности в зависимости от почвенных разновидностей: редька и капуста — средний суглинок > легкий суглинок > супесь > песок; картофель —

легкий суглинок > средний суглинок > супесь > песок; свекла и морковь: легкий суглинок > супесь > средний суглинок > песок. В целом продуктивность севооборота на песчаной почве была минимальной (17,1 т/га з.ед.) при наименьшей абсолютной прибавке для ЗСУ (19,0 т/га з.ед.), которая на других почвенных разновидностях достигала 23,7 т/га з.ед. Точные системы удобрения нивелировали действие этого фактора: прибавки урожайности за ротацию в ТСУ-1 и ТСУ-2 достигали соответственно 26,2-27,5 и 24,4-26,4 т/га з.ед. При том эффективность ТСУ-1 и ТСУ-2 относительно ЗСУ на песке была выше на 42 и 28 %, на супеси — на 26 и 17 %, на легком суглинке — на 31 и 30 %, на среднем суглинке — на 16 и 11 %.



Урожайность культур овощного севооборота в зависимости от разновидности почвы и системы удобрения: А — песок, Б — супесь, В — легкий суглинок, Г — средний суглинок; 1, 2, 3, 4, 5 — соответственно редька черная, картофель, свекла столовая, капуста белокочанная, морковь столовая; а, б, в, г — соответственно контроль-0, ЗСУ, ТСУ-1, ТСУ-2 (описание систем удобрения см. в разделе «Методика») (микрочастицы опыта, 2007-2011 годы).

Вариабельность урожайности и, соответственно, продуктивности звена севооборота тоже имела связь с гранулометрическим составом почвы. Так, у редьки и картофеля максимальные значения C_v отмечали на легко- и среднесуглинистой (42-45 и 34-71 %), у свеклы столовой — на супесчаной и песчаной (54-75 %), у капусты и моркови — на среднесуглинистой и песчаной (24-25 и 32-38 %) почвах. Вопреки представлениям о повышенной требовательности капусты к агрофизическим и агрохимическим свойствам почвы, ее чувствительность к гранулометрическому составу оказалась минимальной. Этому способствовали нормированные поливы культуры в условиях остросасушливого вегетационного периода 2010 года. В целом по звену севооборота максимальные C_v (25-34 %) регистрировались на песчаной и среднесуглинистой почве в контроле, минимальные (1-10 %) — в ТСУ-1 и ТСУ-2, средние (8-15 %) — в ЗСУ (независимо от гранулометрического состава).

Таким образом, при высокой неоднородности литогенной мозаики агродерново-слабоподзолистых почв точные системы органо-минерального удобрения с их ежегодным дифференцированным применением (ТСУ-2) или разовым мелиоративным точным окультуриванием и последующим равномерным внесением удобрений (ТСУ-1) обеспечили повышение продук-

тивности овощного севооборота с 22,3 и 43,5 т/га зерновых единиц в контроле и в варианте с зональной системой удобрения (ЗСУ) до 47,9-49,4 т/га (соответственно на 115-122 и 10-14 %). При этом коэффициент вариации продуктивности севооборота снижался с 32 и 16 % в контроле и ЗСУ до 9 %, а натуральная окупаемость удобрений повысилась на 21-49 %. Установлен убывающий ряд отзывчивости культур овощного севооборота на точные системы удобрения: редька > морковь ≈ свекла > картофель > капуста. Достоверное преимущество варианта ТСУ-1 перед ТСУ-2 установлено только у столовых корнеплодов — редьки, свеклы и моркови. Фактором снижения отдачи от точных систем удобрения относительно зональной было равномерное внесение высоких доз органических удобрений. При проектировании систем удобрения следует учитывать убывание чувствительности культур овощного севооборота к оптимизации (снижению) доз удобрений на хорошо окультуренных участках поля в последовательности капуста > свекла > морковь > редька > картофель. Точные системы удобрения благодаря дифференцированным дозам мелиорантов и удобрений и комплексной оптимизации свойств почв элиминировали эффект их разной окультуренности и гранулометрического состава. В результате прибавка продуктивности и натуральной окупаемости удобрений (в сравнении с таковыми в ЗСУ) составила на песке 28-42 и 21-67 %, на супеси — 17-26 и 25-47 %, на легком суглинке — 30-31 и 49-55 %, на среднем суглинке — 11-16 и 0-35 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Державин Л.М. Методология проектирования применения удобрений и средств химизации в ресурсосберегающих агротехнологиях при модернизации земледелия. *Агрохимия*, 2013, 8: 18-29.
2. Иванов А.И., Конашенков А.А., Иванова Ж.А., Воробьев В.А., Фесенко М.А., Данилова Т.А., Филиппов П.А. Агротехнические аспекты реализации биоклиматического потенциала Северо-Запада России. *Агрофизика*, 2016, 2: 35-44.
3. Robert P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant Soil*, 2002, 247(1): 143-149 (doi: 10.1023/A:1021171514148).
4. Lara V., Lomonos M. Crop yield and quality depending on fertilization in crop rotation on sod-podzolic soil. In: *Soil as world heritage /D. Dent (ed.)*. Springer Netherlands, 2014: 303-308 (doi: 10.1007/978-94-007-6187-2_29).
5. Шпанев А.М. Отечественный и зарубежный опыт применения гербицидов в системе точного земледелия. *Агрофизика*, 2016, 2: 24-34.
6. Tangwongkit R., Salokhe V.M., Jayasuriya H.P.W. Development of a real-time, variable rate herbicide applicator using machine vision for between-row weeding of sugarcane fields. *Agriculture*, 2006, 8: 1-12.
7. Lu P., Su Y.-R., Niu Z., Wu J.-S. Nongye yu shengming kexue. *Zhejiang daxue xuebao*, 2007, 33(1): 89-95.
8. Soon Y.K., Malhi S.S. Soil nitrogen dynamics as affected by landscape position and nitrogen fertilizer. *Can. J. Soil Sci.*, 2005, 85(5): 579-587 (doi: 10.4141/S04-072).
9. Шпедт А.А., Пурлаур В.К. Оценка влияния рельефа на плодородие почв и урожайность зерновых культур. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, 2008, 10: 5-11.
10. Zhang S., Zhang X., Huffman T., Liu X., Yang J. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 2011, 89(3): 427-438 (doi: 10.1007/s10705-010-9406-0).
11. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья. *Вестник Московского университета, Серия 17: Почвоведение*, 2014, 3: 36-44.
12. Akbas F., Gunal H., Gokmen F., Gezging S., Ersahin S. Spatial variation of micronutrients in topsoil and subsoil of Fertic Haplustepts. *Agrochimica*, 2009, 53(2): 101-116.
13. Басевич В.Ф., Тетенькин В.Л. Неоднородность подзолистых почв и пестрополье. *Вестник Московского университета, Серия 17: Почвоведение*, 2010, 2: 35-42.
14. Knyazhneva E.V., Nadezhkin S.M., Frid A.S. The spatial heterogeneity of the fer-

- tility in a leached chernozem within a field. Eurasian Soil Sc., 2006, 39(9): 1011-1020 (doi: 10.1134/S1064229306091010).
15. Иванов А.И., Конашенков А.А., Хомяков Ю.В., Фоменко Т.Г., Федькин И.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия. Агрехимия, 2014, 2: 39-49.
 16. Иванов А.И., Конашенков А.А. Агроэкологические последствия неравномерного внесения навоза в овощном севообороте. Агрехимия, 2012, 6: 66-72.
 17. Фоменко Т.Г., Павлова В.П., Иванов А.И. Дифференциация свойств черноземных почв при локальных способах орошения и применения удобрений. Проблемы агрохимии и экологии, 2012, 4: 8-13.
 18. Scherpinski C., Uribe-Opaso M.A., Vilas B.M.A., Samraio S.C. Variabilidade espacial da condutividade hidraulica e da infiltracao da agua no solo. Acta Scientiarum. Agronomy, 2010, 32(1): 7-13 (doi: 10.4025/actasciagron.v32i1.959).
 19. Zhang X.-Y., Sui Y.-Y., Zhang X.-D., Meng K., Herbert S.J. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China. Pedosphere, 2007, 17(1): 19-29 (doi: 10.1016/S1002-0160(07)60003-4).
 20. Gallardo A. Spatial variability of soil properties in a floodplain in Northwest Spain. Ecosystems, 2003, 6: 564-576 (doi: 10.1007/s10021-0030198-9).
 21. Gallardo A., Parana R. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain. Geoderma, 2007, 139: 199-208 (doi: 10.1016/j.geoderma.2007.01.022).
 22. Якушев В.П., Лекомцев П.В., Петрушин А.Ф. Точное земледелие: опыт применения и потенциал развития. Информация и космос, 2014, 3: 50-56.
 23. Badenko V., Kurtener D., Yakushev V.P., Torbert A., Badenko G. Evaluation of current state of agricultural land using problem-oriented fuzzy indicators in GIS environment. Lect. Notes Comput. Sc., 2016, 9788: 57-69 (doi: 10.1007/978-3-319-42111-7_6).
 24. Koroleva I.E., Frid A.S. Tentative separation of soil-agrochemical areas on a plowland and their relation with the relief and plant productivity. Eurasian Soil Sc., 2006, 39(12): 1344-1351 (doi: 10.1134/S1064229306120106).
 25. Zinkevicius R. Influence of soil sampling for precision fertilizing. Agron. Res., 2008, 6(Spec. Issue): 423-429.
 26. Schneider M., Wagner P., Herbst R., Ertragspotential sichern. Intelligente probung-Grundlage fur differenzierte Grunddungung. Neue Landwirtschaft, 2008, 8: 48-51.
 27. Иванов А.И., Конашенков А.А. Методико-технологические аспекты и результаты оценки точных систем удобрения. Сельскохозяйственные машины и технологии, 2014, 3: 20-24.
 28. Frossard E., Buneman E., Jansa J., Oberson A., Foller C. Concepts and practices of nutrient management in agro-ecosystems: Can we draw lessons from history to design future sustainable agricultural production systems? Bodenkultur, 2009, 60(1): 43-60.
 29. Plachter H., Stachow U., Werner A. Methoden zur naturschutzfachlichen Konkretisierung der «Guten fachlichen Praxis» in der Landwirtschaft. Bonn-Bad Godesberg, 2005.
 30. Лапа В.В. Плодородие почв и применение удобрений как основа устойчивого развития аграрной отрасли Республики Беларусь. Проблемы управления, 2007, 4: 43-48.
 31. Angermair W., Lorenz F. Dungung nach Diagnose. Neue Landwirtschaft, 2009, 3: 70-73.
 32. Herbst R., Rettberg T. Mehr Prazision moglich. Teilflachenspezifische Grunddungung bisher zu wenig beachtet. Neue Landwirtschaft, 2005, 2: 44-47.
 33. Kang T.-H., Sugiura R., Noguchi N. Growth analysis and variable rate fertilizer application of wheat field using multi-spectrum image sensor. Environ. Contr. Biol., 2006, 44(3): 207-214.
 34. Гренадеров С.В., Борисов В.А. Урожай и сохраняемость редьки зависят от системы удобрения. Картофель и овощи, 2010, 4: 10.
 35. Борисов В.А. Особенности питания овощных культур и приемы получения экологически безопасной продукции. Картофель и овощи, 2009, 8: 12-13.
 36. Литвинов С.С., Борисов В.А., Романова А.В., Поляков А.А. Продуктивность, качество и лежкость сортов и гибридов овощных культур в России. Владимирский земледелец, 2012, 1: 20-21.
 37. Литвинов С.С., Чутчева Ю.В., Шатилов М.В., Башкиров А.В. Эффективность отечественного овощеводства. Экономика сельского хозяйства России, 2016, 6: 37-43.

1ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт, Поступила в редакцию
 195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, *27 января 2017 года*
 e-mail: office@agrophys.ru, ivanovai2009@yandex.ru;

2ФГБНУ Северо-Западный центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения,
 196608 Россия, г. Санкт-Петербург—Пушкин, ш. Подбельского, 7,
 e-mail: szcentr@bk.ru;

3РНДУП Институт почвоведения и агрохимии,
 220108 Беларусь, г. Минск, ул. Казинца, 90,

BIOLOGICAL PECULIARITIES IN THE RESPONSIVENESS OF VEGETABLE CROP ROTATION TO PRECISION FERTILIZATION

A.I. Ivanov^{1, 2}, V.V. Lapa³, A.A. Konashenkov¹, Zh.A. Ivanova¹

¹Agrophysical Research Institute, Federal Agency of Scientific Organizations, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail office@agrophys.ru, ivanovai2009@yandex.ru (corresponding author);

²North-West Center for Interdisciplinary Studies Research of Food Supply, Federal Agency of Scientific Organizations, 7, sh. Podbel'skogo, St. Petersburg—Pushkin, 196608 Russia, e-mail szcentr@bk.ru;

³Institute for Soil Science and Agrochemistry, 90, vul. Kasinca, Minsk, 220108 Belarus, e-mail brissagro@gmail.com

ORCID:

Ivanov A.I. orcid.org/0000-0002-1502-0798

Ivanova Zh.A. orcid.org/0000-0002-3138-8285

The authors declare no conflict of interests

Received January 27, 2017

doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.454eng

Abstract

Spatial and temporal variability of growing conditions which affects the production process management is characteristic of agrophytocenosis. Spatial heterogeneity of soil essential properties is widely reported. A precision fertilization should be effective tool to control crop productivity. The highest potential of such fertilization could be expected for vegetable crops in the favorable soil and climatic conditions of the Nechernozemie of North-West Russia. In a microvegetation stationary two-factor experiment, plastic bottom-less pots of 1 m² area were used to artificially form the upper part of the soil profile (A_{arable} 0-22 cm and A_{2B} 22-40 cm horizons) simulating natural lithogenic mosaics of agro sod-podzolic sandy, sandy loam, light loam and medium loam soils subjected to weak and good cultivation. Their minimum, maximum, and average parameters for the 0-22 cm horizon were as follows: pH_{KCl} of 4.34-6.35 and 5.40, humus content (by Tyurin) of 0.92-2.50 and 1.72 %, labile phosphorus and potassium (according to Kirsanov) of 125-550 and 390 mg/kg and 22-400 and 209 mg/kg, respectively. The vegetable crop rotation included black radish (*Raphanus sativus* L.)—potato (*Solanum tuberosum* L.)—beetroot (*Beta vulgaris* L.)—cabbage (*Brassica oleracea* L.)—carrot (*Daucus sativus* L.). For a comparison, we used different system of fertilization, i.e. control (no fertilizers); zonal system (ZS); precision fertilization 1 (PF-1); precision fertilization 2 (PF-2). In the ZS providing for a uniform application of the fertilizers based on the average soil properties, we used lime (4.5 t/ha + N₉₅P₂₀K₁₂₅) for black radish; manure (45 t/ha) + N₁₀₀P₃₀K₉₀ for potatoes; N₁₃₀P₅₀K₁₅₀ for beetroot; lime (2.1 t/ha) + manure (50 t/ha) + N₁₂₀P₁₀K₉₀ for cabbage; and N₁₀₀P₄₀K₁₃₀ for carrot. In the PF-1, two months before the radish was sown a precision soil cultivation has been performed using lime at 0-20 and 6.6 t/ha, peat at 0-900 and 390 t/ha; phosphorite flour at 0-750 and 94 kg/ha; potassium sulfate at 0-1710 and 407 kg/ha (as min-max and average). Further application of organic and mineral fertilizers before sowing (planting) was uniform, i.e. N₇₀K₆₀ for black radish; manure (45 t/ha) + N₈₀K₁₀₀ for potatoes; N₁₀₀P₃₀K₁₃₀ for beetroot; manure (50 t/ha) + N₁₀₀P₁₀K₇₀ for carrot; N₁₀₀P₁₀K₁₂₀ for white cabbage. In PF-2 providing average doses of all fertilizers equal to these in ZS, but differentiated for each pot based on actual soil parameters, we used lime (0-12 t/ha) + N₇₀₋₁₂₀P₀₋₉₀K₆₀₋₂₀₀ for black radish; manure (30-65 t/ha) + N₈₀₋₁₁₀P₀₋₁₁₀K₇₀₋₁₅₀ for potato; N₉₀₋₁₇₀P₀₋₁₅₀K₈₀₋₂₄₀ for beetroot; lime (2.1 t/ha) + manure (30-70 t/ha) + N₁₁₀₋₁₃₅P₀₋₆₀ K₄₀₋₁₂₀ for cabbage; N₈₅₋₁₁₅P₁₀₋₉₀K₇₉₋₁₈₀ for carrot. The experiments were arranged in four replications. In a field experiment the precision fertilization provided an increase in the productivity of vegetable crop rotation of 22.3 and 43.5 t/ha in control and ZS, respectively, to 47.9-49.4 t/ha. PF-1 and PF-2 resulted in the Cv reduction from 32 % and 16 % in the control and ZS to 9 %, and in an increased natural profitability of fertilizers by 21-49 %. A responsiveness of vegetable crop rotation to precision fertilization depended on biological features, the specific farming techniques and soil conditions. A decreasing responsiveness was as follows: black radish > carrot ≈ beet > potatoes > cabbage. A uniform application of high doses of organic fertilizers was the factor reducing precision fertilization effectiveness. Significant advantage of PF-1 compared to PF-2 was established only for black radish, beet and carrot. When designing precision fertilization technologies, one should take into account the following decrease in sensitivity of vegetable crops in crop rotation to optimized (reduced) doses of fertilizers in the well-cultivated parts of a field: cabbage > beet > carrot > radish black > potatoes. Due to differentiated doses of ameliorants and fertilizers and integrated optimization of soil properties, the precision fertilization eliminates the effect of soil heterogeneity in cultivation and granulometric composition on crop production and allows to increase productivity and payback of natural fertilizers to 28-42 and 21-67 % in sand, 17-26 and 25-47 % in sandy loam, 30-31 and 49-55 % in a light loam, and 11-16 and 0-35 % in middle loam soils, when compared to ZS.

Keywords: spatial heterogeneity, the soil, precise fertilization system, culture, vegetable crop rotation, productivity, efficiency.