

УДК 631.816:631.454:635.1/.8

ЗНАЧЕНИЕ ТОЧНОЙ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ОВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2021 г. А. И. Иванов^{1,*}, Ж. А. Иванова¹, А. А. Конашенков²

¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп. 14, Россия*

² *Федеральный исследовательский центр РАН – Санкт-Петербургский Северо-Западный центр
междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, шоссе Подбельского, 7, лит. А. Россия*

**E-mail: office@agrophys.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Проанализированы данные ландшафтного и модельно-полевого опытов на контрастной по свойствам почвенной структуре с использованием в овощных севооборотах 3-х вариантов минеральной и органо-минеральной систем удобрения: широко применяемой зональной, точной на основе предварительного прецизионного окультуривания почвы и точной с ежегодным дифференцированным внесением мелиорантов и удобрений. Установлены параметры оптимизации свойств почвы и агрономической эффективности, а также ряды чувствительности овощных культур и отдельных показателей качества продукции к почвенным условиям и точным системам удобрения. Обеспечив выраженную оптимизацию и выравнивание (в среднем на 63%) комплекса важнейших агропроизводственных свойств почвы, система удобрения на основе точного окультуривания превзошла по продуктивности овощного севооборота зональную в органо-минеральном исполнении на 14, в минеральном – на 41, по ее пространственной вариабельности – на 44 и 61%, по уровню накопления питательных веществ и витаминов – на 3–16, по снижению содержания нитратов – на 6 и разнокачественности продукции – на 44%.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, свойства почвы, точные системы удобрения, овощной севооборот, продуктивность, качество продукции, вариабельность.

DOI: 10.31857/S0002188121110077

ВВЕДЕНИЕ

В силу специфики биохимического состава овощной продукции особенное место в производстве продуктов питания занимает овощеводство, способное генерировать продукты функционального качества [1–3].

Управление производственным процессом овощных культур в агрофитоценозах базируется на оптимизации факторов их жизни приемами агротехники [1, 4–6]. Базовым приемом оптимизации условий питания является система удобрения, основанная на учете физиологических потребностей сельскохозяйственных культур и сортов в конкретных почвенно-климатических условиях [4, 6–8]. Последние, как известно, характеризуется значительной пространственной и временной изменчивостью, в том числе и внутри отдельных производственных полей [9–11]. Основными факторами формирования такой пест-

роты чаще выступают выраженный рельеф поверхности [12–14], неоднородность почвообразующих пород ледникового происхождения [15–17] и нарушения технических требований к качеству применения химических мелиорантов и удобрений [16, 18–20].

Одним из важных путей повышения отдачи от применения удобрений в таких условиях является внедрение точных систем удобрения, основанных на учете мелкомасштабной гетерогенности свойств почвы [21–23]. И хотя достижение значимого агроэкономического эффекта от них отнюдь не гарантировано [23–25], овощные севообороты представляют собой один из самых перспективных объектов их внедрения. Прежде всего это связано с такими факторами как высокая отзывчивость этих культур на применение удобрений [7, 8] и относительная оцененность товарной продукции на продовольственном рынке, сулящая окупаемость весьма затратных прецизион-

Таблица 1. Исходные свойства почв опытов

Свойство почвы	Статистические параметры свойств в опытах							
	ландшафтный опыт				модельно-полевой опыт			
	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$
Физическая глина, %	6.3	32.1	18.3	63	4.8	32.5	18.1	60
$m_{\text{об.}}, \text{г/см}^3$	1.19	1.41	1.32	7	1.16	1.44	1.32	7
НВ, %	12.2	36.9	23.8	45	8.9	39.4	24.4	45
$\text{pH}_{\text{КСЛ}}$	4.78	5.86	5.13	10	4.34	6.35	5.40	14
$H_{\text{г}}, \text{смоль(экв)/кг}$	1.22	4.03	2.59	44	0.87	4.20	2.01	56
$S, \text{смоль(экв)/кг}$	2.00	7.80	4.35	64	3.61	16.3	7.49	69
$C_{\text{орг}}, \%$	1.03	2.25	1.50	36	0.92	2.50	1.72	39
$N_{\text{лг}}, \text{мг/кг}$	65	99	81	19	32	101	67	45
$\text{P}_2\text{O}_{5\text{подв}}, \text{мг/кг}$	216	315	245	19	125	550	391	34
$\text{K}_2\text{O}_{\text{подв}}, \text{мг/кг}$	38	184	104	59	22	370	208	64

ных технологий [22]. Это нашло свое подтверждение и в результатах выполненного ранее комплексного исследования [26]. Одной из его целей в агроэкологическом аспекте была сравнительная оценка воздействия различных вариантов точной системы удобрения на качественные показатели товарной продукции овощного севооборота.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в опорном пункте АФИ, КХ “Прометей” Гдовского р-на Псковской обл., на базе стационарных ландшафтного и модельно-полевого опытов. Их закладке в 2007 г. предшествовало прецизионное обследование агроландшафта пологоволнистой озерно-ледниковой равнины площадью 42 га [16]. Структура его почвенного покрова представляла собой литогенную мозаику полугидроморфных дерново-слабоподзолистых почв, сформированных на морене разной мощности от песчаного до среднесуглинистого гранулометрического состава.

Ландшафтный опыт был заложен по оригинальной методике [22] в пределах трансекты, пересекающей доминирующие в нем агромикрорландшафты (АМЛ): элювиальные (АМЛ 1 и АМЛ 2) – на возвышенных элементах с песчаными и супесчаными, элювиально-аккумулятивные (АМЛ 3 и АМЛ 4) – в микро- и мезопонижениях с легко- и среднесуглинистыми разновидностями почв (табл. 1). В каждом из 4-х АМЛ был заложен мелкоделяночный полевой опыт площадью 336 м² (12 × 28 м). Делянка в опыте имела общую площадь 21 м² и учетную площадь – 11.2 м² при систематическом размещении в трехкратной повторности.

В модельно-полевом опыте мелкомасштабную неоднородность почвенного покрова агроландшафта моделировали искусственно набором из 8 полиэтиленовых сосудов без дна площадью 1 м² в четырехкратной повторности. В них была сформирована верхняя часть профиля (горизонты $A_{\text{пах}}$ – 0–22 см и $A2B$ – 22–40 см) дерново-подзолистой почвы разного гранулометрического состава (песчаного, супесчаного, легко- и среднесуглинистого) и уровня окультуренности (слабого и хорошего). В целом пространственная неоднородность почв в опытах была весьма характерной для Нечерноземной зоны и оценивалась средней величиной коэффициента вариации представленных в табл. 1 свойств (37 и 44%).

В ландшафтном опыте был развернут овощной севооборот однолетние травы–картофель–свекла столовая–капуста белокочанная–морковь столовая, в модельно-полевом – редька черная–картофель–свекла столовая–капуста белокочанная–морковь столовая. В посевах и посадках их представляли сорта и гибриды: однолетние травы – овес сорта Скакун и вика посевная сорта Немчиновская Юбилейная, редька черная сорта Зимняя черная, картофель сорта Невский, свекла столовая сорта Бикорес, капуста белокочанная сорта Куизор F₁, морковь столовая сорта Нарбонне F₁.

Схемы обоих опытов двухфакторные. В вариантах фактора А (ландшафтно-экологические и почвенные условия) в ландшафтном опыте изучали 4 варианта агромикрорландшафтов, в модельно-полевом опыте – 8 вариантов почвенных разновидностей, отличавшихся гранулометрическим составом и уровнем окультуренности. Фактор В (система удобрения) в обоих опытах форми-

Таблица 2. Дозы мелиорантов и удобрений для точного окультуривания

Вид удобрения	Доза мелиоранта или удобрения							
	ландшафтный опыт				модельно-полевой опыт			
	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$	m_{\min}	m_{\max}	m_{med}	$C_v, \%$
Известняковая мука, т/га	0	12.0	4.4	120	0	20.0	6.6	107
Торф низинный, т/га	65	375	134	70	0	900	391	77
Фосфоритная мука, кг д.в./га	—	—	—	—	0	750	94	283
Калий сернокислый, кг д.в./га	0	648	291	69	0	1710	395	153

ровался 4-мя вариантами: контроль – без удобрений, зональная система удобрения (ЗСУ), точная система удобрения 1 (ТСУ-1) на основе предварительного точного окультуривания почвы и последующего равномерного внесения удобрений, точная система удобрения 2 (ТСУ-2) с использованием ежегодного дифференцированного применения удобрений. В ландшафтном опыте изучали минеральную, в модельно-полевом – органико-минеральную систему удобрения (табл. 2).

В варианте ЗСУ дозы удобрений для всей структуры почвенного покрова были едиными, зависящими от средневзвешенных показателей почвы и планируемой урожайности и в ландшафтном опыте составили: под однолетние травы – N90P4K50, под картофель – N140P17K100, под свеклу столовую, капусту белокочанную и морковь столовую – N130P27K125. В модельно-полевом опыте их уровень достиг: под редьку черную – известь 4.5 т/га + N95P20K125, под картофель – навоз 45 т/га + N100P30K90, под свеклу столовую – N130P50K150, под капусту белокочанную – известь 2.1 т/га + навоз 50 т/га + N120P10K90, под морковь столовую – N100P40K130.

В варианте ТСУ-1 при закладке опыта было проведено прецизионное (с учетом свойств каждой почвенной разновидности) окультуривание с применением дифференцированных доз известняковой муки, низинного торфа, фосфоритной муки и сульфата калия (табл. 2). В последующем расчет доз удобрений выполняли на принципах варианта ЗСУ с учетом изменившихся свойств почвенной структуры. Фактический уровень доз составил в ландшафтном опыте: под однолетние травы – N70P10K30, под картофель – N120P20K100, под свеклу столовую, капусту белокочанную и морковь столовую – N100P30K120; в модельно-полевом опыте: под редьку черную – N70K60, под картофель – навоз 45 т/га + N80K100, под свеклу столовую – N100P30K130, под капусту белокочанную – навоз 50 т/га + N100P10K70, под морковь столовую – N100P10K120.

В варианте ТСУ-2 средний уровень доз был идентичен варианту ЗСУ, но они дифференцировались по почвенным разностям в ландшафтном опыте: под однолетние травы – N70–110P0–10K30–80, под картофель – N120–150P0–40K80–140, под свеклу столовую – N110–150P0–90K90–190, под капусту белокочанную и морковь столовую – N110–150P0–60K120–190; в модельно-полевом опыте: под редьку черную – известь 0–12 т/га + N70–110P0–90K60–200, под картофель – навоз 30–65 т/га + N80–110P0–110K70–150, под свеклу столовую – N90–170P0–150K80–240, под капусту белокочанную – известь 2.1 т/га + навоз, 30–70 т/га + N110–135P0–60K40–120 и под морковь столовую – N85–115P10–90K70–200.

В опытах использовали кондиционные партии известняковой муки, аммиачной селитры, азофоски, фосфоритной муки, суперфосфата двойного, калия сернокислого, калия хлористого, а также местные удобрения: торф низинный (влажность 65%, зольность 24%, pH_{H_2O} 6.1, содержание N – 1.05, P_2O_5 – 0.07, K_2O – 0.04%), навоз свиной подстилочный полуперепревший (влажность 72–75%, pH_{H_2O} 6.4–6.8, содержание N – 0.45–0.49, P_2O_5 – 0.15–0.20, K_2O – 0.24–0.29%).

Образцы основной и побочной продукции отбирали в ходе проведения учетов сплошным весовым методом в трехкратной повторности. Их химико-аналитическое исследование было выполнено в аккредитованной испытательной лаборатории АФИ с использованием стандартизированных методик: содержание общего азота, фосфор и калия – из одной навески после мокрого озоления по Гинзбург–Щегловой–Вульфийус, сырого протеина – расчетным методом от общего азота, крахмал и простые сахара – поляриметрическим методом по Эверсу, нитраты – ионометрическим методом по ГОСТ 29270-95, витамин С – тритриметрическим методом по ГОСТ 24556-89, каротин – хроматографическим методом по ГОСТ 54635–2011.

Статистическая обработка результатов исследования выполнена дисперсионным методом с

использованием программы Statistica 7.0 (“Stat Soft, Inc.” США). Основными оценочными характеристиками при этом служили: средняя (m_{med}), минимальная (m_{min}) и максимальная (m_{max}) величина оцениваемого показателя и коэффициент вариации (Cv , %). Достоверность различий оценивали на 95%-ном уровне значимости по критерию Фишера.

Погодно-климатические условия региона проведения исследования весьма благоприятны для эффективного применения практически всех видов удобрений и мелиорантов [6, 27]. При средних за годы исследования параметрах среднесуточной температуры в 14.9°C их варьирование находилось в пределах от 13.5°C в 2008 г. до 16.0°C – в 2010 г. при коэффициенте вариации 6%. Средняя влагообеспеченность вегетационного периода составила 348 мм при варьировании от 257 мм в засушливом 2007 г. до 418 мм – в избыточно влажном 2008 г. и коэффициенте вариации по годам в 17%. Погодные условия 2007 г. оказались одними из самых засушливых за предшествующее 30-летие. В первой половине вегетации 2008 г. они были весьма благоприятны, а во второй – непоправимый ущерб урожаю нанесли обильные затяжные дожди. Остальные годы отличались повышенной теплообеспеченностью (особенно жаркий 2010 г.) и близкими к средним многолетним нормам выпадения осадков. Однако вариабельность их распределения по отдельным месяцам и декадам на уровне в 28–44% создавала разный уровень дискомфорта для отдельных культур севооборота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень изученных в экспериментах доз мелиорантов и удобрений, особенно в модельно-полевом опыте с его органо-минеральными системами удобрения практически гарантировал оптимизацию комплекса свойств и режимов Апах контрастной почвенной структуры и, как следствие, активизацию продукционного процесса. Параметры улучшения исходных свойств почвы определялись видом и дозами удобрений, вариантом их распределения по площади и балансом элементов питания. Наиболее значимые позитивные изменения закономерно отвечали варианту с предварительным прецизионным окультуриванием почвы. На его фоне в обоих опытах регистрировали улучшение не только физико- и агрохимических свойств (повышение pH_{KCl} на 0.51 и 1.29 ед., содержания легкогидролизуемого азота – на 28 и 60, подвижных фосфатов – на 26 и 101, подвижного калия – на 56 и 132 мг/кг соответственно), но и весьма консервативных агро-

физических кондиций (увеличение доли физической глины на 0.8 и 1.5%, макроструктурных агрегатов – на 8 и 11%, уменьшение средней плотности почвы до 1.24 и 1.11 г/см³ соответственно). В вариантах ЗСУ и ТСУ-2 существенными изменениями были затронуты только агрохимические свойства, а в модельно-полевом опыте – и физико-химические свойства почвы. С учетом равенства доз удобрений в целом по почвенной структуре эти изменения в данном случае не имели значительных отличий по абсолютным показателям и заключались в увеличении (относительно контроля) pH_{KCl} на 1.13–1.24 ед., суммы обменных оснований – на 2.00–2.25 смоль(экв)/кг, содержания органического вещества – на 0.68–0.71%, легкогидролизуемого азота, подвижных форм фосфора и калия на 20–22, 24–56 и 37–61 мг/кг соответственно. Тем не менее, преимущество точной системы удобрения выражалось в заметном уменьшении пространственной гетерогенности агрохимических свойств почвы в среднем в 2-х опытах с 41% в контроле, до 28, 15 и 22% в вариантах ЗСУ, ТСУ-1 и ТСУ-2 соответственно.

Изученные в модельно-полевом опыте варианты органо-минеральной точной системы удобрения в овощном севообороте характеризовались ощутимо повышенной агрономической эффективностью (рис. 1). Например, в вариантах опыта с одинаковыми дозами удобрений прибавка продуктивности севооборота на фоне ЗСУ составила 95, на фоне ТСУ-2 – 115% к контролю при окупаемости 1 кг NPK – 9.9 и 12.0 зерновых единиц (з.е.) соответственно. На фоне точного окультуривания варианта ТСУ-1 прибавка продуктивности севооборота за ротацию возрастала до 122%, но окупаемость 1 кг NPK снижалась до 3.9 з.е. Однако без учета затрат на предварительное окультуривание почвы она составляла 14.8 з.е. При этом вариабельность продуктивности севооборота по элементарным контурам структуры почвенного покрова уменьшилась с 32 в контроле до 16% в варианте ЗСУ и 9% в вариантах ТСУ-1 и ТСУ-2. Таким образом, превосходство точной органо-минеральной системы удобрения над зональной по показателю продуктивности севооборота достигло 10–14% и его пространственной вариабельности – 44%.

Продуктивность культур овощного севооборота в ландшафтном опыте оказалась в 1.9 раза меньше, чем в модельно-полевом (рис. 2), что было связано с существенной разницей в уровне эффективного плодородия почвы и ограниченными возможностями в регулировании ее водного режима. Отдача от минеральной системы удобрения в этом случае оказалась ожидаемо меньше.

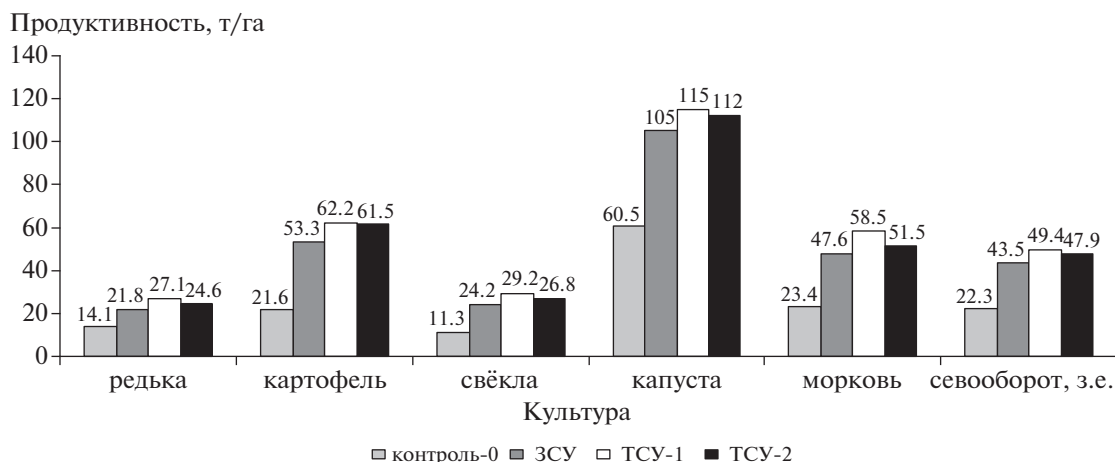


Рис. 1. Влияние систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборота в модельно-поле-вом опыте (HSP_{05} : редька – 1.3, картофель – 2.6, свекла – 1.6, капуста – 4.4, морковь – 1.6, севооборот – 2.1 т/га).

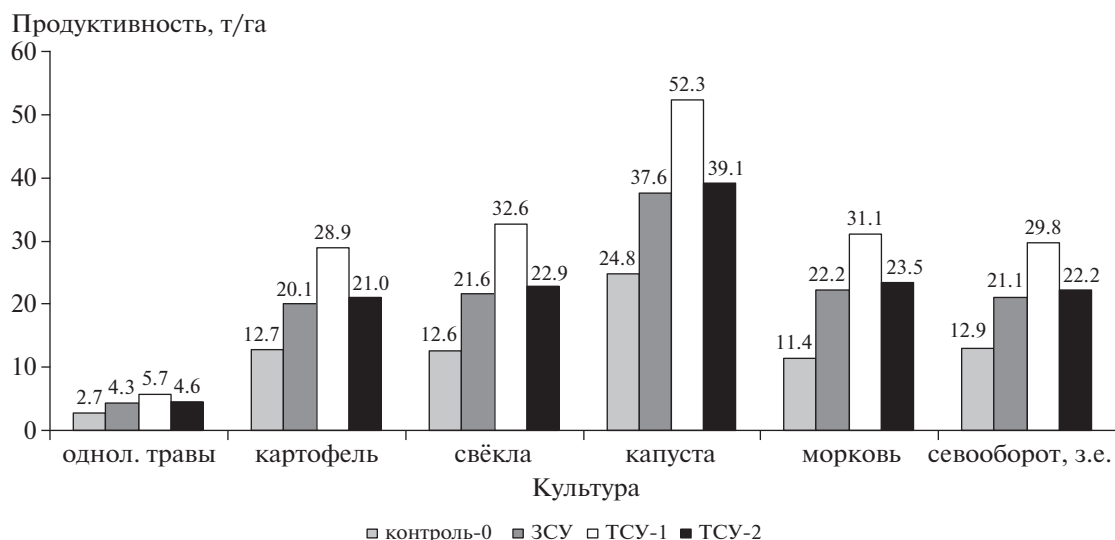


Рис. 2. Влияние систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборота в ландшафтном опыте (HSP_{05} : однолетние травы – 0.4, картофель – 1.7, свекла – 1.8, капуста – 3.5, морковь – 3.5, севооборот – 2.7 т/га).

Уровень прибавок продуктивности севооборота в весьма неблагоприятных агрофизических условиях в ЗСУ и ТСУ-2 достиг 64–72% и практически не зависел от технологии внесения удобрений. Напротив, отдача от прецизионного окультуривания в варианте ТСУ-1 составила 131% к контролю и 41% – к ЗСУ. Коэффициент вариации продуктивности севооборота снизился с 33–37% в контроле и ЗСУ до 23 и 13% – в ТСУ-2 и ТСУ-1 соответственно.

Исходя из специфики питания и восприимчивости к изменению агроэкологических условий произрастания под действием изученных вариантов применения удобрений в среднем в 2-х опы-

тах сформировался следующий убывающий ряд отзывчивости относительной прибавкой урожайности на точное окультуривание и систему удобрения в ТСУ-1: морковь столовая (162%) ≥ свекла столовая (159%) ≥ картофель (158%) > однолетние травы (111%) > капуста белокочанная (101%) > редька черная (92%). Аналогичный ряд отзывчивости на дифференцированное внесение удобрений в ТСУ-2 принял вид: картофель (125%) > морковь столовая (113%) ≥ свекла столовая (110%) > капуста белокочанная и редька черная (72%) ≥ однолетние травы (70%). При оценке отзывчивости культур на точные системы удобрения в зависимости от уровня снижения простран-

ственного коэффициента вариации урожайности лидирующую позицию заняли наиболее требовательные к плодородию почвы свекла столовая и капуста белокочанная.

Относительно влияния изученных вариантов системы удобрения на качественный состав растительной продукции, полученная информация не столь однозначна. Поскольку химический состав растений весьма жестко контролируется на генетическом уровне, его изменения под влиянием исходных свойств почвы и удобрений (в отличие от урожайности) не всегда были статистически достоверными (табл. 3, 4), а пространственная вариабельность (16%) существенно меньше, чем у почвы. Оценка влияния на качество продукции изученных почвенно-экологических условий показала, что исходные свойства почвы влияли на них более значимо, чем специфика положения в агроландшафте. Средняя величина пространственного коэффициента вариации показателей качества в контрольном варианте ландшафтного опыта составила 14%, тогда как в модельно-полевом – 17%. Наиболее чувствительным к почвенным условиям по показателю вариабельности оказалось содержание витаминов (27%), калия (25%) и нитратов (23%).

Вследствие оптимизации питательного режима перевод дерново-подзолистой почвы из слабо-в хорошо окультуренное состояние в модельно-полевом опыте увеличил в среднем в зависимости от культуры содержание сырого протеина в овощной продукции на 15% (с 7.0 до 8.1%), калия – на 43% (с 1.35 до 1.93%), витаминов – на 25% (с 44 до 55 мг/кг), нитратов – на 31% (со 138 до 193 мг/кг). На легких (песчаных и супесчаных) почвах в сравнении со средними (легко- и среднесуглинистыми) почвами товарная продукция отличалась повышенным на 8–9 отн.% содержанием сухого вещества и сахаров и, напротив, пониженным на 28 и 15 отн.% – калия и нитратов соответственно.

Характер влияния изученных в опытах систем удобрения на качество овощной продукции имел во многом похожие на описанные выше закономерности, но при этом для отдельных показателей обнаружилось влияние биологических особенностей видов растений и специфики варианта системы удобрения. По чувствительности, выраженной относительно отклонением от параметра контрольного варианта, изученные в опыте показатели качества продукции сформировали убывающий ряд: содержание витаминов ($\uparrow 46\%$) > нитратов ($\uparrow 42\%$) > калия ($\uparrow 27\%$) > сырого протеина ($\uparrow 18\%$) > фосфора ($\uparrow 8\%$) > сухого вещества ($\downarrow 5\%$) > сахаров ($\downarrow \uparrow 3\%$).

Аналогичные убывающие ряды отзывчивости овощных культур на применение систем удобрения по относительному приросту достоверно реагирующих качественных показателей приняли следующий вид:

– содержание витаминов: морковь столовая (62%) > редька черная (50%) > свекла столовая (45%) > картофель (43%) > капуста белокочанная (38%);

– содержание нитратов: картофель (76%) > свекла столовая (52%) > редька черная (32%) > морковь столовая (25%) > капуста белокочанная (20%);

– содержание калия: редька черная (39%) > картофель (33%) \geq морковь столовая (32%) > капуста белокочанная (26%) > свекла столовая (20%);

– содержание сырого протеина: картофель (26%) > редька черная (23%) > свекла столовая (15%) \geq морковь столовая (14%) \geq капуста белокочанная (13%).

При этом определенную роль в формировании этих рядов играли и погодно-климатические условия. Например, лидирующая позиция в накоплении нитратов в клубнях под действием удобрений занята картофелем во многом благодаря неблагоприятной дождливой и прохладной погоде в процессе их формирования в 2008 г. Напротив, скромное в этом отношении положение капусты белокочанной и моркови столовой было отчасти обеспечено засушливой погодой в 2010 и 2011 гг. Позиция же в этом ряду свеклы столовой, склонной к накоплению нитратов [7, 28], выглядит вполне закономерной.

Оптимизируя почвенные режимы применением мелиорантов и удобрений, удалось снизить коэффициент вариации изученных качественных показателей в среднем в опытах в варианте ЗСУ на 25 отн.% (с 16 до 12%) и в вариантах ТСУ-1 и ТСУ-2 – на 44 отн.% (до 9%). При оценке отзывчивости овощных культур севооборотов по относительному уровню снижения этого показателя они сформировали убывающий ряд: морковь столовая (51%) > капуста белокочанная (42%) > свекла столовая (37%) \geq картофель (36%) > редька черная (33%).

Сравнительная оценка минеральной (в ландшафтном опыте) и органо-минеральной (в модельно-полевом опыте) систем удобрения показала весьма схожий характер влияния на качество овощной продукции. Тем не менее, существенная разница между ними проявилась в уровне снижения содержания сухого вещества (от недо-

Таблица 3. Влияние систем удобрения на качественный состав товарной продукции культур овощного севооборота в модельно-полевом опыте

Вариант опыта	Статистические показатели качества видов продукции													
	сухое вещество		сахара*		сырой протеин,		P ₂ O ₅ , % с.в.		K ₂ O, % с.в.		витамины**		NO ₃ ⁻	
	%				% сухого вещества						мг/кг			
	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %
Редька черная (корнеплоды)														
Контроль	11.9	6	4.5	13	7.1	13	0.66	11	1.73	25	105	37	79	41
ЗСУ	11.5	7	4.5	11	8.3	4	0.70	10	2.16	18	147	41	104	29
ТСУ-1	11.8	7	4.8	10	9.0	6	0.73	9	2.75	9	173	31	100	27
ТСУ-2	11.5	9	4.6	10	8.8	6	0.69	5	2.33	15	153	32	109	33
HCP ₀₅	0.2		F _φ < F ₀₅		0.6		0.03		0.29		20		9	
Картофель (клубни)														
Контроль	25.2	5	13.3	6	3.5	17	0.51	12	1.24	37	38	32	83	37
ЗСУ	24.7	3	12.8	6	3.9	11	0.53	6	1.54	25	47	27	195	24
ТСУ-1	25.1	3	13.4	4	4.3	7	0.56	4	1.70	18	55	15	182	17
ТСУ-2	25.1	3	13.1	6	4.1	8	0.53	7	1.72	18	58	18	171	14
HCP ₀₅	F _φ < F ₀₅		0.4		0.2		0.02		0.24		5		17	
Свекла столовая (корнеплоды)														
Контроль	17.8	6	10.5	9	8.0	9	0.47	10	1.90	24	62	14	227	27
ЗСУ	17.2	6	10.2	7	8.8	9	0.49	7	2.21	19	83	11	430	15
ТСУ-1	17.6	5	10.6	7	9.2	11	0.53	6	2.40	13	99	7	358	13
ТСУ-2	17.4	6	10.3	7	8.9	8	0.50	7	2.25	15	89	10	401	11
HCP ₀₅	0.2		0.3		0.5		0.02		0.19		7		40	
Капуста белокочанная (кочаны)														
Контроль	11.6	8	7.0	13	11.1	9	0.45	15	1.64	31	560	24	267	23
ЗСУ	11.5	5	7.1	4	12.6	6	0.49	11	2.08	19	658	16	336	16
ТСУ-1	12.1	4	7.5	4	12.8	3	0.51	8	2.30	9	789	7	316	15
ТСУ-2	11.6	6	7.1	6	12.5	4	0.50	10	2.20	5	741	7	328	18
HCP ₀₅	F _φ < F ₀₅		F _φ < F ₀₅		0.4		0.03		0.30		67		29	
Морковь столовая (корнеплоды)														
Контроль	15.2	6	8.9	9	7.9	9	0.65	7	1.69	22	82	10	172	23
ЗСУ	14.7	5	8.7	6	8.9	5	0.68	5	2.08	12	89	6	234	17
ТСУ-1	15.2	3	9.1	6	9.1	5	0.70	4	2.31	7	92	2	205	18
ТСУ-2	14.9	3	8.8	6	8.8	4	0.68	3	2.11	10	91	4	222	24
HCP ₀₅	0.3		0.3		0.3		0.02		0.19		4		23	

*В клубнях картофеля – крахмал, в остальной продукции – простые сахара.

**В корнеплодах моркови – каротин, в остальной продукции – витамин С.

стоверных 0.2% при органо-минеральной до 2.3% – при минеральной системе удобрения).

Зональная система удобрения снизила в среднем содержание в овощной продукции сухого вещества на 5% (с 17.7 до 16.8%), сахаров и крахмала – на 3% (с 9.8 до 9.5%) и, напротив, повысила содержание сырого протеина на 13% (с 7.9 до 8.9%), фосфора – на 6% (с 0.54 до 0.57%), калия – на 22% (с 1.72 до 2.09%), витаминов – на 30% (со 170 до

221 мг/кг) и нитратов – на 42% (со 184 до 261%). Дифференцированное внесение равных доз удобрений и мелиорантов в варианте ТСУ-2 не обеспечило существенного улучшения качества продукции. Ожидаемые положительные эффекты, в том числе относительно снижения содержания нитратов, чаще носили форму тенденции. Однако ее бесспорное превосходство в снижении пространственной вариабельности качества продук-

Таблица 4. Влияние систем удобрения на качественный состав товарной продукции культур овощного севооборота в ландшафтном опыте

Вариант	Статистические показатели качества видов продукции													
	сухое вещество		сахара*		сырой протеин		P ₂ O ₅		K ₂ O		витамины**		NO ₃ ⁻	
	%				% с.в.						мг/кг			
	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %	m _{med}	Cv, %
Однолетние травы (зеленая масса)														
Контроль	31.7	7	3.8	5	12.5	5	0.65	9	1.56	26	29	11	114	19
ЗСУ	26.5	5	4.5	8	14.4	6	0.71	5	1.76	24	40	12	173	8
ТСУ-1	27.1	7	4.6	7	15.0	3	0.71	4	1.88	17	43	11	155	15
ТСУ-2	27.3	4	4.6	5	14.9	4	0.72	4	1.67	14	43	3	168	9
HCP ₀₅	1.8		0.2		0.9		0.03		$F_{\Phi} < F_{05}$		6		26	
Картофель (клубни)														
Контроль	27.0	9	14.9	14	3.8	7	0.54	5	1.36	21	31	26	79	15
ЗСУ	25.6	7	13.8	13	5.4	5	0.58	11	1.73	18	38	19	110	18
ТСУ-1	26.5	5	14.6	9	4.7	5	0.59	8	2.03	2	47	7	95	15
ТСУ-2	25.7	5	13.9	14	5.3	2	0.57	11	1.68	14	42	12	109	13
HCP ₀₅	$F_{\Phi} < F_{05}$		0.7		0.4		$F_{\Phi} < F_{05}$		0.25		3		14	
Свекла столовая (корнеплоды)														
Контроль	22.0	8	10.7	14	8.3	12	0.57	8	1.76	27	66	42	267	14
ЗСУ	19.1	7	10.2	7	9.6	10	0.62	7	1.95	21	88	34	356	17
ТСУ-1	20.6	3	10.8	2	10.5	4	0.65	3	2.36	9	103	5	323	17
ТСУ-2	19.0	5	10.2	7	9.4	7	0.60	3	1.97	14	92	20	346	11
HCP ₀₅	1.6		$F_{\Phi} < F_{05}$		1.0		0.04		0.25		20		38	
Капуста белокочанная (кочаны)														
Контроль	12.3	5	7.6	8	12.9	5	0.48	8	2.21	18	542	28	370	13
ЗСУ	11.6	4	7.2	6	14.0	4	0.50	8	2.51	16	748	18	445	13
ТСУ-1	11.8	5	7.6	1	14.6	2	0.53	3	2.71	13	860	16	434	9
ТСУ-2	11.5	4	7.5	5	14.3	4	0.50	4	2.52	12	746	11	432	10
HCP ₀₅	$F_{\Phi} < F_{05}$		$F_{\Phi} < F_{05}$		0.5		$F_{\Phi} < F_{05}$		0.16		150		40	
Морковь столовая (корнеплоды)														
Контроль	16.2	4	11.1	5	8.1	6	0.54	6	1.94	18	43	49	113	15
ЗСУ	15.3	5	10.7	6	9.0	5	0.58	4	2.52	7	88	11	142	12
ТСУ-1	15.9	5	11.3	6	9.5	1	0.61	6	2.67	7	98	5	135	16
ТСУ-2	15.5	7	10.8	4	9.1	4	0.58	2	2.61	5	89	6	135	5
HCP ₀₅	0.5		$F_{\Phi} < F_{05}$		0.5		0.04		0.3		18		16	

*В клубнях картофеля – крахмал, в остальной продукции – простые сахара.

**В зеленой массе однолетних трав и корнеплодах моркови – каротин, в остальной продукции – витамин С.

ции на 25 отн.% имеет важное экологическое значение. Как показали наши более ранние исследования [19], значительная неоднородность партии картофеля по содержанию нитратов зачастую формируется за счет клубней с превышением МДУ нитратов, полученных в очагах переудобрения азотом посевов. А такая ситуация при использовании точной системы удобрения маловероятна.

Овощная продукция с лучшими качественными показателями была получена в варианте ТСУ-1 с предварительным точным окультуриванием почвы и последующим равномерным внесением органических и сниженных доз минеральных удобрений. В целом лучшую склонность к накоплению питательных веществ проявляла корне- и клубнеплодная продукция. За счет комплексной оптимизации свойств и режимов дерново-подзо-

листой почвы относительно варианта ЗСУ в этом случае удалось незначительно повысить содержание сухого вещества на 5% (с 16.8 до 17.4%), сахаров – на 3% (с 9.5 до 10.0%), сырого протеина на 4% (с 8.9 до 9.3%) и фосфора – на 5% (с 0.57 до 0.60%), более значимо – калия на 13% (с 2.09 до 2.36%) и витаминов – на 16% (с 221 до 257 мг/кг). Вследствие сокращения на 17–21% доз азотных удобрений в этом варианте удалось хоть и незначительно (на 6%), но все же снизить среднее содержание в товарной продукции нитратов с 261 до 245 мг/кг. Это в сочетании с сокращением пространственной дифференциации привело к существенному сокращению рисков загрязнения продукции нитратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На контрастной по агрофизическим и агрохимическим свойствам структуре почвенного покрова в форме литогенной мозаики полугидроморфных дерново-подзолистых почв разной степени окультуренности использованные варианты точной системы удобрения (с предварительным точным окультуриванием почвы и ежегодным дозированием с учетом мелкомасштабной неоднородности свойств почвы) обеспечили выраженное преимущество над показателями традиционной зональной системы удобрения по агрономической и экологической эффективности. Их уровень определялся спецификой почвенных условий и системой удобрения, технологией их применения, а также биологическими особенностями культур овощных севооборотов и отдельных оцениваемых показателей. Превосходство в продуктивности севооборота системы на основе прецизионного внесения удобрений достигло 5–10%, а точного окультуривания – 14–41% при снижении ее пространственной variability на 44–51%.

По чувствительности качества продукции к применению удобрений овощные культуры сформировали убывающий ряд: морковь столовая (51%) > капуста белокочанная (42%) > свекла столовая (37%) ≥ картофель (36%) > редька черная (33%), а показатели качества овощной продукции – такой убывающий ряд: содержание витаминов (↑46%) > нитратов (↑42%) > калия (↑27%) > сырого протеина (↑18%) > фосфора (↑8%) > сухого вещества (↓5%) > сахаров (↓↑3%).

Обеспечив выраженную оптимизацию и выравнивание (в среднем на 63%) комплекса важнейших агропроизводственных свойств почвы, система удобрения на основе точного окультуривания превзошла по продуктивности овощного севооборота зональную в органо-минеральном исполнении на 14%, в минеральном – на 41%, по

ее пространственной variability – на 44 и 61%, по уровню накопления питательных веществ и витаминов – на 3–16%, по снижению содержания нитратов – на 6% и разнокачественности продукции – на 44%.

Точная органо-минеральная система удобрения на основе ежегодного дифференцированного их внесения превзошла зональную по уровню продуктивности на 10%, пространственной variability урожайности и качества продукции – на 44%, незначительно улучшив ряд показателей накопления питательных веществ в отдельных культурах и сократив риски избыточного накопления нитратов.

Таким образом, даже в непростых современных условиях в овощных севооборотах на контрастных по свойствам дерново-подзолистых почвах внедрение точных систем удобрения является обоснованным и высоко эффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пивоваров В.Ф.* Овощи России. М.: ВНИИССОК, 2006. 384 с.
2. *Пивоваров В.Ф., Пышная О.Н., Гуркина Л.К.* Овощи – продукты и сырье для функционального питания // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 3. С. 121–127.
3. *Гинс М.С., Гинс В.К., Пивоваров В.Ф., Кононков П.Ф., Дерканосова Н.М.* Значение овощных культур в коррекции биохимического состава рациона человека // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2017. № 2. С. 3–5.
4. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под ред. А.Л. Иванова, Л.М. Державина. М.: Минсельхоз РФ, РАСХН, 2008. 392 с.
5. *Гинс М.С., Пивоваров В.Ф., Гинс В.К., Кононков П.Ф., Дерканосова Н.М.* Научное обеспечение инновационных технологий при создании функциональных продуктов на основе овощных культур // Овощи России. 2014. № 1 (22). С. 4–9.
6. *Архипов М.В., Данилова Т.А., Сеницына С.М.* Научные основы эффективного использования агресурсного потенциала Северо-Запада России. СПб.–Пушкин, 2018. 135 с.
7. *Борисов В.А.* Система удобрения овощных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 392 с.
8. *Пивоваров В.Ф., Надежкин С.М.* Основные пути совершенствования систем удобрения в овощеводстве // Плодородие. 2016. № 5 (92). С. 16–18.
9. *Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А.* Структура пространственной variability агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1559–1566.
10. *Фрид А.С.* Пространственное варьирование и временная динамика плодородия почв в длительных полевых опытах. М.: РАСХН, 2002. 80 с.

11. Басевич В.Ф., Тетенькин В.Л. Неоднородность подзолистых почв и пестрополье // Вестн. МГУ. Сер. 17. 2010. С. 35–42.
12. Кашианов А.Н., Явтушенко В.Е. Агрохимия почв склонов. М.: Колос, 1997. 316 с.
13. Шпедт А.А., Пурлаур В.К. Оценка влияния рельефа на плодородие почв и урожайность зерновых культур // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2008. № 10. С. 5–11.
14. Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. Мониторинг агрохимических свойств почв различных угодий в пределах агроландшафта // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2020. № 1. С. 27–30.
15. Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастливая Л.С., Касаткина Г.А. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 224 с.
16. Иванов А.И., Конашенков А.А., Хомяков Ю.В., Фоменко Т.Г., Федькин И.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия // Агрохимия. 2014. № 2. С. 39–49.
17. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Дубовицкая В.И. Влияние ландшафтных условий на свойства почвенного покрова пахотного угодья на пологом склоне озерно-ледниковой равнины // Рос. сел.-хоз. наука. 2019. № 2. С. 39–43.
18. Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
19. Иванов А.И., Конашенков А.А. Агроэкологические последствия неравномерного внесения навоза в овощном севообороте // Агрохимия. 2012. № 6. С. 66–72.
20. Иванов А.И., Конашенков А.А., Федотенков Д.В. Равномерность внесения навоза и пестрота почвенного плодородия // Плодородие. 2007. № 2. С. 16–18.
21. Шпаар Д., Захаренко А.В., Якушев В.П. Точное сельское хозяйство. СПб.—Пушкин, 2009. 397 с.
22. Иванов А.И., Конашенков А.А. Методико-технологические аспекты и результаты оценки точных систем удобрения // Сел.-хоз. машины и технол. 2014. № 3. С. 20–24.
23. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А. Влияние ландшафтных условий на эффективность точной системы удобрения в звене полевого севооборота // Агрохимия. 2020. № 2. С. 69–76.
24. Bianchini A.A., Mallarino A. Soil-Sampling Alternatives and Variable-Rate Liming for a Soybean–Corn Rotation // Agron. J. 2002. V. 94 (6). P. 1355–1366.
25. Weisz R., Heiniger R., White J.G., Knox B., Reed L. Long-term variable rate lime and phosphorus application for piedmont no-till field crops // Precis. Agricult. 2003. № 4. P. 311–330.
26. Иванов А.И., Лапа В.В., Конашенков А.А., Иванова Ж.А. Биологические особенности ответа культур овощного севооборота на точные системы удобрения // Сел.-хоз. биол. 2017. Т. 52. № 3. С. 454–463.
27. Дерюгин И.П., Кирпичников Н.А., Прокошев В.В. Агрохимическое обоснование оптимальных параметров содержания в почве подвижных форм фосфора и калия и оптимизация доз фосфорных и калийных удобрений на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 1995. № 2. С. 3–8.
28. Иванов А.Л., Сычев В.Г., Чекмарев П.А., Державин Л.М., Борисов В.А. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в интенсивном овощеводстве открытого грунта. М.: РАСХН, 2012. 476 с.

Importance of Precise Fertilizer System in Management Vegetable Quality

A. I. Ivanov^{a, #}, Zh. A. Ivanova^a, and A. A. Konashenkov^b

^a Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prospect 14, St. Petersburg 195220, Russia

^b St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences North–West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance
sh. Podbelskogo, 71, St.-Petersburg–Pushkin 196608, Russia

[#] E-mail: office@agrophis.ru

The paper analyzes the data of landscape and model–field experiments on a soil contrasting in properties. In vegetable crop rotations, three variants of mineral and organic–mineral fertilization systems were used: a common zonal system, a precise system based on the preliminary precision soil cultivation, and a precise system with annual differentiated application of ameliorants and fertilizers. We determined the parameters of optimization of soil properties and agronomic efficiency, as well as the series of sensitivity of vegetable crops and separate indicators of product quality to soil conditions and precise fertilization systems. Having ensured a pronounced optimization and levelling of the most important agricultural properties of the soil (on average by 63%), the fertilization system based on the precise cultivation surpassed the zonal system in terms of the productivity of vegetable crop rotation in the organic-mineral version by 14%, in the mineral one – by 41%, in its spatial variability – by 44 and 61%. In terms of the accumulation of nutrients and vitamins, the superiority of the former system was 3–16%, while the content of nitrates decreased by 6%, and the variability in product quality – by 44%.

Key words: sod-podzolic soil, soil properties, precise fertilization systems, vegetable crop rotation, productivity, product quality, variability.