

УДК 631.811.3:631.559:631.416.4:631.421.1(571.14)

## БАЛАНС КАЛИЯ, УРОЖАЙНОСТЬ КУЛЬТУР И КАЛИЙНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ В ДЛИТЕЛЬНОМ ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ В ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2019 г. В. Н. Якименко

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 8/2, Россия*

*E-mail: yakimenko@issa.nsc.ru*

Поступила в редакцию 27.03.2019 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 10.07.2019 г.

В длительном полевом опыте на серой лесной почве лесостепи Западной Сибири изучено действие возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NP) на продуктивность выращиваемых культур и потребление ими калия. Показана специфика изменения калийного состояния почвы в зависимости от интенсивности баланса калия в агроценозе. Предложены градации обеспеченности калием региональных пахотных почв.

*Ключевые слова:* баланс калия, урожайность, калийное состояние почвы, длительный полевой опыт, лесостепь, Западная Сибирь.

**DOI:** 10.1134/S0002188119100156

### ВВЕДЕНИЕ

Калий относится к важнейшим элементам минерального питания растений, благоприятный калийный режим в агроценозах является одним из обязательных условий их эффективного функционирования [1, 2]. Однако использование калийных удобрений в земледелии Западной Сибири перманентно находится на минимальном уровне. Даже в период наибольших масштабов химизации отечественного земледелия (1981–1990 гг.), когда среднегодовое применение минеральных удобрений составляло в среднем в регионе НРК50–70, доза вносимых калийных удобрений была не больше K5–10. Интенсивность баланса калия в земледелии Западной Сибири в этот период не превышала 35%, несмотря на получаемую в среднем в регионе довольно низкую урожайность культур: зерновых – 12–13, картофеля – 85 ц/га. В настоящее время калийные удобрения в западно-сибирском земледелии практически не применяют – при средней дозе вносимых удобрений 5 кг/га, доля калия в общей структуре составляет 2–3% [3].

Оправданием для невнимания к регулированию режима калия в агроценозах всегда служило, как правило, высокое валовое содержание этого элемента в основных пахотных почвах, с одной

стороны, и слабый эффект от вносимых калийных удобрений в ряде проведенных опытов, с другой.

Действительно, автоморфные почвы, составляющие основу пахотного фонда земледельческой зоны Западной Сибири, содержат значительные количества валового калия. Это обусловлено богатством подстилающих почвообразующих пород как первичными (полевые шпаты, слюды), так и вторичными (гидроslюды) калийсодержащими минералами. В среднем содержание общего калия в пахотном горизонте составляет (%): в супесчаных почвах – 0.9–1.1, легкосуглинистых – 1.1–1.3, среднесуглинистых – 1.3–1.6, тяжелосуглинистых – 1.5–1.8 [3, 4]. Однако валовое количество калия в почве не характеризует условия калийного питания растений и может рассматриваться лишь в качестве самого общего ориентира резервов элемента. Подавляющая часть общего калия (75–95%) входит в кристаллическую структуру минералов с каркасным типом решетки (полевые шпаты) и практически недоступна растениям. Неоднократно было показано отсутствие корреляционной связи между содержанием в почвах валового калия и его легкоподвижных форм [4–6].

Тем не менее, выполненный нами анализ западно-сибирских работ, свидетельствующих об

отсутствии или низкой эффективности внесения калия, показал, что большинство опытов были краткосрочными, а дозы удобрений и урожайность – невысокими; чаще всего выращивали яровую пшеницу [3]. Сделанные при таких условиях выводы о нецелесообразности использования калия являются, очевидно, недостаточно обоснованными. Вместе с тем в имеющихся длительных исследованиях, выполненных в различных регионах, четко выявлено возрастающее во времени значение калия для устойчивого и эффективного функционирования агроценозов [1–3, 6–9].

Реальную картину обеспеченности растений калием дает содержание в почве обменной и необменной форм этого элемента. Изменение содержания форм калия в почвах агроценозов при различной интенсивности калийного баланса, связь этих показателей с продуктивностью выращиваемых культур изучали в ряде работ [8–16]. В целом можно констатировать неоднозначность складывающегося калийного состояния почв в различных исследованиях, что, очевидно, обусловлено действием совокупности факторов, прежде всего почвенно-климатических условий и степени нагрузки на почву (уровня применения агротехники и сортов выращиваемых культур). В этой связи, учитывая нарастающее истощение пахотных почв в отношении калия, выявление региональной специфики изменения калийного статуса почв в агроценозах, влияния баланса калия на продуктивность выращиваемых культур и почвенное плодородие представляется актуальным.

Цель работы – в многолетнем стационарном полевом опыте изучить влияние интенсивности калийного баланса в агроценозе на продуктивность культур, потребление ими калия и калийное состояние почвы.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования зависимости калийного состояния почвы и урожайности сельскохозяйственных культур от интенсивности баланса калия в агроценозе проводят в стационарном полевом опыте, заложенном в 1988 г. на исходно целинной серой лесной среднесуглинистой почве со следующими характеристиками: содержание гумуса – 4.9%, физической глины – 30.8%, емкость катионного обмена – 21.1 мг-экв/100 г, валовое содержание азота – 0.22, фосфора – 0.15 (подвижного – 18 мг/100 г), калия – 1.5% (обменного – 12, необменного – 120 мг/100 г), почвообразующая порода – лессовидный карбонатный суглинок. Опыт расположен на научно-исследовательской станции ИПА

СО РАН в лесостепной зоне юга Западной Сибири (Новосибирская обл., Искитимский р-н). В опыте сначала провели 3 ротации овощного севооборота (капуста–томат–лук–морковь), с 2000 г. выращивали картофель в монокультуре. Учитывали и отчуждали с делянок как основную, так и побочную продукцию выращиваемых культур.

Схема опыта включала следующие варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – NP (фон – вносили азотные и фосфорные удобрения из расчета 100%-ной компенсации выноса элементов планируемым урожаем выращиваемой культуры), 3 – NP + K<sub>25%</sub> (калий в дозе 25% от выноса планируемым урожаем), 4 – NP + K<sub>50%</sub>, 5 – NP + K<sub>75%</sub>, 6 – NP + K<sub>100%</sub>, 7 – NP + K<sub>125%</sub>. Кроме этого, имеется вариант непрерывного пара (без растений и удобрений). Повторность в опыте четырехкратная. Удобрения в форме N<sub>аа</sub>, P<sub>сд</sub> и K<sub>х</sub> вносили ежегодно весной перед посевом семян, высадкой рассады или клубней. Конкретные дозы удобрений под различные культуры опубликованы ранее [3].

Почвенные образцы на анализ отбирали во время уборки урожая. Содержание форм калия в почве определяли: обменного – в вытяжке 1 М раствором CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>, необменного – в 1 М HNO<sub>3</sub>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация калийного режима в агроценозе положительно отразилась на урожайности всех выращиваемых культур (табл. 1). В целом эффективность внесения калия (на фоне NP) зависела от длительности использования участка почвы и биологических особенностей выращиваемой культуры. В первые годы сельскохозяйственного использования исходно плодородной почвы различия в продуктивности культур между разными вариантами были невеликими. Однако по мере истощения почвенных запасов легкодоступного растениям калия (2-я, а особенно 3-я ротация севооборота) относительная прибавка урожайности овощных культур от внесения калийных удобрений прогрессивно увеличивалась.

Различные культуры обладали неодинаковой способностью использовать имеющиеся почвенные калийные запасы. По степени отзывчивости на внесение калийных удобрений культуры овощного севооборота можно расположить в следующей убывающей последовательности: томат, капуста, морковь, лук. Капуста и томат достаточно хорошо усваивали почвенный калий. Эти растения положительно отзывались на одностороннее применение NP-удобрений и при сильноде-

**Таблица 1.** Средняя урожайность культур в опытах (1988–2017 гг.), т/га

Вариант	Культура				
	капуста	томат	лук	морковь	картофель
Без удобрений	85	35	17	60	10
NP	106	49	18	57	12
NPК <sub>25%</sub>	111	54	20	69	18
NPК <sub>50%</sub>	113	56	21	72	24
NPК <sub>75%</sub>	116	57	22	74	26
NPК <sub>100%</sub>	117	60	20	77	27
NPК <sub>125%</sub>	122	62	20	78	28

Примечание. Средняя урожайность овощных культур за 3 ротации севооборота, картофеля – за 18 лет монокультуры.

фицитном калийном балансе; тем не менее, прибавка их урожайности от дополнительного внесения калия закономерно увеличивалась во времени. Способность таких культур как лук и морковь использовать калий почвы при прогрессирующем истощении его запасов, была весьма ограниченной, поэтому различия в их урожайности в вариантах контроль и NP были несущественными. Особенно значительный рост урожайности от внесения калийных удобрений отмечали при выращивании монокультуры картофеля после 3-х ротаций овощного севооборота. Для картофеля содержание в почве калия в вариантах с его длительным сильнодефицитным балансом стало основным лимитирующим фактором; в этом случае внесение только NP-удобрений практически не влияло на продуктивность растений по сравнению с контрольным вариантом.

Сопоставляя урожайность всех культур в опытах, можно полагать, что для агроценозов на исследованной почве наиболее целесообразным является использование калийных удобрений в дозах, на 70–80% компенсирующих вынос этого элемента планируемым урожаем культур. Допустимость и оправданность слабодифицитного баланса калия в севооборотах отмечена и ранее [2, 3, 8], в целом величина оптимального баланса определяется продуктивностью агроценоза и калийным состоянием почвы [3].

Содержание калия в растениях зависело от уровня минерального питания и биологических особенностей культуры (табл. 2). Увеличение доз вносимых калийных удобрений повышало содержание калия в биомассе всех выращиваемых растений. Однако у томата и капусты повышение содержания калия в растениях и рост урожайности шли прямо пропорционально увеличению доз калийных удобрений (в изученных пределах), т.е. дополнительно внесенный калий эффективно расходовался на формирование биомассы. В то же время у моркови, лука, картофеля рост доз удобрений (в вариантах NPК<sub>75%</sub>–NPК<sub>125%</sub>) приводил к увеличению содержания калия в надземной биомассе в 1.5–2.0 раза, однако их продуктивность возрастала незначительно или даже снижалась, что свидетельствовало о большом непроизводительном расходе этого элемента.

Исследования показали, что культуры, хорошо усваивающие почвенный калий (капуста, томат), обладали высокой способностью стабилизировать поступление этого элемента в свой организм при различной калийной обеспеченности агроценоза. Регуляторные механизмы растений, слабо мобилизующих относительно истощенные

**Таблица 2.** Среднее содержание калия в основной и побочной продукции выращиваемых культур, % от сухого вещества

Вариант	Культура									
	капуста		томат		лук		морковь		картофель	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Без удобрений	1.96	1.33	3.04	1.28	0.67	0.96	0.86	0.89	1.32	0.76
NP	1.94	0.99	2.79	0.98	0.71	0.76	1.03	0.92	1.15	0.51
NPК <sub>25%</sub>	2.04	1.12	3.21	0.95	0.77	1.07	1.12	1.12	1.22	0.67
NPК <sub>50%</sub>	2.13	1.28	3.25	1.08	0.84	1.67	1.37	1.39	1.34	0.85
NPК <sub>75%</sub>	2.14	1.38	3.40	1.19	0.96	2.12	1.68	1.74	1.52	1.15
NPК <sub>100%</sub>	2.21	1.64	3.48	1.21	1.08	2.44	1.83	2.06	1.75	1.35
NPК <sub>125%</sub>	2.51	1.65	3.62	1.33	1.04	2.70	2.09	2.49	1.90	1.77

Примечание. В графе 1 – основная продукция, 2 – побочная, соответственно: капуста – кочан и листья, томат – плоды и ботва, лук – луковича и листья, морковь – корнеплод и листья, картофель – клубни и ботва.

**Таблица 3.** Среднее потребление калия культурами в длительном полевом опыте, кг/т основной продукции (с учетом побочной)

Вариант	Культура				
	капуста	томат	лук	морковь	картофель
Без удобрений	2.4	2.2	1.4	0.9	3.7
NP	2.0	2.0	1.6	0.9	3.0
NPК <sub>25%</sub>	2.3	2.5	1.8	1.1	3.0
NPК <sub>50%</sub>	2.3	2.6	2.1	1.2	3.6
NPК <sub>75%</sub>	2.4	2.8	2.6	1.4	4.2
NPК <sub>100%</sub>	2.6	3.0	2.9	1.7	4.8
NPК <sub>125%</sub>	2.6	3.1	3.4	1.7	5.4

калийные запасы почвы (лук, морковь, картофель), были гораздо менее эффективными: такие культуры плохо адаптировались к изменяющемуся уровню минерального питания – количество калия в их биомассе в различных вариантах опыта могло отличаться в несколько раз. Содержание калия в генеративных органах растений варьировало в гораздо меньшей степени, чем в вегетативных, поэтому избыточное потребление элемента рядом культур было связано с его существенным депонированием прежде всего в вегетативных органах [3].

Расчетные коэффициенты использования калия удобрений отдельными культурами составили: капуста – 28–40, томат – 50–80, лук – 20–28, морковь – 50–60, картофель – 57–60%. По мере увеличения доз калийных удобрений коэффициент использования калия снижался.

Эффективность использования растениями калия при различной им обеспеченности может быть оценена по удельным затратам этого элемента на формирование биомассы. Средние за время проведения полевого опыта данные по потреблению калия сельскохозяйственными культурами на создание единицы продукции показаны в табл. 3.

В качестве образца рационального использования калия почвы и удобрений может быть представлена капуста. При всех изучавшихся уровнях калийного питания удельный расход этого элемента капустой был практически одинаков: дополнительно внесенный калий обеспечивался соответствующим приростом биомассы. Лишь при значительном несбалансированном повышении уровня азота в почве (вариант NP) потребление калия на создание единицы продукции немного снизилось; почвенные запасы этого элемента не

позволили капусте поддерживать оптимальное соотношение N : K в биомассе.

Характер изменения удельного потребления калия при различных уровнях минерального питания моркови и лука существенно отличался от капусты. Внесение NP-удобрений никак не отражалось на потреблении ими калия из почвенных запасов. При дополнительном использовании возрастающих доз калия его удельный расход луком и морковью возрастал почти в 2 раза; увеличение урожайности этих культур не было соответствующим, т.е. повышенные дозы калийных удобрений вызывали избыточное, непродуктивное потребление этого элемента.

Внесение азотно-фосфорных удобрений под картофель при сильнодефицитном калийном балансе заметно снижало потребление калия этой культурой (с 3.7 до 3.0 кг/т клубней). Сбалансированные дозы минеральных удобрений существенно повышали урожайность и оптимизировали удельный расход калия на уровне 3.8–4.2 кг/т клубней, характерном для неудобрявшейся плодородной почвы. Высокие дозы калийных удобрений приводили к непроизводительному расходу калия картофелем прежде всего из-за избыточного накопления этого элемента в ботве.

Исследования показали, что для создания высокого урожая практически всем культурам требовались значительные количества калия, которые, очевидно, далеко не всегда можно получить из почвенных запасов. Капуста выносила в среднем в вариантах опыта от 200 до 350, томат – 80–200, морковь – 90–260, картофель – 90–290 кг K<sub>2</sub>O/га. Сравнительно небольшой вынос калия луком (16–35 кг/га) осложнялся высокой требовательностью данной культуры к легкодоступным формам этого элемента, в связи с невысокой, очевидно, способностью корневой системы лука усваивать почвенный калий. Следует отметить, что в общем выносе калия культурами на долю их основной (товарной) продукции приходилось 70–80%.

Расчет фактического калийного баланса в нашем полевом опыте проведен на основе сопоставления поступления калия с удобрениями и его выноса основной и побочной продукцией выращиваемых культур (табл. 4). Некомпенсируемый вынос калия в опыте (варианты контроль и фон) в среднем за 30 лет его проведения составил 63–65 кг/га/год, хотя в первые 12–14 лет он доходил до 100–120 кг/га/год. В последние годы в контрольном и фоновом вариантах картофель мог поглощать из почвенных запасов только ≈30 кг K<sub>2</sub>O/га/год, что было явно недостаточно для пол-

**Таблица 4.** Общая урожайность культур и баланс калия в полевом опыте за 1988–2017 гг.

Вариант	Урожайность, ц к.е./га	Калий, кг/га		
		Поступление с удобрениями	Вынос урожаем	Баланс
Без удобрений	1930	–	1890	–1890
NP	2260	–	1960	–1960
NPК <sub>25%</sub>	2830	1450	2630	–1180
NPК <sub>50%</sub>	3250	2910	3300	–390
NPК <sub>75%</sub>	3330	4360	3870	+500
NPК <sub>100%</sub>	3520	5820	4360	+1460
NPК <sub>125%</sub>	3650	7270	5210	+2060

ноценного питания растений. Очевидно, что большие потери калия почвы за время проведения ротаций овощного севооборота привели к истощению его почвенных запасов, что отчетливо отразилось как на последующей монокультуре картофеля, так и на калийном состоянии почвы.

При внесении возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NP), с соответствующим повышением приходной составляющей баланса калия увеличивалась и расходная его часть. Это было связано как с повышением продуктивности выращиваемых культур по мере оптимизации их минерального питания, так и в ряде случаев с избыточным, “лишним” накоплением калия в растительной продукции. Тем не менее, относительный дефицит баланса закономерно снижался. Фактический практически нулевой баланс сформировался в варианте NPК<sub>75%</sub>, в вариантах NPК<sub>100%</sub> и NPК<sub>125%</sub> баланс складывался с профицитом. В данных вариантах “сверхнормативный” калий увеличивал почвенные запасы этого элемента.

Изменение содержания обменного калия в почве различных вариантов опыта за время его проведения показано в табл. 5. Следует отметить, что после начала обработки исходно целинной почвы содержание в ней форм калия заметно возросло (вариант пар), видимо, за счет частичной распаковки почвенных агрегатов и усиления гидrolитических процессов; впоследствии оно стабилизировалось на новом уровне, специфичном для данных условий функционирования почвы. В вариантах, где выращивали культуры при различном уровне их калийного питания, изменения содержания форм калия в почве ожидаемо произошли в соответствии с поддерживаемым балансом элемента в агроценозах: при сильнодефицитном балансе калия уровень его содержания в поч-

ве существенно снизился, а при положительном – заметно возрос.

Содержание обменного калия в почве вариантов применения калийных удобрений зависело от внесенных доз. Необходимо отметить, что при регулярном использовании определенных доз калия в разных вариантах опыта содержание в почве его обменной формы в каждом из вариантов относительно стабилизировалось на определенном уровне. Очевидно, это связано с наличием в почве специфичного соотношения между формами калия, сформировавшегося в процессе эволюции почвы.

В почве вариантов с сильнодефицитным балансом калия (контроль, фон) содержание его обменной формы постепенно снизилось до определенного низкого (“минимального”) уровня (7–8 мг/100 г), который впоследствии практически не изменялся, несмотря на продолжавшийся долгие годы сравнительно интенсивный вынос почвенного калия выращиваемыми культурами. Этот

**Таблица 5.** Изменение содержания обменного калия в почве полевого опыта (слой 0–20 см), мг/100 г

Вариант	Годы исследования						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017
Пар	14	16	13	12	13	12	11
Без удобрений	10	9	7	8	8	7	7
NP	11	10	7	8	8	7	8
NPК <sub>25%</sub>	11	10	8	10	10	10	8
NPК <sub>50%</sub>	12	11	9	13	12	13	11
NPК <sub>75%</sub>	13	14	12	13	15	16	13
NPК <sub>100%</sub>	17	17	18	18	26	22	17
NPК <sub>125%</sub>	17	19	26	33	36	27	30
HCP <sub>05</sub>	3	3	5	7	6	5	5

**Таблица 6.** Классификация уровня содержания обменного калия в пахотных почвах лесостепи Западной Сибири по насыщенности им почвенной емкости катионного обмена (ЕКО), %

Уровень содержания	Содержание обменного калия, % от ЕКО	
	по Чирикову	по Масловой
Минимальный	0.6–0.7	0.8–0.9
Неустойчивый	0.8–1.2	1.0–1.4
Оптимальный	1.3–1.8	1.5–2.2
Повышенный	>1.8	>2.2

минимальный уровень обменного калия в почве, очевидно, составляют катионы, интрамицеллярно поглощенные почвенным комплексом и межслоевым пространством глинистых минералов; селективность этих катионов к обменным позициям почвенной матрицы больше, чем усваивающая способность выращиваемых культур. Данное количество обменного калия может быть извлечено из почвы соответствующими химическими экстрагентами, но в питании растений оно, по видимому, не участвует.

Важно подчеркнуть, что зачастую при мониторинге калийного состояния пахотных почв подобная стабильность содержания обменного калия ошибочно оценивается со знаком плюс, как благополучная ситуация, хотя в действительности стабилизация произошла на минимальном уровне, при котором калий для многих культур находится в первом минимуме. При оценке по стандартным градациям “минимальный” уровень обменного калия часто, особенно на относительно тяжелых почвах (средне-, тяжелосуглинистых), трактуется как повышенная или даже высокая обеспеченность почв элементом, с соответствующими выводами о целесообразности применения калийных удобрений.

Реально оценить уровень обменного калия в почве можно только при сопоставлении его (вы-

разив в мг-экв/100 г) с почвенной емкостью катионного обмена (ЕКО). Наши длительные исследования [3, 17, 18] зональных почв Западной Сибири показали, что “минимальный” уровень содержания обменного калия в почвах разного гранулометрического состава имеет различные абсолютные величины, но в относительных величинах – в % от ЕКО – примерно одинаков. Соответствующим образом можно сопоставить и уровни содержания обменного калия в почвах, обеспечивающие благоприятные условия калийного питания растений. В этой связи предложены универсальные градации обеспеченности калием различных автоморфных почв лесостепи Западной Сибири (табл. 6).

Известно, что подвижность обменного калия в почвах, следовательно, и его доступность растениям, тесно зависит (в обратной пропорции) от величины ЕКО и гранулометрического состава почв; поэтому учет данных характеристик при почвенной калийной диагностике является обязательным. Оценка калийного состояния почв с использованием величин их ЕКО в ряде случаев может быть затруднена из-за отсутствия соответствующих данных. Однако каждый землепользователь может определить, как минимум, гранулометрический состав почвы конкретного участка полевым “мокрым” методом по Качинскому (смочить на ладони почву до консистенции теста, попытаться раскатать ее в шнур и т.д.). Зная гранулометрический состав почвы и содержание в ней обменного калия, можно достаточно корректно оценить ее калийное состояние, используя предлагаемые градации (табл. 7).

Выделенные в табл. 7 градации с точки зрения обеспеченности культур почвенным калием имеют следующий смысл:

низкая обеспеченность – при таком содержании обменного калия в почве он находится в “первом минимуме” для культур со слабой способностью к его мобилизации (картофель, морковь и др.); “одностороннее” внесение NP-удоб-

**Таблица 7.** Градации обеспеченности обменным калием зональных почв лесостепи Западной Сибири, мг К<sub>2</sub>O/100 г почвы

Обеспеченность калием	Гранулометрический состав почвы					
	легкосуглинистый		среднесуглинистый		тяжелосуглинистый	
	по Чирикову	по Масловой	по Чирикову	по Масловой	по Чирикову	по Масловой
Низкая	<6	<10	<10	<15	<14	<20
Неустойчивая	6–10	10–15	10–14	15–20	14–18	20–25
Оптимальная	10–14	15–20	14–18	20–25	18–22	25–30
Повышенная	>14	>20	>18	>25	>22	>30

рений под них не дает положительного результата и может вызывать угнетение растений; даже небольшие дозы калийных удобрений резко увеличивают урожайность культур;

неустойчивая — для культур с высокой способностью к усвоению почвенного калия (например, томат) этот элемент не находится в “первом минимуме” даже при “минимальном” уровне обменного калия в почве, однако их продуктивность заметно лимитирована. При данной обеспеченности культур почвенным калием дополнительное его внесение на фоне NP существенно увеличивает урожайность всех культур;

оптимальная — при таком содержании обменного калия в почве использование рациональных доз NP обеспечивает максимальную прибавку урожайности, а дополнительное внесение калийных удобрений малоэффективно;

повышенная — существенное положительное влияние повышенного содержания обменного калия в почве наблюдается только в стрессовых ситуациях (засуха, избыточное увлажнение и т.п.).

Проведенное исследование показало, что динамика содержания обменного калия в почве длительного опыта при различном балансе этого элемента хорошо отражает режим его накопления и плохо — потребления (табл. 5). Стабилизация этого показателя на “минимальном” уровне при сильнодефицитном балансе свидетельствует о существенном участии в питании растений и других форм почвенного калия, не извлекающихся солевыми и слабыми кислотными растворами, т.е. более прочно связанных с минеральным скелетом почв. Поэтому для оценки потенциальных почвенных ресурсов доступного растениям калия целесообразно также определение содержания в почве необменной формы этого элемента.

Содержание необменного калия в почве различных вариантов нашего опыта в зависимости от баланса этого элемента как заметно уменьшилось, так и существенно возросло (табл. 8). В почве контрольного и фонового вариантов содержание обменного калия существенно снизилось по сравнению с целиной (и паром) и стабилизировалось на определенном уровне, несмотря на продолжавшийся ежегодный вынос калия урожаем. По-видимому, содержание обменной формы калия, как и обменной, имеет свой минимальный почвенный уровень, для достижения которого требуется достаточно продолжительное время. Вероятно, необменные катионы, составляющие предполагаемый минимальный уровень, находятся на позициях внутри кристаллитов, проч-

**Таблица 8.** Изменение содержания необменного калия в почве полевого опыта (слой 0–20 см), мг/100 г

Вариант	Годы исследования						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017
Пар	117	124	122	115	120	121	115
Без удобрений	97	92	98	100	95	92	88
NP	100	92	105	108	95	92	88
NPK <sub>25%</sub>	106	95	105	118	110	102	97
NPK <sub>50%</sub>	108	105	117	120	128	121	102
NPK <sub>75%</sub>	119	113	129	125	142	130	118
NPK <sub>100%</sub>	119	121	140	140	148	141	127
NPK <sub>125%</sub>	125	128	156	188	182	172	165
HCP <sub>05</sub>	17	13	12	12	15	14	12

ность связи с которыми препятствует их участию в различных мобилизационных процессах.

В вариантах с регулярным внесением калийных удобрений содержание обменного калия в почве также относительно стабилизировалось в соответствии с поддерживаемым в каждом конкретном варианте калийным балансом. При дефицитном калийном балансе в агроценозе (варианты NPK<sub>25%</sub> и NPK<sub>50%</sub>) почвенный уровень обменного калия не превышал целинный, а при бездефицитном (варианты NPK<sub>100%</sub> и NPK<sub>125%</sub>) — существенно возрастал. Выше отмечали аналогичный характер формирования почвенного уровня содержания обменного калия. Подобная стабилизация содержания форм калия в почве при относительно постоянных условиях функционирования агроценоза подтверждает, на наш взгляд, предположение об устойчивости почвенного соотношения между формами калия [3].

Содержание обменного калия в почвах определяется их гранулометрическим и минералогическим составом (прежде всего, количеством и качеством фракции физической глины). Проведенные исследования показали, что минералогический состав фракции физической глины зональных почв региона примерно одинаков и состоит (в убывающем порядке) из гидрослюд мусковитового типа, хлорита, каолинита, вермикулита и смектита [3]. Абсолютное количество этих минералов в почве, следовательно, и обменного калия, зависит от ее гранулометрического состава (содержания физической глины). В интенсивных агроценозах в зависимости от калийного баланса уровень содержания обменного калия в почве может как заметно снижаться, так и существенно возрастать, отражая условия калийного питания выращиваемых культур. На этой

**Таблица 9.** Градации обеспеченности калием пахотных почв лесостепи Западной Сибири по содержанию необменной формы, мг  $K_2O/100$  г почвы

Обеспеченность калием	Гранулометрический состав почвы		
	легкосуглинистый	среднесуглинистый	тяжелосуглинистый
Неустойчивая	<60	<110	<180
Оптимальная	60–110	110–180	180–250
Повышенная	>110	>180	>250

основе по результатам рассматриваемого многолетнего опыта и других исследований на почвах лесостепи Западной Сибири [3, 17] предложены градации обеспеченности почв калием по содержанию в них необменной формы этого элемента (вытяжка 1 М раствора  $HNO_3$ ) (табл. 9).

Относительное постоянство в течение длительного времени содержания в почве агроценоза наиболее подвижных форм калия при сильном дефиците калийного баланса, очевидно, предполагает заметное участие в питании растений и в поддержании уровня обменного и необменного калия других его форм, не извлекаемых солевыми и разбавленными кислотными вытяжками. Этот приход обеспечивается, видимо, за счет межслоевого калия минералов с листовой структурой (слюд), как энергетически менее устойчивого по сравнению с катионами каркасной решетки (в шпатах). Потребление растениями этой формы калия может осуществляться как непосредственно с занимаемых специфических позиций, так и после его трансформации в другие, более подвижные формы. Можно полагать, что перманентный вынос структурного калия при длительном сильнодефицитном его балансе в агроценозе приведет к значительному изменению состава, следовательно, и свойств почвенных минералов (повышение степени дисперсности, лабильности и др.). Очевидно, что все отмеченные процессы – изменение биогеохимических потоков элемента, существенные преобразования кристаллохимического состава и свойств мелкозема, стимулирующих текстурную дифференциацию почвенного профиля, – негативным образом отразятся на экологической устойчивости почвы и эффективности функционирования агроценозов [3].

Следует отметить, что проведенное ранее исследование изменений содержания форм калия по профилю почвы [19], косвенно свидетельствующих об участии различных почвенных горизонтов в обеспечении выращиваемых культур этим элементом, показало, что длительный сильнодефицитный баланс калия в агроценозе приводил к существенному снижению содержания его обменной и необменной форм главным образом в пахотном слое почвы. Имеющиеся внешне неизменные запасы форм калия в нижележащих гори-

зонтах почвы были не в состоянии полноценно компенсировать истощенный калийный фонд пахотного слоя, что отчетливо проявлялось в значительном уменьшении эффективности продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Перманентная истощающая калийная нагрузка на верхний почвенный (пахотный) слой лишь усиливает деградационные процессы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования подтвердили важное значение оптимизации режима калия для устойчивого и эффективного функционирования агроэкосистем. Показано, что длительный сильно дефицитный баланс калия в агроценозе, связанный с неиспользованием калийных удобрений, обуславливает переход этого элемента в разряд первого минимума, существенно лимитирующего продукционный процесс выращиваемых культур; в то же время сбалансированное минеральное питание обеспечивает стабильное получение высокого урожая.

Интенсивность баланса калия в агроценозе прямо отражается на калийном состоянии почвы, однако используемые стандартные диагностические показатели (содержание обменной, а также необменной формы этого элемента) довольно хорошо демонстрируют режим накопления калия в почве, но плохо – масштабы его потребления. При длительном дефицитном балансе калия содержание в почве его подвижных форм стабилизируется на низком, “минимальном” уровне, несмотря на продолжающийся вынос элемента выращиваемыми культурами. В такой ситуации питание растений, хотя и весьма лимитированное, вероятно, обеспечивается за счет потенциальных запасов калия, катионов, содержание которых не определяется рутинными агрохимическими методами. В этой связи мониторинг плодородия почв в отношении калия следует осуществлять на основе комплексного применения показателей и градаций, характеризующих как наиболее доступные растениям формы калия, так и потенциальные почвенные ресурсы их восполнения; при этом обязателен учет важных, обуславливающих калийный статус, почвенных



свойств — емкости катионного обмена и гранулометрического состава.

Исследование показало, что в интенсивном агроценозе надежды на “неисчерпаемые” запасы калия в почве как в пахотном слое, так включая и нижележащие горизонты, оказываются не совсем состоятельными, тем самым подтверждая отсутствие альтернативы сбалансированному применению минеральных удобрений. Использование калийных удобрений в дозах, компенсирующих вынос элемента урожаем или даже допускающих небольшой дефицит баланса, способствует сохранению плодородия почвы в отношении калия, тем самым существенно улучшая эколого-агрохимическое состояние агроценоза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
2. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
3. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
4. *Середина В.П.* Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.
5. *Важенин И.Г., Карасева Г.И.* О формах калия в почве и калийном питании растений // Почвоведение. 1959. № 3. С. 11–21.
6. *Пчелкин В.У.* Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. 336 с.
7. *Соколов А.В.* Географические закономерности эффективности удобрений. М.: Знание, 1968. 42 с.
8. *Прокошев В.В.* Агрохимия калийных удобрений: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1984. 40 с.
9. *Беляев Г.Н.* Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
10. *Филон И.И., Шеларь И.А.* Содержание калия в черноземе типичном и темно-серой лесной почве при их сельскохозяйственном освоении и длительном применении удобрений // Агрохимия. 1999. № 1. С. 21–27.
11. *Середина Н.А., Лукьянов С.А., Богданов Ф.М., Халиуллин К.З.* Изменение фонда обменного калия в черноземах Южного Урала при их длительном сельскохозяйственном использовании // Агрохимия. 2000. № 1. С. 13–22.
12. *Носко Б.С.* Изменение калийного фонда черноземов при распашке многолетней залежи // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1474–1480.
13. *Демин В.А., Свиридов Д.А.* Влияние различных систем удобрения на содержание форм калия в серой лесной почве // Изв. ТСХА. 1997. Вып. 2. С. 95–99.
14. *Носов В.В., Соколова Т.А., Прокошев В.В., Исаенко М.А.* Изменение некоторых показателей калийного состояния дерново-подзолистых почв под влиянием применения калийных удобрений в длительных опытах // Агрохимия. 1997. № 5. С. 13–19.
15. *Литвак Ш.И., Бабарина Э.А., Никитина Л.В.* Баланс фосфора и калия в длительных опытах на черноземных почвах // Агрохимия. 1991. № 11. С. 8–17.
16. *Тюрникова Е.Г., Титова В.И., Ренжина Е.П., Шафранов О.Д.* Влияние калийных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и калийное состояние почв Нижегородской области // Агротех. вестн. 2011. № 2. С. 10–13.
17. *Якименко В.Н.* Диагностика обеспеченности калием пахотных почв Западной Сибири // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2007. № 4. С. 15–22.
18. *Якименко В.Н.* К вопросу оценки калийного состояния почв агроценозов // Плодородие. 2009. № 4. С. 8–10.
19. *Якименко В.Н.* Изменение содержания форм калия по профилю почвы при различном калийном балансе в агроценозах // Агрохимия. 2007. № 3. С. 5–11.

## Balance of Potassium, Yield and Potash Status of the Soil in Long-Term Field Experiments in Forest-Steppe of Western Siberia

V. N. Yakimenko

*Institute of Soil Science and Agrochemistry*

*Siberian Division, Russian Academy of Science, prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

*E-mail: yakimenko@issa.nsc.ru*

In a long-term field experiment on the gray forest soil of the forest-steppe of Western Siberia, the effect of increasing doses of potassium fertilizers (on the background of NP) on the productivity of cultivated crops and their potassium consumption was studied. The specificity of the change in the potassium state of the soil is shown, depending on the intensity of the potassium balance in the agroценоз. The gradation of potassium availability of regional arable soils are proposed.

*Key words:* balance of potassium, yield, potash status of the soil, long-term field experiments, forest-steppe, Western Siberia.