

УДК 631.816:631.582:631.95

ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОЧНОЙ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ В ЗВЕНЕ ПОЛЕВОГО СЕВООБОРОТА

© 2020 г. А. И. Иванов^{1,2,*}, Ж. А. Иванова¹, Н. А. Цыганова³

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

² Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, ш. Подбельского, 7, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 Санкт-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

*E-mail: office@agrophys.ru

Поступила в редакцию 01.08.2018 г.

После доработки 25.12.2018 г.

Принята к публикации 10.11.2019 г.

Проанализированы данные ландшафтного опыта, выполненного параллельно в 5-ти фациях агроландшафта, отличающихся структурой почвенного покрова и геохимическими режимами. Установлена значительная дифференциация продуктивности звена полевого севооборота и окупаемости действующего вещества удобрений в зависимости от ландшафтно-экологических условий. При этом отчетливее проявилось влияние литогенного фактора (степени развития глеевого и эрозийного процессов, агрофизических и агрохимических свойств почвы и материнской породы), в то время как значение геохимических режимов не установлено. Одним из косвенных подтверждений роли геохимических режимов стало повышение на 35% оплаты урожаем 1 кг NPK в варианте точной системы удобрения.

Ключевые слова: рельеф, агроландшафт, агромикрорландшафт, почвенный покров, свойства почвы, геохимический режим, севооборот, система удобрения, продуктивность севооборота, эффективность удобрений.

DOI: 10.31857/S0002188120020040

ВВЕДЕНИЕ

Одним из обязательных требований к адаптивно-ландшафтным системам земледелия является строгая увязка их технологических звеньев (включая и систему удобрения) со всем комплексом ландшафтных условий [1–4]. Естественно, что это предполагает обязательность нетрадиционного почвенно-агрохимического обследования, а более затратного прецизионного картирования сельскохозяйственных угодий с учетом ландшафтно-экологических условий [2, 4–7]. Исследования показали, что последнее объективнее отражает пространственную неоднородность почвенного покрова [8] и позволяет с разной степенью эффективности реализовать точные системы удобрения [7, 9].

Однако существенную проблему в настоящее время представляет практически полное отсутствие аргументированных методических рекомендаций по увязке систем удобрения с конкретными ландшафтными условиями. Имеющаяся на этот счет информация весьма противоречива. На-

пример, в работах [10, 11] напрямую увязан уровень эффективности удобрений с типом геохимического режима почвы в пределах моренного пологого холма. Показано, что оплата удобрений урожаем снижается в нижней части склонов в 2–5 раз. В то же время в исследованиях [12] на пологоволнистой водно-ледниковой равнине существенного влияния геохимических режимов почвы на окупаемость единицы действующего вещества удобрений установлено не было. Кроме того, ситуация существенно усложняется биологическими особенностями питания возделываемых культур в складывающихся агроэкологических условиях и отклика на применение удобрений [4, 12–14]. Все это указывает на необходимость более детальной научной проработки этого вопроса.

В настоящей статье впервые проанализированы данные ландшафтного полевого опыта, выполняемого совместно Агрофизическим НИИ и Санкт-Петербургским ГАУ. Цель работы — оценка эффективности отдельных вариантов методических подходов к пространственной корректи-

ровке системы удобрения в полевом севообороте с учетом особенностей ландшафтных условий. В их основу был положен учет вероятного влияния геохимических режимов дерново-подзолистой почвы в пределах пологого склона озерно-ледниковой равнины на условия питания растений и эффективность удобрений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Меньковском филиале АФИ в Гатчинском р-не Ленинградской обл. Ландшафтный полевой опыт заложен в 2013 г. в системе полевого севооборота пар чистый — пшеница озимая — овес + многолетние злаковые травы — многолетние травы 1–3-го года пользования — рожь озимая — картофель. Основной объект изучения — агроландшафт, представлен урочищем “Кривое Колено” на пологом склоне озерно-ледникового происхождения северо-западной и западной экспозиции площадью 53.64 га (в том числе 47.3 га пашни и 6.34 га сенокоса). Структура его почвенного покрова сформирована мелкоконтурными комплексами с участием легко- и среднесуглинистых разновидностей дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв. Почвообразующая порода — преимущественно мало- и среднемощная тяжелосуглинистая и глинистая опесчаненная морена, подстилаемая с глубины 75–120 см озерно-ледниковой супесью. Коренные породы — красноцветные девонские пески. На пашне преобладают среднеокультуренные почвы с пятнами хорошо- и слабоокультуренных. По данным прецизионного ландшафтного агрохимического обследования, коэффициент вариации агрохимических свойств почв находился в пределах от 27 до 148%, несмотря на единую историю хозяйственного использования угодья.

Для решения поставленных задач на территории агроландшафта было подобрано 5 ключевых участков площадью по 300 м², представляющих агромикрорландшафты (АМЛ) с разными геохимическими режимами: № 1 — элювиальным (Э) на среднесуглинистой дерново-слабоподзолистой глееватой почве (занимаемая доля — 17% от площади агроландшафта), № 2 — элювиально-аккумулятивным (ЭА) на легкосуглинистой дерново-слабоподзолистой глееватой почве (занимаемая доля — 8%), № 3 — транзитно-элювиальным (ТЭ) на легкосуглинистой смытой дерново-слабоподзолистой глееватой почве (занимаемая доля — 49%), № 4 — аккумулятивным (А) на среднесуглинистой дерново-слабоподзолистой глееватой почве, сформировавшейся на карбонатной морене (занимаемая доля — 18%), № 5 — аккумулятив-

ным (А) на среднесуглинистой дерново-подзолистой глеевой почве (занимаемая доля — 8%).

На площади каждого ключевого участка в 2013 г. были заложены мелкоделяночные опыты с 4-мя вариантами дифференциации системы удобрения в зависимости от ландшафтных условий: т.н. зональная (ЗСУ), в рамках которой дозы органических и минеральных удобрений определяли на основе зональных рекомендаций для дерново-подзолистых почв и средневзвешенных агрохимических показателей всего агроландшафта, и точная (ТСУ), предусматривающая корректировку доз с учетом преобладающих геохимических режимов почвы. При этом исходили из представления, что в аккумулятивных фациях агроландшафта формируются естественные барьеры для горизонтальной и вертикальной миграции биогенных элементов. Кроме того, в них высока вероятность пониженной микробиологической активности вследствие недостатка тепловых ресурсов (особенно в начале вегетации), что негативно сказывается на использовании питательных элементов, в первую очередь органических удобрений. Для элювиальных фаций агроландшафта свойственны повышенные непродуктивные потери питательных веществ почвы и удобрений.

В схеме опыта были предусмотрены 3 методических варианта корректировки доз удобрений: ТСУ-1 — дифференцировали в пространстве только дозы органического удобрения (в элювиальном АМЛ повышали на 30%, в аккумулятивных — снижали на 38%); ТСУ-2 — только минеральных удобрений (коррективы при этом имели противоположную направленность); ТСУ-3 — обоих видов удобрений (общая доза NPK в элювиальном АМЛ увеличивалась на 12%, в аккумулятивных — уменьшалась на 14%). Распределение удобрений по полям севооборота и вариантам опыта представлено в табл. 1.

В качестве органического удобрения применяли торфо-пометный компост (ТПК), содержащий 43.4% сухого вещества, 46.7% золы, 0.35% N, 1.18% P₂O₅, 0.86% K₂O и 1.90% CaO, который вносили в раннем чистом пару под вспашку. Калийные удобрения в форме K_x вносили под предпосевную обработку почвы, азотные — в форме N_{aa} — в подкормку в фазе начала весеннего отрастания пшеницы озимой. Под овес полную дозу минерального удобрения в форме АФК, N_{aa} и K_x вносили под предпосевную культивацию почвы.

Опыты развернуты на базе 7-польного полевого севооборота. В работе проанализированы данные его первого зернопарового звена пар чистый — озимая пшеница — овес + многолетние злаковые травы. Площадь опытной делянки — 20 м², повторность трехкратная. Учет урожая — сплошной

Таблица 1. Схема распределения удобрений на полях севооборота и в агромикрорландшафтах (2013–2015 гг.)

Вариант (система удобрения)	Доза ТПК (т/га) и минеральных удобрений (кг д.в./га) в агромикрорландшафтах				
	АМЛ № 1	АМЛ № 2	АМЛ № 3	АМЛ № 4	АМЛ № 5
Пар чистый (2013 г.)					
Контроль	0	0	0	0	0
ЗСУ	ТПК 40 + К80	ТПК 40 + К80	ТПК 40 + К80	ТПК 40 + К80	ТПК 40 + К80
ТСУ-1	ТПК 52 + К80	ТПК 40 + К80	ТПК 28 + К80	ТПК 30 + К80	ТПК 20 + К80
ТСУ-2	ТПК 40 + К60	ТПК 40 + К70	ТПК 40 + К110	ТПК 40 + К100	ТПК 40 + К60
ТСУ-3	ТПК 52 + К60	ТПК 40 + К70	ТПК 28 + К110	ТПК 30 + К100	ТПК 20 + К60
Пшеница озимая (2014 г.)					
Контроль	0	0	0	0	0
ЗСУ	N80	N80	N80	N80	N80
ТСУ-1	N80	N80	N80	N80	N80
ТСУ-2	N50	N90	N100	N100	N60
ТСУ-3	N50	N90	N100	N100	N60
Овес + многолетние травы (2015 г.)					
Контроль	0	0	0	0	0
ЗСУ	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110
ТСУ-1	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110	N100P50K110
ТСУ-2	N90P40K80	N100P50K90	N110P60K130	N110P50K120	N90P50K120
ТСУ-3	N70P40K80	N90P50K90	N120P60K130	N110P50K120	N110P50K120

Таблица 2. Агрофизические и агрохимические свойства почвы опыта

Показатель	В агромикрорландшафтах					В агроландшафте	
	АМЛ № 1	АМЛ № 2	АМЛ № 3	АМЛ № 4	АМЛ № 5	M_{cp}	$V, \%$
Мощность почвенного профиля, см	103	127	106	92	72	102	20
Содержание физической глины, %	33.4	28.1	28.7	31.6	32.9	30.3	8
Доля агрегатов диаметром 0.25–10 мм, %	56.8	54.7	61.0	83.5	74.6	64.9	19
Доля водопрочных агрегатов, %	49.4	53.1	35.7	46.6	50.9	42.6	16
pH _{KCl} , ед.	6.0	5.5	5.4	5.5	4.9	5.5	7
Содержание органического вещества, %	4.01	3.04	2.39	3.36	3.27	2.96	20
Содержание P ₂ O ₅ подв., мг/кг	286	293	247	170	173	238	25
Содержание K ₂ O подв., мг/кг	122	87	66	76	115	83	29

весовой. Химические анализы выполняли по соответствующим стандартным методикам в аккредитованной испытательной лаборатории и лаборатории методологии опытного дела АФИ. Статистическая обработка данных проведена дисперсионным методом с использованием программного пакета Stat.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дифференциация свойств почвы в изученных агромикрорландшафтах в основном повторяла показатели вариабельности в целом в агроландшаф-

те, т.е. была умеренной по гранулометрическому составу и величине pH_{KCl}, значительной — по мощности генетических горизонтов и всего почвенного профиля, степени развития глеевого процесса, структурному состоянию, содержанию органического вещества и высокой — по показателям питательного режима (табл. 2). Вклад в ее формирование внесли неоднородность состава и свойств моренных отложений, а также специфика геохимических режимов и антропогенной земледельческой деятельности [8, 12, 14].

Таблица 3. Продуктивность звена полевого севооборота в зависимости от ландшафтных условий и системы удобрения

Вариант системы удобрения (фактор Б)	Пшеница озимая						Овес						Звено севооборота			
	урожай- ность, т/га		прибавка урожайности				урожай- ность, т/га		прибавка урожайности				продуктивность, т з.е./га	прибавка		оплата 1 кг NPK, з.е.
	зерно	солома	зерно		солома		зерно	солома	зерно		солома					
т/га			%	т/га	%	т/га			%	т/га	%					
АМЛ № 1 (Э) – фактор А																
Контроль без удобрения	2.66	4.40	–	–	–	–	4.55	5.98	–	–	–	–	8.68	–	–	–
ЗСУ	3.66	5.30	1.00	38	0.90	20	6.40	8.29	1.85	41	2.31	39	11.9	3.23	37	2.3
ТСУ-1	3.89	5.40	1.23	46	1.00	23	7.50	9.66	2.95	65	3.68	62	13.4	4.71	54	2.8
ТСУ-2	3.70	5.30	1.04	39	0.90	20	7.05	8.95	2.50	55	2.97	50	12.6	3.96	46	3.1
ТСУ-3	4.07	6.24	1.41	53	1.84	42	7.36	9.42	2.81	62	3.44	58	13.5	4.81	55	3.1
АМЛ № 2 (ЭА) – фактор А																
Контроль без удобрения	2.88	5.05	–	–	–	–	3.97	5.04	–	–	–	–	7.33	–	–	–
ЗСУ	5.34	6.18	2.46	85	1.13	22	5.90	6.55	1.93	49	1.51	30	12.9	5.60	76	4.1
ТСУ-1	5.65	6.09	2.77	96	1.04	21	5.84	7.52	1.87	47	2.48	49	13.4	6.09	83	4.4
ТСУ-2	5.26	5.54	2.38	83	0.49	10	5.74	7.35	1.77	45	2.31	46	12.8	5.47	75	4.0
ТСУ-3	5.19	5.83	2.31	80	0.78	15	5.84	7.55	1.87	47	2.51	50	12.92	5.59	76	4.2
АМЛ № 3 (ТЭ) – фактор А																
Контроль без удобрения	1.83	1.87	–	–	–	–	2.48	3.19	–	–	–	–	4.98	–	–	–
ЗСУ	4.26	5.69	2.43	133	3.82	204	4.36	5.65	1.88	76	2.46	77	10.3	5.32	107	3.9
ТСУ-1	5.13	5.63	3.30	180	3.76	201	4.39	5.74	1.91	77	2.55	80	11.2	6.23	125	5.7
ТСУ-2	5.01	5.58	3.18	174	3.71	198	4.92	6.25	2.44	98	3.06	96	11.6	6.65	134	4.5
ТСУ-3	4.90	5.23	3.07	168	3.36	180	5.05	6.52	2.57	104	3.33	104	11.6	6.64	133	5.6
АМЛ № 4 (А) – фактор А																
Контроль без удобрения	3.59	4.44	–	–	–	–	3.68	4.62	–	–	–	–	8.58	–	–	–
ЗСУ	5.72	6.05	2.13	59	1.61	36	5.90	7.55	2.22	60	2.93	63	13.5	4.96	58	3.6
ТСУ-1	5.76	6.24	2.17	60	1.80	41	6.00	7.80	2.32	63	3.18	69	13.8	5.18	60	4.6
ТСУ-2	5.34	5.60	1.75	49	1.16	26	6.10	7.94	2.42	66	3.32	72	13.3	4.75	55	3.3
ТСУ-3	5.68	6.40	2.09	58	1.96	44	6.31	8.18	2.63	71	3.56	77	14.1	5.48	64	4.6
АМЛ № 5 (А) – фактор А																
Контроль без удобрения	2.57	4.14	–	–	–	–	1.84	2.90	–	–	–	–	5.60	–	–	–
ЗСУ	3.49	4.75	0.92	36	0.61	15	3.04	4.37	1.20	65	1.47	51	7.95	2.35	42	1.7

Таблица 3. Окончание

Вариант системы удобрения (фактор Б)	Пшеница озимая						Овес						Звено севооборота			
	урожай- ность, т/га		прибавка урожайности				урожай- ность, т/га		прибавка урожайности				продуктивность, т з.е./га	прибавка		оплата 1 кг NPK, з.е.
	зерно	солома	зерно		солома		зерно	солома	зерно		солома					
т/га			%	т/га	%	т/га			%	т/га	%					
ТСУ-1	3.78	4.69	1.21	47	0.55	13	3.29	4.78	1.45	79	1.88	65	8.55	2.95	53	3.3
ТСУ-2	3.62	5.02	1.05	41	0.88	21	3.67	5.16	1.83	99	2.26	80	8.85	3.25	58	2.4
ТСУ-3	3.95	4.90	1.38	54	0.76	18	2.87	5.43	1.03	56	2.53	87	7.59	1.99	36	2.2
Агроландшафт – фактор А																
Контроль без удобрения	2.43	3.20	—	—	—	—	3.12	4.05	—	—	—	—	6.49	—	—	—
ЗСУ	4.45	5.65	2.02	83	2.45	77	5.00	6.41	1.88	60	2.36	58	11.18	4.69	72	3.4
ТСУ-1	4.97	5.66	2.54	105	2.46	77	5.24	6.84	2.12	68	2.79	69	12.00	5.51	85	4.7
ТСУ-2	4.76	5.49	2.33	96	2.29	72	5.46	7.01	2.34	75	2.96	73	11.98	5.49	85	3.8
ТСУ-3	4.85	5.63	2.42	100	2.43	76	5.56	7.31	2.44	78	3.26	80	12.16	5.67	87	4.6
НСП ₀₅ фактор А	0.43	0.55					0.39	0.67					0.45			
фактор Б	0.24	0.30					0.21	0.37					0.28			

При этом вариабельность урожайности возделываемых в опыте зерновых культур была еще большей. Коэффициент вариации урожайности зерна в агромикрорландшафтах достиг 23% у пшеницы озимой, 34% – у овса и 24% – в звене севооборота в целом при его средних показателях представленных агрофизических и агрохимических свойств 16 и 20% соответственно. Это указывало на важную роль всего комплекса ландшафтных условий, а не только агрохимических и агрофизических свойств почвы. Существенное значение имела и изменчивость погодных условий.

Метеоусловия 2013–2014 гг. были удовлетворительными для посевов пшеницы озимой. Избыток осадков в год посева пшеницы, а также в мае 2014 г. существенного ущерба урожаю не причинил. Средняя урожайность зерна этой культуры в варианте без удобрений составила 2.71 т/га (табл. 3) и вполне соответствовала уровню окультуренности почвы. Хотя урожайность зерна овса в аналогичном варианте была больше – 3.3 т/га. Можно предположить, что имевший место в 2014 г. дефицит осадков (64% от средней многолетней нормы), с учетом возделывания культуры на суглинистой глееватой почве, оказался даже желательным.

Минимальная урожайность зерна пшеницы озимой и овса получена в транзитно-элювиальном АМЛ № 3 и аккумулятивном АМЛ № 5 – 1.83 и 2.48, 2.57 и 1.84 т/га соответственно. В числе возможных причин этого могли быть в первом случае последствия плоскостной эрозии, во втором – сильное развитие глеевого процесса и неудовлетворительные кислотно-основные свойства почвы. Тем не менее, с учетом разной потребности овса и озимой пшеницы в почвенных условиях их отклик на размещение в данных фациях был неоднозначен. Более пластичная и менее требовательная культура овса в неблагоприятных почвенно-агрохимических условиях ожидается должна была превосходить пшеницу озимую, что подтвердилось 36%-ным преимуществом лишь в транзитно-элювиальном АМЛ № 3 на смытой дерново-подзолистой почве. На среднекислой дерново-подзолистой глеевой почве АМЛ № 5 вопреки базовым прогнозам урожайнее на 40% оказалась озимая пшеница. Объяснение этому могла дать более детальная оценка складывающихся агроэкологических условий.

Озимая пшеница, возделываемая после чистого пара, очень чутко отреагировала на параметры азотного питательного режима, сформировавшегося в допосевной период. Содержание подвиж-

ных соединений азота ($N-NH_4 + N-NO_3$) в эродированной, малогумусированной, с нарушенной структурой почве АМЛ № 3 перед посевом культуры было в 2.2 раза меньше, чем в среднегумусированной почве АМЛ № 5 (38 против 84 мг/кг). Это отрицательно повлияло на все факторы продуктивности культуры (более всего — на продуктивную кустистость), снизившие урожайность зерна на 29%. Для развития овса негативные последствия имел длительный период низкой теплообеспеченности в начале вегетации, а точнее — вызванные им острый недостаток азота из-за снижения микробиологической активности почвы и эпифитотийное развитие красно-бурой пятнистости. Наиболее критично эти факторы сочетались в самом холодном АМЛ № 5, где урожайность культуры снизилась относительно фаций АМЛ № 3, 4 и 1, на 26, 50 и 60% соответственно.

Из 5-ти изученных ландшафтных фаций заметным превосходством по уровню эффективного плодородия обладал элювиальный АМЛ № 1. Условия для его реализации урожайностью зерна и соломы в 4.55 и 5.98 т/га получил овес. Продуктивность этой культуры в этом случае оказалась на 14–147% больше, чем в других фациях, в т.ч. и в более предпочтительных с позиций потенциального участия в питании геохимических потоков питательных веществ аккумулятивных АМЛ № 2 и № 4.

Напротив, формирование зерна озимой пшеницы происходило на фоне выраженного недостатка влаги, наиболее остро проявившегося в элювиальном АМЛ № 1. Полевая влажность почвы варьировала в пределах 14.7–16.2%, в аккумулятивных фациях была на 2.4–4.3% больше. Из-за снижения по этой причине выживаемости растений к уборке и выполненности зерна продуктивность культуры на наиболее плодородной почве АМЛ № 1 оказалась идентичной варианту с наименее плодородной смытой почвой АМЛ № 3.

В целом в зависимости от величины продуктивности зернопарового звена севооборота изученные в опыте ландшафтные фации сформировали убывающий ряд: АМЛ № 1 ≥ АМЛ № 4 > АМЛ № 2 > АМЛ № 5 > АМЛ № 3, в значительной мере определяемый комплексом агрохимических и агрофизических свойств почвы.

Результаты опыта не указывали также на наличие устойчивой связи между геохимическим режимом почвы и эффективностью системы удобрения. Наиболее высокие абсолютные (5.32–6.64 т з.е./га) и относительные (107–133%) прибавки урожайности зерновых и продуктивности звена севооборота получены в транзитно-

элювиальном АМЛ № 3 на смытой почве, что согласуется с представлениями [15] о возрастании эффективности удобрений на эродированных почвах.

Минимальную отдачу от удобрений отметили в аккумулятивной фации (АМЛ № 5) и элювиальной (АМЛ № 1). Очевидно, и в данном случае основной причиной стало сочетание литогенного фактора с погодно-климатическим.

Интенсивное развитие глеевого процесса в почве АМЛ № 5 на фоне повышенной кислотности не могло не сопровождаться ухудшением условий вегетации растений и уменьшением коэффициента использования питательных веществ удобрений. Внешне это выражалось в интенсивном развитии надземной биомассы, раннем полегании посевов удобренных вариантов и увеличением доли соломы в общей продуктивности зерновых культур на 16–27%. В почве АМЛ № 4 (тоже аккумулятивная фация агроландшафта), основная часть корнеобитаемого слоя которой не была затронута глеевым процессом, а почвообразующая порода обладала карбонатами кальция и магния, отдача от удобрений была в 2 раза больше.

В элювиальной фации (АМЛ № 1) снижение окупаемости удобрений могло быть следствием лучшей окультуренности почвы верхней части склона, где в прошлом регулярно формировали бурты подстильного навоза и торфо-навозного компоста (на практике это часто сопровождается завышением доз удобрения на прилегающей территории со всеми вытекающими из этого, в т.ч. и негативными, последствиями [16]). Однако, вероятнее всего, более важную негативную роль в этом направлении сыграли засушливые условия периода налива зерна озимой пшеницы, снизившие прибавку урожая от удобрений в 2.4–3.0 раза. Подтверждением данного факта служили весьма значительные показатели эффективности удобрений в данной фации для культуры овса.

Таким образом, хотя в звене полевого севооборота на фоне одинаковых доз удобрений (вариант ЗСУ) и наблюдали сильную дифференциацию показателей агрономической эффективности отдельных АМЛ (прибавка урожайности от 37 до 107%, оплата 1 кг NPK — от 1.7 до 4.1 з.е., коэффициент вариации урожайности зерна пшеницы и овса — 22 и 27%), объяснять ее только местоположением посевов в рельефе и спецификой геохимического режима оснований недостаточно. Необходимо поиск методических решений, способных вычленив действие других факторов, в частности антропогенного и погодного. Напри-

мер, дефицит осадков может сопровождаться в одних фациях агроландшафта снижением, а в других — повышением эффективности удобрений.

Тем не менее, данные исследования показали целесообразность дифференциации доз удобрений с учетом ландшафтных условий (точнее, в зависимости от расположения сельскохозяйственной культуры в пределах пологого склона). Причем в целом в агроландшафте все 3 изученных варианта корректировки доз обеспечили практически одинаковое повышение (на 8–10%) продуктивности звена севооборота относительно варианта ЗСУ. Определенное преимущество (21–24% оплаты единицы действующего вещества) имели варианты точной системы удобрения (ТСУ-1 и ТСУ-3), где дифференцированно вносили органическое удобрение, обеспечившее поступление от 54 до 81% NPK.

Отзывчивость озимой пшеницы и овса на точные системы удобрения имела ряд особенностей, но в масштабе всего обрабатываемого агроландшафта выражалась в прибавке урожайности зерна на 0.31–0.52 и 0.24–0.56 т/га соответственно. Существенный эффект от изученных принципов корректировки доз удобрений был получен на фоне всех типов геохимических режимов. Отсутствие его в элювиально-аккумулятивном АМЛ № 2 объясняется несущественностью различий с вариантом ЗСУ. Максимальная агрономическая эффективность точных систем удобрения вполне ожидаемо достигалась в транзитно-элювиальном АМЛ № 3. Повышение окупаемости единицы действующего вещества удобрений в среднем в 3-х вариантах корректировки доз составило в элювиальном АМЛ 30, транзитно-элювиальном — 35, аккумулятивном — 36% (в среднем в агроландшафте — 29%). Сохранится ли такая закономерность на остальных культурах севооборота, покажут дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные ландшафтного полевого опыта подтвердили факт значительной, хотя и неодинаковой дифференциации отдельных агропроизводственных свойств пахотной дерново-подзолистой почвы в пределах пологого склона, обусловленной комплексом факторов. При этом уровень вариативности продуктивности зерновых культур и звена полевого севооборота в зависимости от местоположения в рельефе был еще большим. В варианте без удобрений продуктивность звена севооборота в пределах изученных фаций агроландшафта изменялась от 4.98 до 8.68 т з.е./га и в

значительной мере определялась сочетанием агрохимических и агрофизических свойств почвы.

Ландшафтные условия в сочетании с погодноклиматическим фактором оказывали значительное влияние на эффективность системы удобрения. Окупаемость 1 кг NPK в варианте ЗСУ менялась от 1.7 до 4.1 з.е. Но увязывать этот факт только с влиянием геохимических режимов почвы, как считают отдельные исследователи, нет достаточных оснований. Об этом свидетельствовал неодинаковый уровень эффективности удобрений в 2-х аккумулятивных фациях единого агроландшафта, а также его закономерная зависимость от параметров эффективного плодородия почвы. Сделать объективное заключение о фактическом значении геохимического режима на основе принятой методики полевого опыта не позволяет отсутствие возможности вычленения действия других факторов (неоднородности предшествующего антропогенного воздействия на почву, погодных условий и др.).

Изученные варианты дифференциации доз удобрений с учетом ландшафтных условий обеспечили повышение продуктивности зернопарового звена севооборота на 8–10% и окупаемости урожаем 1 кг NPK в среднем на 29%. В условиях опыта, в котором приходные статьи баланса элементов питания более чем на 50% формировались за счет органического удобрения, достаточной была корректировка доз только этого вида удобрений с учетом специфики его минерализации в отдельных фациях агроландшафта. Для разработки всесторонне обоснованных рекомендаций дифференциации системы удобрения на основе ландшафтных карт необходимо накопление соответствующего объема научной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Небольсин А.Н., Небольсина З.П., Яковлева Л.В., Поляков В.А. Научные основы и технологии использования удобрений и извести. СПб.: СЗНИИСХ, 1997. 52 с.
2. Афанасьев Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 3. С. 46–52.
3. Оценка биопотенциала производства продовольствия в Северо-Западном регионе России / Под ред. Лайшева К.А., Архипова М.В. СПб.—Пушкин, 2016. 136 с.
4. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под общ. ред. Иванова А.Л., Державина Л.М. М.: Минсельхоз РФ, РАСХН, 2008. 392 с.

5. Robert P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management // *Plant and Soil*. 2002. № 247. P. 143–149.
6. Якушев В.П., Якушева Л.Н., Суханов П.А., Петрушин А.Ф., Слинчук С.Г., Якушев В.В. О методах агрохимического обследования сельскохозяйственных угодий в точном земледелии // *Вестн. РАСХН*. 2004. № 3. С. 32–34.
7. Якушев В.П., Иванов А.И., Якушев В.В., Конашенков А.А. Реализация системы удобрения в точном земледелии // *Земледелие*. 2008. № 5. С. 77–85.
8. 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.
9. 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.
10. Ковалев Н.Г., Ходырев А.А., Иванов Д.А., Тюлин В.А. *Агрolandшафтоведение*. М.—Тверь, 2004. 492 с.
11. Иванов Д.А., Рублюк М.В., Карасева О.В. Особенности ландшафтной агрохимии кончено-моренного холма // *Экологические функции агрохимии в современном земледелии*. М.: ВНИИА, 2008. С. 84–85.
12. Конашенков А.А. Научное обоснование систем удобрения для прецизионного применения в условиях Северо-Запада России: Дис. ... д-ра с.-х. наук, СПб., 2014. 368 с.
13. 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.
14. Шпедт А.А., Пурлаур В.К. Оценка влияния рельефа на плодородие почв и урожайность зерновых культур // *Сибир. вестн. с.-х. науки*. 2008. № 10. С. 5–11.
15. Кашищанов А.Н., Явтушенко В.Е. *Агрохимия почв склонов*. М.: Колос, 1997. 316 с.
16. Иванов А.И., Конашенков А.А. Агроэкологические последствия неравномерного внесения навоза в овощном севообороте // *Агрохимия*. 2012. № 6. С. 66–72.

Influence of Landscape Conditions on Efficiency of Precision Fertilizer System in Crop Rotation Link

A. I. Ivanov^{a,b,#}, Zh. A. Ivanova^a, and N. A. Tsyganova^c

^a Agrophysical Research Institute

Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia

^b North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance
shosse Podbelskogo 7, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia

^c St. Petersburg State Agrarian University
St. Petersburgskoye shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia

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

The data of landscape experience carried out in parallel in five agricultural landscape facies characterized by structure of soil cover and geochemical regimes are analyzed. A significant differentiation of the crop rotation link productivity and the primary nutrient return depending on the landscape and environmental conditions have been established. At the same time, the influence of the lithogenic factor (the degree of gleyization and erosion, agrophysical and agrochemical properties of soil and bedrock) was quite distinctly revealed, while the value of geochemical regimes was not established. One of the indirect evidence of geochemical regimes role was the yield enhancement of 35% on 1 kg of NPK in the precision fertilizer system variant.

Key words: relief, agricultural landscape, agromicrolandscape, soil cover, soil properties, geochemical regime, crop rotation, fertilizer system, crop rotation productivity, fertilizer efficiency.