

УДК 631.811.1:633.16:631.459:631.421.1

АЗОТ В ПИТАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ ЯЧМЕНЯ В УСЛОВИЯХ СКЛОНА (ДЛИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ^{15}N)

© 2022 г. А. А. Завалин^{1,*}, Н. Я. Шмырева¹, Д. А. Соколов², О. А. Соколов¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
142290 Пущино, ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: zavalin.52@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

После доработки 23.07.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

В длительном микрополевым эксперименте (15 лет, 5-польный севооборот) на дерново-подзолистой эродированной почве (Смоленская обл.) изучена реакция 2-х сортов ячменя (Раушан – пивоваренный засухоустойчивый сорт и Носовский – зернофуражный сорт) на технологию применения азотного удобрения, меченого ^{15}N . Установлено, что пивоваренный сорт ячменя Раушан лучше использовал (на 38%) азот удобрения и больше (на 16%) потреблял азот почвы по сравнению с сортом Носовский. На приводораздельной части склона сорт Раушан потреблял азот удобрения на 31% больше, в нижней его части – на 44%, а азот почвы – на 13 и 22% соответственно по сравнению с сортом Носовский. При выращивании сорта Раушан на склоне в дерново-подзолистой почве иммобилизовалось азота удобрения на 9–10% больше, а терялось его на 21–26% меньше по сравнению с сортом Носовский. Агрофитоценоз сорта Раушан функционировал в более устойчивом состоянии (на 6–11% на приводоразделе и на 18–70% в нижней части склона), чем агрофитоценоз сорта Носовский. На всех элементах рельефа сорт Раушан формировал урожай зерна на 16% больше, чем сорт Носовский. В зерне сорта Раушан на приводораздельной части склона накапливалось сырого белка на 2.1% больше, на нижней части – на 1.1% по сравнению с сортом Носовский. В нижней части склона в течение длительного времени не удалось получить зерно ячменя с пивоваренными свойствами.

Ключевые слова: элементы рельефа, эрозия почв, севооборот, изотоп азота ^{15}N , потоки и баланс азота удобрения, потоки азота почвы, устойчивость, продуктивность сорта, содержание сырого белка.

DOI: 10.31857/S0002188122110126

ВВЕДЕНИЕ

В условиях эрозионного агрофитоценоза азот претерпевает ряд превращений: используется растениями, иммобилизуется, улетучивается в атмосферу, мигрирует по почвенному профилю с поверхностным и латеральным стоками талых и ливневых вод, что ведет к росту его потерь и загрязнению окружающей среды [1–4]. Особенностью эрозионного агроландшафта является то, что на коротком расстоянии существенно меняются световой, температурный, влажностный и питательный режимы почвы как по сторонам света, так и от приводораздельной части склона к его тальвегу. Роль азота в продукционном процессе возделываемых на склоне растений тесно связана с его участием в 3-х средах (твердой, жидкой и газообразной), в минерализационно-иммобилизационных процессах, а также в биологических

процессах (нитрификация, денитрификация), активность которых определяет структура и биоразнообразие микробоценоза [5–8].

Направленность и интенсивность минерализационно-иммобилизационных процессов трансформации азота в почве детерминированы, с одной стороны агроэкологическими условиями склона, а с другой – генотипической реакцией возделываемой культуры на азотный режим почвы [3, 9–11]. Причем, эта реакция проявляется не только в обеспеченности и доступности минеральных форм азота, но и в его поглощении корнями, транспорте, ассимиляции и аккумуляции в растении [12–14].

Внедрение технологии локализации азотных минеральных удобрений в условиях эрозионного агроландшафта предусматривает решение целого ряда задач: повышение плодородия и продуктив-

Таблица 1. Потребление азота удобрения и азота почвы сортами ячменя в зависимости от элемента рельефа и способа внесения азотного удобрения в 3-х ротациях севооборота

Вариант	Общий вынос N, г/м ²	В том числе N				Экстра-азот	
		удобрений		почвы		1	2
		1	2	1	2		
Сорт Носовский							
1-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р50К50 (фон)	4.69	–	–	4.69	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	7.36	0.73	10	6.63	90	1.94	26
Фон + 15N50 локально	12.32	1.50	12	10.82	88	6.13	50
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р50К50 (фон)	3.33	–	–	3.33	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	5.24	0.50	10	4.74	90	1.41	27
Фон + 15N50 локально	7.91	1.00	13	6.91	87	3.58	45
2-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р50К50 (фон)	3.35	–	–	3.35	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	7.44	0.90	12	6.94	88	3.59	48
Фон + 15N50 локально	10.34	1.40	14	8.94	86	5.59	46
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р50К50 (фон)	1.82	–	–	1.82	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	5.03	0.50	10	4.53	90	2.71	54
Фон + 15N50 локально	6.70	0.95	13	5.75	87	3.93	41
3-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р50К50 (фон)	3.42	–	–	3.42	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	6.61	0.95	14	5.66	86	2.24	34
Фон + 15N50 локально	10.03	1.70	17	8.33	83	4.91	49
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р50К50 (фон)	2.32	–	–	2.32	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	4.85	0.70	14	4.15	86	1.83	38
Фон + 15N50 локально	6.77	1.20	18	5.57	82	3.25	48
Сорт Раушан							
1-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р50К50 (фон)	5.15	–	–	5.15	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	8.67	1.80	21	6.87	79	1.72	20
Фон + 15N50 локально	13.80	2.05	15	11.75	85	6.60	48
Нижняя часть склона, 5–7°							
Р50К50 (фон)	3.93	–	–	3.93	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	7.52	1.40	19	6.12	81	2.19	29
Фон + 15N50 локально	9.24	1.75	18	7.49	82	3.56	38
2-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
Р50К50 (фон)	3.69	–	–	3.69	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	6.54	1.50	23	5.01	77	1.55	20
Фон + 15N50 локально	10.78	1.65	15	9.16	85	5.47	51

Таблица 1. Окончание

Вариант	Общий вынос N, г/м ²	В том числе N				Экстра-азот	
		удобрений		почвы		1	2
		1	2	1	2		
Нижняя часть склона, 5–7°							
P50K50 (фон)	2.78	–	–	2.78	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	6.16	1.30	21	4.86	79	2.08	34
Фон + 15N50 локально	8.64	1.45	17	7.15	83	2.76	32
3-я ротация							
Приводораздельная часть склона, 2–3°							
P50K50 (фон)	3.81	–	–	3.81	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	6.40	1.40	22	5.00	78	1.19	18
Фон + 15N50 локально	10.27	1.50	15	8.77	85	4.96	48
Нижняя часть склона, 5–7°							
P50K50 (фон)	2.51	–	–	2.51	100	–	–
Фон + 15N50 вразброс	6.00	1.25	21	4.75	79	2.24	37
Фон + 15N50 локально	8.27	1.40	17	6.87	83	4.36	53

Примечание. В графе 1 – г/м², 2 – %.

ности эродированных почв путем регуляции минерализационно-иммобилизационных процессов трансформации азота в почве; повышение использования азота удобрения и азота почвы растениями; снижение поверхностной и латеральной миграции азота, уменьшение газообразных потерь азота удобрения и почвенного азота, предупреждение загрязнения грунтовых и поверхностных вод [15–18].

Наиболее полную и объективную информацию о влиянии систематического применения азотных удобрений на продуктивность и качество урожая возделываемых культур можно получить только в длительных исследованиях в условиях севооборота [19–21]. Что касается экологических последствий применения азотных удобрений, круговорота и баланса азота удобрения в системе почва–растение, то необходимо проведение длительных стационарных исследований с применением метода изотопной индикации (тяжелый изотоп ¹⁵N) [22–24].

В работе [25] в длительном эксперименте (60 лет) было показано, что после уборки урожая культур севооборота внесение растительных остатков в почву и инкубирование их с мочевиной, меченой ¹⁵N, в течение 180 сут привело к наибольшему закреплению азота мочевины в почве при внесении растительных остатков риса (с широким соотношением C : N), к наименьшему – при внесении остатков сои (с узким соотношением C : N). Эти данные характеризовали только отдельные звенья круговорота и не дают полной картины поведения азота в системе почва–растение.

Цель работы – с помощью азотных удобрений, меченных ¹⁵N, изучить параметры круговорота азота удобрения и азота почвы при выращивании сортов ячменя в условиях склонового рельефа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в микрополевом опыте в течение длительного времени (15 лет, 3 ротации 5-польного севооборота: озимая рожь – овес – ячмень – многолетние травы 1-го года жизни – многолетние травы 2-го года жизни) с азотным удобрением, меченым ¹⁵N (мочевина), на эродированной дерново-подзолистой почве склонового рельефа. В 1-й ротации севооборота ГТК составил 1.6 (при норме 1.75). Во 2-й ротации севооборота ГТК составил 1.69 (температура воздуха и количество осадков оказались в 1.1 раза выше по сравнению со среднемноголетними показателями). В 3-й ротации севооборота ГТК достиг 2.0 (количество осадков превышало в 1.1 раза, температура воздуха снижалась в 1.1 раза по сравнению со среднемноголетними показателями). Исследование проводили с 2-мя сортами ячменя: Носовский 9 (зернофуражного направления) и Раушан (пивоваренного направления).

Почва – дерново-подзолистая среднесуглинистая на карбонатном моренном суглинке. Приводораздельная часть склона – 2–3° и нижняя часть склона – 5–7°. Содержание физической глины 32–34%. Агрохимическая характеристика пахотных слоев почв этих участков склона: рН_{KCl} 5.7 и 6.1, H_T – 1.18 и 0.8 мг-экв/100 г почвы, содержание

Таблица 2. Потоки и баланс азота удобрения при выращивании сортов ячменя на различных элементах рельефа в зависимости от способа внесения азотного удобрения

Вариант	Использовано растениями		Иммобилизовано в слое 0–100 см почвы		Потери	
	1	2	1	2	1	2
Сорт Носовский						
1-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>0.73</u> 15	<u>0.50</u> 10	<u>1.46</u> 29	<u>0.90</u> 18	<u>2.82</u> 56	<u>3.60</u> 72
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.50</u> 30	<u>1.00</u> 20	<u>1.80</u> 36	<u>1.40</u> 28	<u>1.70</u> 34	<u>2.60</u> 52
2-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>0.90</u> 18	<u>0.60</u> 10	<u>1.05</u> 21	<u>0.95</u> 19	<u>2.35</u> 47	<u>2.75</u> 55
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.40</u> 28	<u>0.95</u> 19	<u>1.45</u> 29	<u>1.10</u> 22	<u>1.60</u> 32	<u>2.55</u> 51
3-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>0.95</u> 19	<u>0.70</u> 14	<u>1.34</u> 27	<u>0.85</u> 17	<u>2.71</u> 54	<u>3.45</u> 69
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.70</u> 34	<u>1.20</u> 24	<u>1.60</u> 32	<u>1.25</u> 25	<u>1.70</u> 34	<u>2.55</u> 51
Сорт Раушан						
1-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>1.80</u> 36	<u>1.40</u> 28	<u>1.60</u> 32	<u>1.10</u> 22	<u>1.60</u> 32	<u>2.50</u> 50
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>2.05</u> 41	<u>1.80</u> 35	<u>2.00</u> 40	<u>1.45</u> 29	<u>0.95</u> 19	<u>1.80</u> 36
2-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>0.95</u> 19	<u>0.70</u> 14	<u>1.34</u> 27	<u>0.85</u> 17	<u>2.71</u> 54	<u>3.45</u> 69
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.70</u> 34	<u>1.20</u> 24	<u>1.60</u> 32	<u>1.25</u> 25	<u>1.70</u> 34	<u>2.55</u> 51
3-я ротация						
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	<u>0.95</u> 19	<u>0.70</u> 14	<u>1.34</u> 27	<u>0.85</u> 17	<u>2.71</u> 54	<u>3.45</u> 69
Фон + ¹⁵ N50 локально	<u>1.70</u> 34	<u>1.20</u> 24	<u>1.60</u> 32	<u>1.25</u> 25	<u>1.70</u> 34	<u>2.55</u> 51

Примечания. 1. В графе 1 – приводораздельная часть склона (2–3°), 2 – нижняя часть склона (5–7°). 2. Над чертой – азот удобрения, г/м², под чертой – азот удобрения, % от внесенного.

обменных Ca²⁺ – 5.5 и 6.0 мг-экв/100 г почвы и Mg²⁺ – 2.0 и 2.2 мг-экв/100 г почвы, гумуса – 2.1 и 0.8%, N_{общ} – 0.09 и 0.07%, подвижных форм фосфора – 13.7 и 18.7 мг/100 г почвы, калия – 13.8 и 16.7 мг/100 г почвы (по Кирсанову).

Микрополевым опытом (размер делянок 0.5 × 1.0 м) был размещен на склоне ЮВ экспозиции. Длина склона 300 м, повторность четырехкратная, с ¹⁵N – двукратная. Азотное удобрение вносили в дозе 50 кг/га 2-мя способами: вразброс и локаль-

Таблица 3. Потоки азота почвы при выращивании сортов ячменя на различных элементах рельефа, г/м²

Показатель	Приводораздельная часть склона, 2–3°		Нижняя часть склона, 5–7°	
	1	2	1	2
Сорт Носовский				
Вынос азота почвы растениями	6.6	10.8	4.74	6.9
Остаточный минеральный азот	1.8	3.1	0.7	1.0
Иммобилизованный/реимобилизованный азот	13.2	13.0	9.7	8.5
Газообразные потери азота почвы	25.6	12.3	34.1	17.9
Минерализованный азот почвы	52.3	44.1	53.1	40.5
Нетто-минерализованный азот почвы	37.7	29.4	43.6	29.5
Реимобилизованный азот	14.6	14.8	9.4	11.1
Сорт Раушан				
Вынос азота почвы растениями	6.9	11.8	6.1	7.5
Остаточный минеральный азот	1.6	2.8	0.5	0.8
Иммобилизованный/реимобилизованный азот	14.7	13.7	12.6	9.2
Газообразные потери азота почвы	20.6	11.1	26.0	16.2
Минерализованный азот почвы	56.4	50.3	47.2	35.1
Нетто-минерализованный азот почвы	41.8	32.2	38.0	29.5
Реимобилизованный азот	18.2	17.9	16.3	14.7

Примечание. В графе 1 – азот вразброс, 2 – азот локально.

но на глубину 10 см лентой. Защитные полосы между микроделянками – 0.5 м. Обработку почвы – отвальная вспашка и рыхление подпахотного слоя на глубину 10–15 см проводили вручную. Перед закладкой опыта проведено известкование из расчета полной нормы гидролитической кислотности. Норма высева – 5 млн всхожих семян/га. В почве и растительном материале $N_{\text{общ}}$ определяли по методу Кьельдаля–Йодельбауэра. Изотопный анализ азота проводили на масс-спектрометре Delta-V. Потоки азота почвы и параметры устойчивости агрофитоценоза определяли согласно [26–28]. Другие аналитические показатели почвы и растений определяли в лабораториях ВНИИА по общепринятым методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях эрозионного агроландшафта выращиваемые сорта ячменя неодинаково реагировали на азотный режим почвы склона. В течение 3-х ротаций севооборота сорт ячменя Раушан потреблял больше азота удобрения на 25–48% (в среднем на 38%) и на 10–27% (в среднем на 16%) азота почвы по сравнению с сортом Носовский (табл. 1). Засухоустойчивый сорт Раушан наибольшее количество азота удобрения (на 48%)

по сравнению с сортом Носовский потреблял в 1-й ротации севооборота, тогда как азота почвы (на 27%) – во 2-й его ротации.

Вследствие температурно-влажностных различий складывались разные окислительно-восстановительные режимы трансформации азота в почве [2]. Поэтому возделываемые сорта ячменя потребляли неодинаковое количество азота в зависимости от местонахождения на склоне. В условиях дерново-подзолистой почвы потребление ячменем азота снижалось от приводораздельной части склона к его основанию (тальвегу): потребление азота удобрения сортом Носовский – на 36–37, сортом Раушан – на 11–17%, потребление почвенного азота сортом Носовский – на 30–31%, тогда как сортом Раушан – на 9–27% в течение 3-х ротаций севооборота. В верхней части склона сорт Раушан по потреблению азота удобрения превосходил сорт Носовский на 31%, в нижней его части – на 44%, азота почвы – на 13 и 22% соответственно.

Особенностью азотного питания пивоваренного ячменя Раушан было значительное (наибольшее) потребление экстра-азота почвы. Потребление дополнительного количества азота почвы может служить критерием его участия в продукционном процессе и эффективности при-

Таблица 4. Показатели интегральной оценки функционирования агрофитоценоза при выращивании сортов ячменя на различных элементах рельефа

Элемент склона	Способ внесения азотного удобрения	РИ : М, %	Н-М : РИ
Сорт Носовский			
Приводораздельная часть склона, 2–3°	Вразброс	28	2.7
	Локально	34	2.0
Нижняя часть склона, 5–7°	Вразброс	17	5.0
	Локально	27	2.8
Сорт Раушан			
Приводораздельная часть склона, 2–3°	Вразброс	31	2.3
	Локально	36	1.8
Нижняя часть склона, 5–7°	Вразброс	29	2.4
	Локально	32	2.0

Примечание. РИ – реиммобилизованный азот, М – минерализованный азот почвы, Н-М – нетто-минерализованный азот почвы.

мененных азотных удобрений [29–32]. В данных условиях при локальном применении азотного удобрения растения сорта Раушан потребляли до 51–53% азота почвы дополнительно, тогда как растения сорта Носовский – до 49–50%. В целом растения сорта Раушан потребляли на 6% большее количество дополнительного азота по сравнению с сортом Носовский 9.

Локализация азотного удобрения усиливала дополнительное потребление почвенного азота сортом Раушан на приводораздельной части склона в 3.8 раза, в нижней его части – в 1.6 раза, тогда как у сорта Носовский – в 2.4 и в 2.0 раза соответственно.

Иммобилизация является существенным фактором снижения использования азота удобрения различными сортами ячменя и торможения его газообразных потерь на протяжении всех 3-х ротаций севооборота [33–35]. Чем больше азота иммобилизуется, тем меньше его используется растениями и меньше образование газообразных азотсодержащих веществ. В течение 3-х ротаций севооборота сорт Раушан лучше использовал азот удобрения (на 63%), в почве больше (на 12%) его закреплялось и меньше (на 25%) терялось по сравнению с сортом Носовский (табл. 2).

На приводораздельной части склона сорт Раушан на 43% лучше использовал азот удобрения, тогда как на нижней его части – на 75% больше, чем сорт Носовский. При разбросном способе

внесения азотного удобрения растения сорта Раушан использовали на 105% больше азота удобрения, тогда как при локальном способе – на 32% по сравнению с сортом Носовский.

При выращивании сорта Раушан в верхней части склона иммобилизовалось на 10% больше азота удобрения по сравнению с сортом Носовский, тогда как в нижней его части – на 9%. В то же время на приводоразделе (сорт Раушан) терялось на 26% азота удобрения меньше по сравнению с сортом Носовский, тогда как в нижней его части – на 21%.

Под действием азотных минеральных удобрений почвенный азот активно включается в минерализационно-иммобилизационный цикл трансформации азота в почве и участвует в азотном питании различных сортов ячменя [30, 34]. В этих условиях растения сорта Раушан потребляли на 4–29% больше почвенного азота по сравнению с сортом Носовский (табл. 3). Это произошло вследствие того, что при выращивании сорта Раушан в почве иммобилизовалось азота на 9–19% больше, чем при выращивании сорта Носовский, а газообразные потери его снижались на 10–25% соответственно.

Процессы минерализации и нетто-минерализации отражают характер трансформации азота в почве [18, 29]. При выращивании сорта Раушан на приводораздельной части склона минерализовалось на 8–14% азота больше, а на нижней части склона – на 11–14% меньше, чем под сортом Носовский. При этом доля нетто-минерализованного азота почвы достигала у обоих сортов 72–75%. Доля нетто-минерализованного азота возрастала от приводораздельной части склона от 66–71% до 72–81% под сортом Носовский и от 64–75% до 81–83% – под сортом Раушан. К основанию склона реиммобилизация почвенного азота снижалась в нижней части склона: под сортом Раушан – в 1.1–1.2 раза, под сортом Носовский – в 1.3–1.6 раза по сравнению с приводораздельной частью склона.

По показателям интегральной оценки агрофитоценоза сорта Раушан и сорта Носовский в условиях склона функционировали в зоне стресса и в зоне резистентности. Однако в более устойчивом состоянии находился агроценоз сорта Раушан (на 6–11% в приводораздельной части склона и на 18–70% в нижней его части) (табл. 4). В нижней части склона агрофитоценоз находился в менее устойчивом состоянии: сорта Носовский – на 21–39, сорта Раушан – на 7–11%. Локализация азотного удобрения повышала устойчивость агрофитоценоза: сорта Носовский – на 21–59, сорта Раушан – на 10–16%.

Таблица 5. Урожай зерна сортов ячменя в зависимости от элемента рельефа и способа внесения азотного удобрения, г/м²

Вариант	Сорт		Прибавка	
	Раушан	Носовский	г/м ²	%
1-я ротация				
Приводораздельная часть склона, 2–3°				
Р50К50 (фон)	270	240	30	12
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	392	330	62	19
Фон + ¹⁵ N50 локально	530	457	144	16
Нижняя часть склона, 5–7°				
Р50К50 (фон)	262	225	37	16
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	376	305	71	23
Фон + ¹⁵ N50 локально	469	386	83	21
2-я ротация				
Приводораздельная часть склона, 2–3°				
Р50К50 (фон)	205	190	15	8
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	344	309	35	11
Фон + ¹⁵ N50 локально	490	430	60	14
Нижняя часть склона, 5–7°				
Р50К50 (фон)	174	135	39	29
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	324	254	70	28
Фон + ¹⁵ N50 локально	393	297	96	32
3-я ротация				
Приводораздельная часть склона, 2–3°				
Р50К50 (фон)	190	184	6	3
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	339	301	38	13
Фон + ¹⁵ N50 локально	460	401	59	15
Нижняя часть склона, 5–7°				
Р50К50 (фон)	140	131	9	7
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	264	238	26	11
Фон + ¹⁵ N50 локально	347	301	46	15
		Сорт Носовский	Сорт Раушан	
1-я ротация	<i>HCP</i> = 28 г/м ² , <i>P</i> = 3.0%		<i>HCP</i> = 28 г/м ² , <i>P</i> = 2.0%	
2-я ротация	<i>HCP</i> = 24 г/м ² , <i>P</i> = 3.6%		<i>HCP</i> = 28 г/м ² , <i>P</i> = 2.7%	
3-я ротация	<i>HCP</i> = 25 г/м ² , <i>P</i> = 3.8%		<i>HCP</i> = 28 г/м ² , <i>P</i> = 3.1%	

При более устойчивом функционировании и активном участии азота удобрения и азота почвы в продукционном процессе сорт ячменя Раушан формировал урожай зерна на 16% больше, чем сорт Носовский на всех элементах рельефа в течение 3-х ротаций севооборота (табл. 5). Сорт Раушан в 1-й ротации (сухой период вегетации) формировал урожай зерна на 18% больше, чем сорт Носовский, во 2-й ротации (оптимальный период вегетации) – на 20%, в 3-й ротации (влажный пе-

риод вегетации растений) – на 11% по сравнению с сортом Носовский.

Наибольший урожай зерна (530 г/м²) пивоваренный (более засухоустойчивый) сорт ячменя Раушан формировал в 1-й ротации севооборота на приводораздельной части склона при локальном применении азотного удобрения, что было на 16% больше, чем сорта Носовский. Урожай зерна снижался от приводораздельной части склона к его основанию: сорта Носовский – на

Таблица 6. Содержание сырого белка в зерне сортов ячменя при выращивании на различных элементах рельефа, % на сухое вещество

Вариант	Сорт Носовский	Сорт Раушан	Прибавка, ±
1-я ротация			
Приводораздельная часть склона, 2–3°			
P50K50 (фон)	7.9	10.4	7.8
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	8.7	11.3	2.6
Фон + ¹⁵ N50 локально	10.3	12.8	2.5
Нижняя часть склона, 5–7°			
P50K50 (фон)	6.1	7.8	1.7
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	7.8	8.7	0.9
Фон + ¹⁵ N50 локально	8.5	9.2	0.7
2-я ротация			
Приводораздельная часть склона, 2–3°			
P50K50 (фон)	7.8	9.8	2.0
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	8.6	10.7	2.1
Фон + ¹⁵ N50 локально	8.9	11.0	2.1
Нижняя часть склона, 5–7°			
P50K50 (фон)	6.1	7.2	1.1
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	7.2	8.5	1.3
Фон + ¹⁵ N50 локально	8.4	9.0	0.6
3-я ротация			
Приводораздельная часть склона, 2–3°			
P50K50 (фон)	7.3	8.8	1.5
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	8.0	9.6	1.6
Фон + ¹⁵ N50 локально	8.8	10.5	1.7
Нижняя часть склона, 5–7°			
P50K50 (фон)	6.0	7.0	1.0
Фон + ¹⁵ N50 вразброс	7.1	8.2	1.1
Фон + ¹⁵ N50 локально	7.5	8.7	1.2

27, сорта Раушан – на 18%. При локальном способе внесения азотного удобрения урожай зерна повышался: сорта Носовский – на 30, сорта Раушан – на 32%.

Азотные минеральные удобрения с неоднозначной эффективностью действуют на накопление белков в зерне различных сортов ячменя [36–40]. В течение 3-х ротаций севооборота в зерне сорта Раушан накапливалось на 2.1% сырого белка больше на приводораздельной части склона и на 1.1% на нижней его части по сравнению с сортом Носовский (табл. 6). По мере повышения влажности разница между сортами сокращалась: от 2.5% в 1-й ротации до 1.6% в 3-й ротации на приводораздельной части склона. На нижней части склона она оставалась постоянной в пределах 1.0–1.1%. Содержание белков в зерне снижалось от приводораздельной части склона к его основанию: у сорта Носовский – на 1.2, у сорта Раушан –

на 2.2%. Под действием локального способа внесения азотного удобрения содержание белков в зерне повышалось: у сорта Носовский – на 1.1, у сорта Раушан – на 2.2%.

В условиях нижней части склона в течение длительного времени (15 лет) не удалось получить зерно различных сортов ячменя с пивоваренными свойствами (в т.ч. с содержанием сырого белка 9–12%) [36, 39]. Причиной тому были агробиологические условия (пониженная освещенность и температура, повышенная влажность воздуха и почвы), а также недостаточная обеспеченность почвы азотом, высокие потери азота от водной эрозии и в виде газообразных соединений [2, 41, 42]. Поэтому зерно ячменя, полученное в нижней части склона, можно было использовать только в качестве фуражного для кормов сельскохозяйственных животных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что наиболее остро генотипическая реакция сортов ячменя была выражена в условиях эрозионного агрофитоценоза вследствие интенсификации минерализационно-иммобилизационного и миграционного потоков азота в системе почва–растение.

В течение 3-х ротаций севооборота растения сорта Раушан потребляли на 38% больше азота удобрения и на 16% больше азота почвы. На приводораздельной части склона ячмень сорта Раушан потреблял больше на 31% азота удобрения и на 13% азота почвы; в нижней части склона – на 44 и 27% соответственно. При локальном применении азотного удобрения сорт Раушан потреблял на 6% больше азота удобрения по сравнению с сортом Носовский. Сорт Раушан на приводораздельной части склона на 43% лучше использовал азот удобрения, а на нижней части склона – на 75%.

На 9–10% больше азота удобрения иммобилизовалось и на 21–26% меньше его терялось при выращивании сорта Раушан по сравнению с сортом Носовский. Это обеспечивало более (на 6–70%) устойчивое функционирование его агроценоза. Сорт Раушан формировал урожай зерна на 16% больше, чем сорт Носовский на дерново-подзолистой почве склона в течение 3-х ротаций севооборота. В зерне сорта Раушан накапливалось на 2.1% сырого белка больше (на приводораздельной части склона) и на 1.1% больше (на нижней части склона), чем в зерне сорта Носовский. Получить зерно ячменя с пивоваренными свойствами на нижней части склона не удалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е.* Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 239 с.
2. *Проценко Е.П., Караулова Л.Н.* Влияние природных и агрогенных факторов на режим азота и биологическую продуктивность сельскохозяйственных культур в склоновом рельефе ЦЧЗ // *Агрохимия*. 2007. № 4. С. 37–45.
3. *Цыбулько Н.Н., Черныш А.Ф., Жукова И.И.* Азотный фонд дерново-подзолистых почв различной степени эродированности и потери азота в процессе водной эрозии // *Агрохимия*. 2013. № 2. С. 3–10.
4. *Glendining M.J., Paulton P.R., Powlson D.S.* Availability of the residual nitrogen from a single application of ¹⁵N-labeled fertilizer to subsequent crops in a long-term continuous agroecosystem // *Plant and Soil*. 2001. V. 233. № 2. P. 231–239.
5. *Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Воробьев Н.И.* Использование математического анализа для оценки микробиологического состояния почв агроландшафта опыта // *Агрохимия*. 2001. № 1. С. 19–33.
6. *Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Орлова О.В.* Микробное сообщество и анализ почвенно-микробиологических процессов в дерново-подзолистой почве // *Почвоведение*. 2016. № 3. С. 320–332.
7. *Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К.* Диагностика здоровья и качества почвы // *Агрохимия*. 2011. № 12. С. 4–20.
8. *Shimel J.P., Bennett J.* Nitrogen mineralization: challenges of a changing // *Ecology*. 2004. V. 85. P. 591–602.
9. *Руделев Е.В.* Трансформация азота почвы и азота удобрений // *Агрохимия*. 1989. № 4. С. 113–123.
10. *Руделев Е.В.* Трансформация азота удобрений и почвы на типичном черноземе разной степени эродированности // *Бюл. ВИУА*. 1991. № 104. С. 31–40.
11. *Шмырева Н.Я., Соколов О.А., Завалин А.А., Литвинский В.А.* Баланс азота удобрений при выращивании различных сортов ячменя на склоне // *Плодородие*. 2014. № 3. С. 9–11.
12. *Ивашикина Н.В., Соколов О.А.* Физиологические и молекулярные механизмы поглощения нитрата растениями // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 80–92.
13. *Назарюк В.М.* Эколого-агрохимические и генетические проблемы регулируемых агроэкосистем. Новосибирск: СО РАН, 2007. 240 с.
14. *Гамзикова О.И.* Этюды по физиологии, агрохимии и генетике минерального питания растений. Новосибирск: Агрос, 2008. 372 с.
15. *Соколов О.А., Амелин А.А., Козлов М.Я., Кириковой Я.Т.* Модель поведения минерального азота в почве // *Почвоведение*. 1995. № 1. С. 56–62.
16. *Nyborg M., Henning A.M.F.* Field experiments with different placement of fertilizers for barley, flax and rape seeds // *Soil Sci*. 2019. V. 59. № 1. P. 73–79.
17. *Chen S., Svane S.F., Thorup-Kristensen K.* Testing deep placement of an ¹⁵N tracer as a method for in situ deep root phenotyping of wheat, barley and ryegrass // *Plant Methods*. 2019. V. 15. P. 148–157.
18. *Guan Z., Huang B., Liu C.* Effects of ryegrass amendments on immobilization and mineralization of nitrogen in a plastic shed soil: a ¹⁵N tracer study // *Catena*. 2021. V. 203. 105325.
19. *Дмитриев Н.Н., Гамзиков Г.П.* Систематическое применение удобрений как фактор стабилизации плодородия серых лесных почв и продуктивности зерновых культур в зернопаровом севообороте // *Агрохимия*. 2015. № 2. С. 3–12.
20. *Гамзиков Г.П.* Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири // *Плодородие*. 2016. № 5. С. 6–9.
21. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 325 с.
22. *Кореньков Д.А., Безвершенко Н.Г.* Использование природных изотопных эффектов в почвоведении и агрохимии // *Агрохимия*. 1988. № 12. С. 108–118.
23. *Соколов О.А.* Экологические аспекты применения азотных удобрений // *Агрохимия*. 1990. № 1. С. 3–14.
24. *Кореньков Д.А.* Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Колос, 1999. 296 с.
25. *Smith C.J., Chalk P.M.* The residual value of fertilizers N in crop sequences: an appraisal of 60 years of research using ¹⁵N tracer // *Field Crops Res*. 2018. V. 217. P. 66–74.

26. Турчин Ф.В. Использование азотных удобрений урожаем и его превращение в почве // Журн. ВХО. 1965. Т. 10. № 4. С. 400–401.
27. Fried M., Dean J. A concept concerning the measurement of available soil nutrients // Soil Sci. 1952. V. 73. № 4. P. 263–271.
28. Помазкина Л.В. Агрохимия азота в таежной зоне Прибайкалья. Новосибирск: СО Наука, 1985. 176 с.
29. Семенов В.М. Образование “экстра” азота в удобренных почвах и его роль в питании растений // Агрохимия. 1999. № 8. С. 5–12.
30. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 1. С. 78–96.
31. Figueiredo C.C., Wickert E.G., Neves H.C.V. Sewage sludge biochar increases nitrogen fertilizer recovery: Evidence from a ¹⁵N tracer field study // Soil Use Manag. 2021. V. 37. P. 689–697.
32. Chalk P., Smith C. On inorganic N uptake by vascular plants: can ¹⁵N tracer techniques resolve the NH₄⁺ and NO₃⁻ preference conundrum // EJSS. 2021. V. 72. P. 1762–1779.
33. Семенов В.М., Козут Б.М., Лукин С.М. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 3. С. 19–31.
34. Chalk P.M., Jnacio C.T., Chen D. An overview of contemporary advances in the usage of ¹⁵N natural abundance as a tracer of agroecosystem N cycle processes that impact environment // Agr. Ecosyst. Environ. 2012. V. 283. 106570.
35. Lama S., Kuhn T., Lehmann M.F. The biodiversity – N cycle relationship: a ¹⁵N tracer experiment with soil from plant, mixtures of varying diversity of model N pool sizes and transformation rates // Biol. Fert. Soils. 2020. V. 56. P. 1047–1061.
36. Лана В.В., Босак В.Н. Влияние доз и сроков внесения азотных удобрений на урожай и качество зерновых культур на высококультурной дерново-подзолистой суглинистой почве // Агрохимия. 2001. № 12. С. 29–34.
37. Смирнов А.П., Садовская Э.Н., Стокозов И.П. Изучение условий питания новых сортов ячменя // Агрохим. вестн. 2010. № 3. С. 19–22.
38. Войтович Н.В., Ерошенко Н.А. Влияние технологии возделывания на урожайность и качество зерна пивоваренного ячменя // Агрохим. вестн. 2011. № 5. С. 9–11.
39. Кузьмич М.А., Политыко П.М., Артюхова О.А. Качество зерна сортов ячменя в зависимости от доз минеральных удобрений // Агрохим. вестн. 2019. № 6. С. 34–37.
40. Ottman M.J. Nitrogen fertilizer requirement of feed and malting barley compared to wheat. Forage and Grain // College Agricult. Life Sci. Rep. 2011. P. 30–36.
41. Явтушенко В.Е., Шмырева Н.Я., Цуриков Л.Н. Баланс и трансформация азота удобрений в эродированной дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1367–1375.
42. Смирнова Л.Г., Нецветаев В.П., Михайленко И.И. Урожайность сортов и качество зерна озимой пшеницы в условиях склоновой микрозональности // Агрохимия. 2014. № 7. С. 38–44.

Nitrogen in the Nutrition of Different Varieties of Barley under Slope Conditions (Long-Term Studies with ¹⁵N)

A. A. Zavalin^{a, #}, N. Ya. Shmyreva^a, D. A. Sokolov^b, and O. A. Sokolov^a

^aAll-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

^bInstitute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science
ul. Institutskaya 2, Pushchino 142290, Russia

[#]E-mail: zavalin.52@mail.ru

In a long-term microfield experiment (15 years, 5-field crop rotation) on sod-podzolic eroded soil (Smolensk region), the reaction of 2 barley varieties (Raushan – brewing drought-resistant variety and Nosovsky – grain-fodder variety) to the technology of using nitrogen fertilizer labeled ¹⁵N was studied. It was found that the malting barley variety Raushan used fertilizer nitrogen better (by 38%) and consumed soil nitrogen more (by 16%) compared to the Nosovsky variety. On the watershed part of the slope, the Raushan variety consumed nitrogen fertilizers by 31% more, in its lower part – by 44%, and soil nitrogen – by 13 and 22%, respectively, compared with the Nosovsky variety. When growing the Raushan variety on a slope in sod-podzolic soil, fertilizer nitrogen was immobilized by 9–10% more, and it was lost by 21–26% less compared to the Nosovsky variety. The agrophytocenosis of the Raushan variety functioned in a more stable state (by 6–11% on the watershed and by 18–70% in the lower part of the slope) than the agrophytocenosis of the Nosovsky variety. On all elements of the relief, the Raushan variety formed a grain yield 16% more than the Nosovsky variety. In the grain of the Raushan variety, raw protein accumulated 2.1% more on the dividing part of the slope, and 1.1% more on the lower part compared to the Nosovsky variety. In the lower part of the slope for a long time it was not possible to obtain barley grain with brewing properties.

Key words: relief elements, soil erosion, crop rotation, nitrogen isotope ¹⁵N, fertilizer nitrogen flows and balance, soil nitrogen flows, stability, variety productivity, crude protein content.