

## ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КАЛИЯ И МАГНИЯ В ПРОФИЛЕ ПОЧВЫ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОЛЕВОГО ОПЫТА

© 2019 г. В. Н. Якименко

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

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

Поступила в редакцию 28.03.2018 г.

После доработки 03.04.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2018 г.

В многолетнем полевом опыте на серой лесной среднесуглинистой почве лесостепи Западной Сибири показано, что длительный сильный дефицит баланса калия в агроценозе приводил к существенному ухудшению калийного состояния почвы и продуктивности культур. Содержание подвижных форм калия достоверно снизилось в почвенном слое 0–60 см; в пахотном горизонте почвы (0–20 см) содержание обменного калия стабилизировалось на низком уровне (6–7 мг/100 г при 12 мг в исходной целинной почве), оставаясь неизменным в течение многих лет. При бездефицитном калийном балансе накопление форм калия в почве отмечали главным образом в верхнем слое 0–20 см. Длительное парование почвы или выращивание культур без внесения удобрений мало отразилось на содержании обменного магния. Значительное снижение уровня обменного магния в слое 0–60 см почвы произошло при систематическом применении  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в качестве азотного удобрения; при дополнительном внесении  $\text{KCl}$  и повышении урожайности выращиваемых культур отмечена тенденция к дальнейшему снижению почвенных запасов подвижного магния.

*Ключевые слова:* содержание калия и магния, профиль почвы, длительный полевой опыт.

**DOI:** 10.1134/S0002188119030153

### ВВЕДЕНИЕ

Регулированию режима калия в западно-сибирском земледелии перманентно уделяется минимальное внимание по сравнению с фосфором и, тем более, азотом. Обоснованием такого подхода к оптимизации минерального питания выращиваемых культур служит относительно высокое валовое содержание калия в основных пахотных почвах региона при его достаточно равномерном распределении по почвенному профилю. Однако неоднократно было показано отсутствие прямой связи между содержанием в почвах валового калия и его подвижных форм [1, 2]. Изучению участия различных почвенных горизонтов (слоев) в обеспечении калием выращиваемых растений, а также в депонировании калия удобрений при его активном балансе в агроценозах посвящен ряд работ с неоднозначными в целом результатами [3–17].

В исследованиях длительное экстенсивное использование черноземов сопровождалось снижением содержания обменного калия до глубины 100 см почвы [3]; аналогичные результаты были получены и в опытах на легких дерново-подзоли-

стых почвах [4]. В то же время, эксплуатация черноземов без применения удобрений в течение 60 лет в опытах привела к уменьшению содержания подвижных форм калия только в верхних почвенных горизонтах (до 30 см) [5]. В питании культур на серой лесной почве использовали запасы подвижного калия до глубины 50–80 см [6], а в опытах поглощение растениями калия происходило из слоя 0–40 см почвы [7]. Многолетнее выращивание культур в полевом опыте на черноземной почве привело к истощению запасов обменного калия, прежде всего, в слое 0–15 см почвы [8].

Вопрос о степени участия подпахотных горизонтов почвы в снабжении калием выращиваемых культур остается дискуссионным: одни авторы отводят этим горизонтам едва ли не решающую роль [9], другие считают их вклад незначительным [10].

Проведенные исследования накопления калия в профиле почв агроценозов при применении калийных удобрений выявили его зависимость от почвенного гранулометрического состава. На легких почвах миграцию (увеличение содержания) калия наблюдали до 100 см, на среднесуглинистых – до 60 см, на тяжелосуглинистых – до слоя

40 см почвы [4, 11, 12]. Однако в опытах на дерново-подзолистых почвах суглинистого состава происходило передвижение части калийного фонда за пределы метрового и даже полутораметрового почвенного слоя; также по всему метровому профилю чернозема оподзоленного увеличилось содержание подвижного калия при систематическом применении удобрений в опытах [13, 14]. В то же время в ряде работ на различных почвах установили, что весь внесенный с удобрениями калий концентрировался в пахотном слое почвы [5, 7, 15–17].

Имеющиеся литературные данные по изменению содержания форм калия в профиле почв агроценозов достаточно противоречивы. Вероятно, это связано с различиями в минералогическом и гранулометрическом составе изученных почв, а также варьированием доз внесенных калийных удобрений и урожайности культур. Ясность в этом вопросе необходима для рационального регулирования калийного состояния пахотных почв с учетом региональной специфики.

Магний, наряду с калием, является важным элементом минерального питания растений, выполняя ряд существенных физиологических функций в растительном организме. Общие запасы магния в большинстве минеральных почв довольно значительны; по обобщенным литературным данным, валовое содержание магния в почвах земледельческой зоны умеренного пояса в зависимости от минералогического и гранулометрического состава, а также типа почвообразования в среднем составляет 0.5–1.5% [18–20]. Тем не менее, уже давно в научной печати сообщается о нарастающем истощении фонда магния в агропочвах не только легкого, но и тяжелого гранулометрического составов [21–25]. Это связано как с выщелачиванием магния из верхних слоев почвы, обусловленного повышенной миграционной способностью данного катиона, так и с некомпенсируемым выносом элемента урожаями; эти процессы значительно усиливаются в интенсивных агроценозах при внесении минеральных удобрений [26, 27].

Анализ литературных данных показал, что изучение магниевого состояния почв проводили в вегетационных опытах или только в пахотном почвенном слое; исследования изменения содержания магния в профиле почв агроценозов немногочисленны, а работ, выполненных в западно-сибирском регионе, обнаружить не удалось. В этой связи изучение изменений содержания и распределения форм магния в профиле почв агроценозов, с учетом региональной специфики

почвенно-климатических условий, представляется актуальным.

Цель работы – в длительном стационарном полевом опыте изучить изменения содержаний форм калия и магния в профиле почвы в зависимости от интенсивности применения минеральных удобрений в агроценозе.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование изменения эколого-агрохимического состояния агроценоза в зависимости от интенсивности баланса калия проводят в стационарном полевом опыте, заложенном в 1988 г. на исходно целинном участке серой лесной средне-суглинистой почвы, почвообразующей породой которой является лессовидный карбонатный суглинок. Опыт расположен на научно-исследовательской станции ИПА СО РАН в лесостепной зоне юга Западной Сибири (Новосибирская обл., Искитимский р-н). Закладку и проведение опыта осуществляли по общепринятой методике; первые годы выращивали овощные культуры в севообороте (капуста–томат–лук–морковь), с 2000 г. – картофель бесменно [2]. В опыте учитывали и отчуждали с делянок как основную, так и побочную продукцию выращиваемых культур.

Схема опыта включает следующие варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – NP (фон – вносили азотные и фосфорные удобрения из расчета 100% компенсации выноса элементов планируемым урожаем выращиваемой культуры), 3 – фон + K, 25% (калий в дозе 25% от выноса планируемым урожаем), 4 – NP + K, 50%, 5 – NP + K, 75%, 6 – NP + K, 100%, 7 – NP + K, 125%. Также есть вариант многолетнего пара (без растений и удобрений). Повторность в опыте четырехкратная. Удобрения в форме  $N_{aa}$ ,  $P_{cd}$  и  $K_x$  вносили ежегодно весной перед посевом семян, высадками рассады или клубней. Примененные дозы удобрений под различные культуры и их урожайность опубликованы ранее [2]. Общий урожай выращиваемых культур и суммарные дозы внесения минеральных удобрений в вариантах опыта за годы его проведения (1988–2017 гг.) показаны в табл. 1.

Осенью 2017 г. со всех делянок опыта и рядом расположенного целинного участка почвенным буром были отобраны образцы почвы из различных слоев до глубины 1 м (0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см). Почвенные формы калия экстрагировали: легкообменную – вытяжкой 0.0025 M раствора  $CaCl_2$ , обменную – 1 M  $CH_3COONH_4$ , необменную – 1 M  $HNO_3$  и определяли на атомно-абсорбционном спектрометре “Квант – 2А”; в тех же вытяжках определяли со-

**Таблица 1.** Суммарная урожайность культур, суммарные дозы минеральных удобрений и баланс калия в полевом опыте (1988–2017 гг.)

Вариант	Урожайность, ц к.е./га	Поступление с удобрениями, кг д.в./га			Калий, кг/га	
		N	P	K	Вынос урожаем	Баланс
Без удобрений	1933	–	–	–	1887	–1887
NP	2259	3620	2100	–	1959	–1959
NPK <sub>25%</sub>	2830	3620	2100	1454	2629	–1175
NPK <sub>50%</sub>	3248	3620	2100	2908	3296	–388
NPK <sub>75%</sub>	3326	3620	2100	4362	3865	+497
NPK <sub>100%</sub>	3524	3620	2100	5816	4356	+1460
NPK <sub>125%</sub>	3654	3620	2100	7270	5211	+2059

ответствующие формы магния. Классификация почвенных форм калия и методы их определения подробно рассмотрены в работе [2]; учитывая схожесть поведения катионов калия и магния в почвенном поглощающем комплексе и однотипность их связи с минеральной основой почв [19], те же подходы, вероятно, можно применить и при изучении почвенного фонда магния.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольшая урожайность выращиваемых культур в опыте была получена в вариантах с оптимизированным минеральным питанием (NPK<sub>100%</sub> и NPK<sub>125%</sub>) (табл. 1). В контрольном варианте продукционный процесс растений существенно лимитировался дефицитом всех макроэлементов, а в фоновом – калия, который перешел в этом случае в разряд “первого минимума”; при этом урожайность культур в этих вариантах была практически одинаковой. Относительный дефицит калия начал проявляться на 4–5-й годы опыта (после начала сельскохозяйственной эксплуатации исходно плодородной почвы) и в дальнейшем только увеличивался. Недосток в почве доступного растениям калия особенно ощущался при выращивании картофеля, потребляющего значительное количество калия, с одной стороны, и обладающего довольно слабой корневой системой, с другой.

Баланс калия в контрольном и фоновом вариантах, сформировавшийся за 30 лет проведения опыта, был сильно дефицитным и примерно одинаковым, т.е. многолетнее систематическое внесение NP-удобрений не способствовало дополнительной мобилизации почвенного калия. Среднегодовой вынос калия за счет почвенных запасов составил 63–65 кг/га. Бездефицитный

баланс калия выявили в вариантах NPK<sub>75–125%</sub>, по мере увеличения доз внесенных калийных удобрений профицит баланса закономерно нарастал. Вероятно, с агрономической точки зрения, учитывая экономическую составляющую, наиболее целесообразным является внесение калийных удобрений в расчетных дозах, допускающих небольшой дефицит калийного баланса (в нашем опыте – вариант NPK<sub>75%</sub>).

Длительное интенсивное сельскохозяйственное использование почвы в опыте отразилось на ряде почвенных свойств, влияющих на подвижность обменных катионов. Содержание гумуса (определенное по методу Тюрина) в почве наиболее контрастных вариантов опыта и целине показано в табл. 2. В почве многолетнего пара количество гумуса резко снизилось (на 50%) по сравнению с целиной, что, вероятно, определялось перманентной минерализацией почвенного органического вещества в отсутствие поступления растительного материала. В варианте NPK содержание гумуса было заметно больше, чем в контроле, что связано, очевидно, с увеличением урожайности при оптимизированном питании культур.

**Таблица 2.** Содержание гумуса в профиле почвы полевого опыта, %

Вариант	Слой почвы, см					HCP <sub>05</sub>
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	
Целина	5.83	1.48	0.73	0.44	0.39	0.55
Пар	2.93	1.43	0.83	0.50	0.50	0.47
Без удобрений	3.52	1.33	0.80	0.49	0.39	0.43
NPK <sub>125%</sub>	4.65	1.58	0.84	0.70	0.45	0.46
HCP <sub>05</sub>	0.75	0.26	0.16	0.15	0.16	

**Таблица 3.** Содержание легкообменных калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта, мг/100 г

Вариант	Слой почвы, см					<i>HCP</i> <sub>05</sub>
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	
	Калий					
Целина	1.25	0.65	0.62	0.42	0.42	0.15
Пар	0.70	0.68	0.50	0.35	0.36	0.09
Без удобрений	0.37	0.36	0.38	0.35	0.35	0.06
NP	0.43	0.32	0.35	0.38	0.38	0.09
NPК <sub>25%</sub>	0.88	0.45	0.45	0.36	0.37	0.12
NPК <sub>50%</sub>	0.88	0.53	0.45	0.35	0.38	0.12
NPК <sub>75%</sub>	1.15	0.55	0.48	0.40	0.40	0.15
NPК <sub>100%</sub>	1.98	0.53	0.43	0.43	0.45	0.19
NPК <sub>125%</sub>	3.69	0.58	0.48	0.43	0.40	0.21
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.22	0.13	0.12	0.12	0.11	
	Магний					
Целина	1.24	1.35	1.48	1.76	1.91	0.16
Пар	0.64	0.79	1.50	1.80	1.90	0.15
Без удобрений	0.91	1.12	1.42	1.90	1.84	0.22
NP	0.72	0.69	1.40	1.80	1.90	0.19
NPК <sub>25%</sub>	0.72	0.68	1.44	1.85	1.92	0.18
NPК <sub>50%</sub>	0.67	0.68	1.40	1.90	1.98	0.21
NPК <sub>75%</sub>	0.67	0.67	1.42	1.91	1.97	0.19
NPК <sub>100%</sub>	0.65	0.70	1.42	1.93	1.96	0.21
NPК <sub>125%</sub>	0.63	0.64	1.34	1.82	1.96	0.20
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.17	0.19	0.14	0.11	0.15	

тур и соответствующим поступлением в почву растительных остатков (табл. 1). Изменения содержания гумуса во всех вариантах опыта произошли главным образом в слое 0–20 см почвы.

Реакция среды почвы пара и контроля за время проведения опыта не изменилась относительно целины, в вариантах с внесением азотных удобрений снизилась на 0.3–0.4 ед. рН (с 7.1–7.2 до 6.8–6.9) в пахотном и подпахотном слоях. Дополнительное использование возрастающих доз калийных удобрений не отразилось на кислотности почвы по сравнению с фоновым вариантом NP.

Длительное функционирование почвы в условиях агроценоза привело к некоторому утяжелению гранулометрического состава пахотного горизонта. Содержание илстой фракции (частиц <0.001 мм) в почве всех вариантов опыта увеличилось на 1.5–3% по сравнению с целиной (16.8%), физической глины (<0.01 мм) – на 1.7–3.8%

(30.8%), прежде всего, за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной почвенной фракции [2].

В целом емкость поглощения почвы в верхнем слое разных вариантов опыта варьировала в пределах 21–22 мг-экв/100 г (по Бобко и Аскинази), незначительно отличаясь от целинного варианта (21.5 мг-экв/100 г). Емкость поглощения почвы – базовый показатель, который, по мнению К.К. Гедройца, может измениться лишь с изменением природы самой почвы [28]; способность почвы к поглощению и обмену катионов определяется, главным образом, количеством и качеством илстой фракции.

Различная интенсивность применения минеральных удобрений в вариантах опыта соответствующим образом отразилась на продуктивности выращиваемых культур и почвенных запасах макроэлементов (табл. 1). Изменение содержания форм азота и фосфора в почве показано ранее в работе [29]. В данном сообщении рассмотрены изменения почвенного фонда подвижных форм калия, а также магния в связи с калийным балансом в агроценозе.

Уровень легкообменного калия дает представление о степени истощенности почвы, ее способности десорбировать ионы элемента в почвенный раствор. Эти катионы составляют наиболее подвижную фракцию обменного калия, дислоцирующуюся на внешних (планарных) гранях кристаллитов и в органическом веществе [2]. По нашим данным, при уменьшении содержания легкообменного калия в почве <1 мг/100 г у выращиваемых культур ощущается сильная потребность в дополнительном внесении этого элемента.

Изменения содержания легкообменного калия в почве вариантов опыта за 30 лет его проведения показаны в табл. 3. Несмотря на отсутствие выноса калия урожаем, в верхнем слое почвы варианта пара количество этих катионов существенно снизилось по сравнению с целиной. Очевидно, причина заключалась в резком уменьшении содержания гумуса в почве парующегося участка, являющегося почвенным носителем этой фракции калия (табл. 2). Ниже по профилю почвы пара содержание легкообменного калия, как и гумуса, не изменилось. Вероятно, “лишние” катионы этой фракции калия в верхнем почвенном слое перешли в более прочно связанное состояние.

Длительное выращивание культур при сильнодефицитном калийном балансе (варианты контроль и фон) привело к значительному снижению содержания легкообменного калия не только в па-

хотном слое, но и нижележащих почвенных горизонтах (до 60 см), отражая явное истощение плодородия почвы в отношении калия (табл. 3).

По мере роста интенсивности калийного баланса в вариантах НРК закономерно увеличивалось содержание легкообменного калия в слое 0–20 см почвы; отчуждение калия растениями из нижележащих горизонтов существенно уменьшилось или прекратилось. Следует отметить, что накопление легкообменного калия в почве при многолетнем внесении калийных удобрений произошло только в верхнем слое 0–20 см почвы, тогда как достоверное снижение содержания этой фракции калия при его длительном дефицитном балансе в агроценозе отметили в слое 0–60 см почвы.

Содержание магния, экстрагируемого слабым раствором  $\text{CaCl}_2$ , заметно изменилось в почве вариантов опыта под действием ряда факторов, из которых наибольшее влияние оказали минеральные удобрения и процессы выщелачивания (табл. 3). В почве пара в пахотном и в подпахотном слоях, несмотря на отсутствие выноса элемента растениями, содержание этой фракции магния существенно снизилось (в 2 раза) по сравнению с целиной. Однако свободно инфильтрующиеся атмосферные осадки на фоне уменьшения гумусного фонда почвы парующегося участка способствовали истощению запасов наиболее мобильной фракции магния в верхних почвенных горизонтах. Известно, что миграционная способность ионов магния значительно больше, чем калия, поэтому и относительные потери магния были больше.

При выращивании растений в контрольном варианте опыта убыль почвенных запасов легкообменного магния заметно уменьшилась по сравнению с паром, вероятно, из-за снижения инфильтрационных потерь и более высокого содержания гумуса. Тем не менее, за 30 лет опыта запасы легкоподвижной формы магния в почве контроля существенно истощились относительно целинного участка.

Длительное внесение минеральных удобрений в вариантах НР–НРК вызвало значительное снижение содержания магния в пахотном и подпахотном горизонтах почвы (0–40 см), как относительно контроля, так и целины. Отмечено, что урожайность культур в контрольном и фоновом вариантах опыта была практически одинаковой (табл. 1). Следовательно, вынос магния растениями не имел решающего значения при истощении его почвенных запасов; основное влияние оказали процессы выщелачивания. По обобщенным

литературным данным, одновалентные катионы ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ) являются сильными антагонистами Mg, которые ингибируют процессы его закрепления в почве и поглощения растениями. В нашем опыте многолетнее внесение аммиачной селитры, сопровождавшееся к тому же некоторым подкислением почвы, вызвало потерю наиболее мобильной части магниевых фондов верхних почвенных слоев (0–40 см). Дополнительное внесение возрастающих доз хлористого калия и сопряженное значительное повышение урожая выращиваемых культур принципиально не повлияли на этот процесс. Тем не менее, тенденция к дальнейшему снижению этого показателя была очевидной. Ранее в научной печати сообщали об усилении процессов выщелачивания магния из почвы при интенсивном применении минеральных удобрений [23, 25, 26].

Следует сказать, что используемое разделение форм калия (и магния) на калий почвенного раствора (легкообменный) и калий почвенного поглощающего комплекса (обменный) довольно условно, т.к. между этими 2-мя фазами происходит непрерывное взаимодействие. Однако при значительном изменении масштабов входящих или исходящих потоков катионов в почвенной системе в иных условиях ее функционирования (истощающая нагрузка, выщелачивание, высокие дозы удобрений и т.п.) это взаимодействие может быть нарушено. Интрамицеллярно поглощенные катионы (обменные) намного сильнее удерживаются почвенным комплексом, чем экстрамицеллярно поглощенные (легкообменные), соответственно, обменные катионы в меньшей степени вовлечены в различные миграционные процессы.

Определенным подтверждением этого являются данные по изменению содержания обменных форм калия и магния в почве многолетнего опыта (табл. 4). Длительное парование почвы практически не отразилось на почвенном уровне содержания обменных K и Mg, тогда как содержание легкообменных фракций этих катионов существенно уменьшилось (табл. 3).

Очевидно, что несмотря на внешнюю неизменность фонда интрамицеллярно поглощенных катионов, способность почвы многолетнего пара десорбировать эти ионы в почвенный раствор значительно снизилась, а существовавшее в целинной почве определенное равновесие между формами оказалось нарушенным.

Решающее влияние на содержание обменного калия в почве вариантов опыта оказала интенсивность поддерживаемого в агроценозе калийного

**Таблица 4.** Содержание обменных калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта, мг/100 г

Вариант	Слой почвы, см					<i>HCP</i> <sub>05</sub>
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	
	Калий					
Целина	11.4	8.6	11.2	11.4	9.7	1.7
Пар	11.3	10.9	12.6	12.1	10.8	1.4
Без удобрений	6.5	6.8	8.6	10.5	9.7	1.6
NP	6.9	8.7	8.3	10.5	9.3	1.5
NPK <sub>25%</sub>	11.8	8.6	9.7	10.9	9.7	1.8
NPK <sub>50%</sub>	12.8	8.7	10.8	10.9	9.8	1.7
NPK <sub>75%</sub>	17.6	8.5	11.7	10.8	9.7	1.8
NPK <sub>100%</sub>	23.4	8.3	11.5	11.0	9.8	2.2
NPK <sub>125%</sub>	41.6	8.9	11.8	10.4	9.6	2.4
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	3.1	1.5	2.3	2.1	1.5	
	Магний					
Целина	14.3	18.7	28.2	28.3	28.7	3.4
Пар	13.1	16.7	28.1	28.2	28.6	3.5
Без удобрений	12.3	16.1	28.8	28.5	28.7	2.8
NP	10.6	10.1	15.1	27.1	28.1	2.0
NPK <sub>25%</sub>	10.1	10.0	15.3	28.5	30.1	3.1
NPK <sub>50%</sub>	9.4	9.5	15.7	29.5	29.5	3.0
NPK <sub>75%</sub>	8.6	7.8	15.0	28.3	30.7	2.8
NPK <sub>100%</sub>	7.9	7.8	15.1	27.8	30.0	2.5
NPK <sub>125%</sub>	8.0	7.5	14.7	26.1	31.0	2.5
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.8	2.8	6.4	4.5	3.8	

баланса. При длительном сильнодефицитном балансе в вариантах контроль и фон почвенный уровень обменной формы калия существенно снизился в верхних слоях почвы (до 60 см) (табл. 4). В пахотном горизонте почвы этих вариантов содержание обменного калия снизилось до текущего состояния ( $\approx 6\text{--}7$  мг/100 г при 12 мг/100 г в исходной целинной почве) через несколько лет после начала опыта, оставаясь на этом стабильно низком уровне последующие годы, несмотря на продолжавшийся значительный вынос калия урожаями выращиваемых культур. Этот уровень содержания обменного калия, видимо, является минимальным и соответствует предельному истощению в почве обменной формы элемента. Абсолютные величины минимального уровня содержания обменного калия в разных почвах могут заметно отличаться, но относительные (в %) от

почвенной емкости катионного обмена (ЕКО) — примерно одинаковы для близких по гранулометрическому составу почв. Для суглинистых разновидностей почв региона минимальный уровень содержания обменного калия составляет 0.8–0.9% ЕКО [2]; величина минимального уровня может быть, на наш взгляд, важным дополнительным диагностическим показателем калийного состояния почв при их интенсивном использовании.

По мере роста интенсивности калийного баланса в вариантах NPK опыта содержание обменного калия в почве закономерно возрастало, в разы превышая показатели целины и пара. При повышенных дозах калийных удобрений и профицитном балансе насыщенность этим катионом ЕКО почвы пахотного слоя достигала 5% и более; однако накопление калия происходило только в верхнем слое 0–20 см почвы, его миграции вниз по профилю не наблюдали. Оптимальные условия калийного питания культур в опыте складывались при доле обменного калия в ЕКО почвы  $\approx 2\%$ .

Содержание обменного магния в слоях 0–20 и 20–40 см почвы длительно парующейся почвы за время проведения опыта несколько снизилось (табл. 4), видимо, за счет выщелачивания. В контрольном варианте опыта убыль магния продолжилась, его уровень заметно уменьшился по сравнению с целинной почвой. Однако после 30 лет экстенсивного выращивания растений (без удобрений) содержание обменной формы магния в почве мало изменилось относительно парующегося участка. Отметим, что длительный дефицитный баланс калия и магния в контрольном варианте опыта значительно сильнее отразился на калийном фонде почвы, чем на магниевом.

Основным фактором, повлиявшим на изменение содержания обменного магния в почве опыта, послужило применение минеральных удобрений. При практически одинаковой урожайности выращиваемых культур в контрольном и фоновом вариантах опыта (табл. 1), уровень обменного магния в почве фона резко снизился до глубины 60 см (табл. 4). Вероятно, длительное внесение аммиачной селитры, как уже отметили выше, способствовало вытеснению из почвенного комплекса не только экстрамицеллярно поглощенных легкообменных катионов магния, но и его более прочно интрамицеллярно поглощенных ионов. По мере возрастания дополнительных доз калийных удобрений и урожайности культур, также наблюдали тенденцию к дальнейшему снижению содержания обменного магния в пахотном и подпахотном почвенных горизонтах.

В ряде научных работ, выполненных в разных почвенно-климатических условиях, рассматриваются или предлагаются различные уровни и градации обеспеченности почв доступным для растений магнием [22–27, 30]. В нашем опыте содержания обменного магния (экстрагируемого 1 М раствором  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) в пахотном слое почвы вариантов NP и NPK были довольно близкими и находились в пределах 8–10 мг/100 г. В то же время урожайность культур в этих вариантах значительно различалась, например, в отдельные годы у картофеля более, чем в 3 раза (табл. 1). Можно предположить, что данный уровень содержания обменного магния в среднесуглинистой почве, несмотря на многолетний дефицитный баланс, не достиг критических минимальных величин и не является фактором, существенно лимитирующим продукционный процесс выращиваемых культур. Однако учитывая значительное снижение содержания магния в верхних почвенных горизонтах (до 60 см) при сельскохозяйственном использовании почвы (даже от исходно высокого уровня целинной, плодородной почвы), особенно на фоне систематического применения минеральных удобрений, мониторинг и регулирование (при необходимости) магниевое состояния почв интенсивных агроценозов заслуживает повышенного внимания.

Относительно стабильное в течение длительного времени содержание в почве обменного калия (и, вероятно, магния) при сильном дефиците баланса, очевидно, предполагает заметное участие в питании растений и поддержании почвенного уровня обменных катионов их других форм, не извлекаемых нейтральными солевыми растворами. Оценить масштабы потерь почвенного калия в интенсивных агроценозах, а также ближайшие ресурсы восполнения содержания его обменной формы можно по содержанию в почве необменного калия. Считается, что необменные катионы генетически связаны с трехслойными глинистыми минералами. Ранее было установлено, что фракция физической глины исследованной почвы состоит (в убывающем порядке) из гидрослюды мусковитового типа, хлорита, вермикулита и смектита [2]. Эти минералы являются почвенными носителями калия и магния [19]. Используемый нами для определения необменного калия метод (1 М  $\text{HNO}_3$  с кипячением) позволяет извлекать катионы из глинистых минералов, как с неподвижной кристаллической решеткой, так и с расширяющимся ее типом [2]. Отдельно добавим, что фракция физического песка (частиц >0.01 мм) исследованной почвы состоит из первичных минералов: кварца, амфибо-

**Таблица 5.** Содержание необменного калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта, мг/100 г

Вариант	Слой почвы, см					<i>HCP</i> <sub>05</sub>
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	
	Калий					
Целина	107	96	103	92	83	9
Пар	106	100	100	96	78	9
Без удобрений	92	95	104	98	79	12
NP	90	95	100	98	74	11
NPK <sub>100%</sub>	132	108	100	99	85	20
NPK <sub>125%</sub>	158	108	100	99	80	21
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	12	11	8	9	8	
	Магний					
Целина	335	360	375	390	425	14
Пар	330	350	370	390	430	17
Без удобрений	330	350	380	385	425	17
NP	320	340	360	395	420	15
NPK <sub>100%</sub>	315	340	355	385	420	15
NPK <sub>125%</sub>	315	340	350	390	425	14
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	24	22	32	29	21	

лов и полевых шпатов — основного депо валовых запасов калия. Содержание необменного калия в почве наиболее контрастных вариантов опыта, установившееся за 30 лет его проведения, показано в табл. 5.

В пахотном слое почвы контрольного и фонового вариантов уровень необменной формы калия достоверно снизился относительно целины и пара (на 14–17 мг/100 г), ниже по профилю практически не изменился. Отметим, что содержание необменного калия в пахотном слое почвы стабилизировалось на этом уровне (~90 мг/100 г) в последние годы; вероятно, количество необменных катионов калия в почве, подобно обменным, имеет свой минимальный уровень — относительно стабильный во времени, несмотря на продолжающийся значительный вынос калия урожаями культур. Учитывая это обстоятельство можно предположить, что питание культур в вариантах опыта с длительным сильно дефицитным калийным балансом в значительной степени осуществлялось за счет других, более прочносвязанных с минеральной частью почвы форм калия, не экстрагируемых использованными вытяжками.

**Таблица 6.** Запасы калия и магния в профиле почвы длительного опыта, кг/га

Форма калия	Слой почвы, см					
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	0–100
Запасы калия						
Целина						
Легкообменный	25	13	12	8	8	66
Обменный	228	172	224	228	194	1050
Необменный	2140	1920	2060	1840	1660	9620
Без удобрений (контроль)						
Легкообменный	7	7	8	7	7	36
Обменный	130	136	172	210	194	842
Необменный	1840	1900	2080	1960	1580	9360
NP (фон)						
Легкообменный	9	6	7	8	8	38
Обменный	138	174	166	210	186	874
Необменный	1800	1900	2000	1960	1480	9140
NPK <sub>100%</sub>						
Легкообменный	40	11	9	9	9	78
Обменный	468	166	230	220	196	1280
Необменный	2640	2160	2000	1980	1700	10480
Запасы магния						
Целина						
Легкообменный	25	27	30	35	38	155
Обменный	286	374	564	566	574	2360
Необменный	6700	7200	7500	7800	8500	37700
Без удобрений (контроль)						
Легкообменный	18	22	28	38	37	143
Обменный	246	322	576	570	574	2290
Необменный	6600	7000	7600	7700	8500	37400
NP (фон)						
Легкообменный	14	14	28	36	38	130
Обменный	212	202	302	542	562	1820
Необменный	6400	6800	7200	7900	8400	36700
NPK <sub>100%</sub>						
Легкообменный	13	14	28	38	39	132
Обменный	158	156	302	556	600	1770
Необменный	6300	6800	7100	7700	8400	36300

При бездефицитном калийном балансе в агроценозе содержание необменного калия значительно возросло как в пахотном, так и подпахотном почвенных слоях. Характер накопления необменного калия в профиле почвы совпадал с

распределением легкообменной формы этого элемента. Очевидно, что мигрирующий с фильтрующимися водами вниз по профилю почвы легкообменный калий поглощался трехслойными глинистыми минералами, трансформируясь в необменную форму.

Содержание в почве вариантов опыта магния, извлекаемого 1 М раствором HNO<sub>3</sub>, возможно, в силу относительно высоких абсолютных величин, варьировало не столь явно, как в случае с калием. Тем не менее, установлена четкая тенденция к уменьшению содержания этой формы магния в почве при ее сельскохозяйственном использовании, отражающая как действие интенсивного применения минеральных удобрений, так и возрастающей продуктивности выращиваемых культур.

Расчет калийного баланса за время проведения опыта показал, что вынос почвенного калия в контрольном и фоновом вариантах составил ≈1900 кг/га (табл. 1). Эта величина примерно в 2 раза превышала запасы обменного калия в 1-метровом слое целинной почвы и была близка к запасам необменной формы элемента в слое 0–20 см почвы (табл. 6). Запасов легкообменного калия в профиле почвы, в случае допущения возможности их полного поглощения растениями, не хватило бы и на одну вегетацию. Отметим, что снижение запасов наиболее подвижных форм калия в почве агроценозов с его дефицитным балансом произошло главным образом в пахотном почвенном слое. Следовательно, если бы не было механизмов трансформации калия в почве из более прочносвязанного состояния в менее прочное, его ресурсы в почвенном поглощающем комплексе были бы быстро исчерпаны.

Снижение запасов необменного калия в почве соответствовало примерно пятилетнему выносу этого элемента урожаями культур и произошло только в пахотном почвенном горизонте. Очевидно, оставшаяся часть выноса обеспечивалась за счет структурного калия почвенных минералов. Потребление растениями этой формы калия могло осуществляться как непосредственно с занимаемых элементом специфических позиций в кристаллитах, так и после его трансформации в другие, более подвижные формы [2].

Следует отметить, что внешне неизменные запасы форм калия (определяемых солевыми и разбавленными кислотными вытяжками) в подпахотных слоях почвы контроля и фона не компенсировали истощенные калийные запасы пахотного слоя, что проявилось в значительном уменьшении урожайности культур в этих вариантах опыта



по сравнению с вариантами НРК (табл. 1). Таким образом, надежды на “неисчерпаемые” запасы калия в подпахотных почвенных горизонтах, как “страховой полис” при длительном сильно дефицитном калийном балансе в агроценозах, оказываются несостоятельными.

Положительный баланс калия в агроценозах приводил к увеличению в почве запасов всех калийных форм (табл. 6). Запасы обменного калия накапливались преимущественно в пахотном почвенном слое, а необменного — в пахотном и в подпахотном горизонтах. Общее увеличение калийных запасов в почве примерно соответствовало профициту баланса этого элемента в агроценозе, т.е. почти весь внесенный с удобрениями сверх выноса калий депонировался главным образом в пахотном слое почвы в относительно подвижных формах.

Длительное сельскохозяйственное использование почвы без применения удобрений и в этой связи получение низких урожаев, слабо отразилось на почвенных запасах магния по сравнению с исходной целинной почвой (табл. 6). В интенсивном агроценозе, с регулярным внесением сбалансированных доз минеральных удобрений и высокой продуктивностью культур, запасы наиболее подвижных форм магния (легкообменной и обменной) снизились в 2 раза в пахотном и подпахотных слоях почвы (до глубины 60 см). Это свидетельствовало о сильном уменьшении способности почвы десорбировать катионы элемента в почвенный раствор и поддерживать оптимальный (целинный) уровень содержания магния в почвенном поглощающем комплексе, т.е. об определенной степени истощения плодородия данной почвы в отношении магния. При перманентном усилении этого процесса вероятно нарастающее лимитирование магниевое питания выращиваемых культур. Предпосылкой для такого сценария служит и уменьшение потенциально доступного растениям фонда необменного магния в почве интенсивного агроценоза. Относительное уменьшение запасов необменного магния в отдельных почвенных слоях было невелико; однако суммарная потеря запасов этой формы элемента из 1-метрового профиля почвы вариантов НР и НРК за 30 лет проведения опыта была заметной и составила 1000–1400 кг/га, что сопоставимо с общим выносом калия при его дефицитном балансе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования на серой лесной среднесуглинистой почве лесостепи

Западной Сибири показали, что длительный сильный дефицит баланса калия в агроценозе приводил к существенному ухудшению калийного состояния почвы; основная истощающая нагрузка, выразившаяся в значительном снижении содержания обменного и необменного калия, приходилась на верхний, пахотный слой почвы. Имеющиеся, внешне неизменные запасы калия в нижележащих почвенных слоях были не в состоянии полноценно компенсировать истощенный калийный фонд пахотного горизонта, что проявилось в уменьшении эффективности продукционного процесса выращиваемых на данной почве культур. Таким образом, надежды на “неисчерпаемые” запасы калия в почве, как в пахотном слое, так и включая нижележащие горизонты, оказались несостоятельными, что подтверждает отсутствие альтернативы рациональному использованию калийных удобрений.

Обнаруживаемое традиционными диагностическими методами уменьшение в почве запасов обменного и необменного калия не соответствует масштабам выноса этого элемента за относительно продолжительное время. Следовательно, в питании растений и поддержании в почве определенного уровня содержания подвижных калийных форм значительную роль играет калий, более прочно удерживаемый почвенными минералами и не извлекаемый рутинными экстрагентами. Очевидно, что при больших потерях этой формы калия нарушаются механизмы саморегуляции содержания почвенных калийных форм и происходит истощение их подвижных фракций, деградирует эффективное и потенциальное плодородие почвы.

Оптимальное калийное питание растений и сохранение плодородия почвы в отношении калия обеспечивалось при использовании калийных удобрений в расчетных дозах, допускающих небольшой (20–30%) дефицит баланса в агроценозе. Длительный положительный баланс калия в агроценозе приводил к значительному (вероятно, избыточному) накоплению форм элемента, главным образом, в верхнем 0–20 см слое почвы.

Длительное сельскохозяйственное использование почвы в экстенсивном агроценозе (без использования удобрений) мало изменило почвенное содержание обменного магния по сравнению с целинным и парующимся участками. Существенное снижение содержания обменного магния до глубины 0–60 см почвы произошло при систематическом применении  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в качестве азотного удобрения (вариант опыта НР), несмотря на относительно невысокую урожайность культур в связи с дефицитом калия. При дополни-

тельном внесении KCl (на фоне NP), сопровождавшимся повышением урожайности выращиваемых культур, отметили тенденцию к дальнейшему снижению почвенных запасов подвижного магния в наиболее корнеобитаемом слое (0–20 и 20–40 см). Значительное уменьшение запасов наиболее подвижных фракций магния в почве интенсивного агроценоза при мало изменившемся содержании обменного магния свидетельствовало о снижении способности данной почвы поддерживать оптимальный уровень содержания этого катиона в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе. Это обстоятельство определяет очевидную необходимость контроля над магниевым состоянием почв при их интенсивном сельскохозяйственном использовании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Середина В.П.* Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.
2. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
3. *Носко Б.С.* Изменение калийного фонда черноземов при распашке многолетней залежи // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1474–1480.
4. *Беляев Г.Н.* Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
5. *Филон И.И., Шеларь И.А.* Содержание калия в черноземе типичном при сельскохозяйственном освоении и длительном применении минеральных удобрений // Агрохимия. 1999. № 1. С. 21–27.
6. *Окорков В.В.* Фосфорно-калийный режим серой лесной почвы Владимирского ополья при внесении удобрений // Агрохимия. 2002. № 5. С. 5–11.
7. *Забавская К.М.* Влияние длительного применения калийных удобрений на превращение форм калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве и на изменение ее агрохимических свойств: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1970. 18 с.
8. *Dubetz S., Dudas M.* Potassium status of a dark brown chernozem soil after sixty-six years of cropping under irrigation // Can. J. Soil Sci. 1981. V. 61. № 2. P. 409–415.
9. *De Nobili M., Vittori Antisari L., Sequi P.* K-uptake from subsoil // Proc. 22<sup>nd</sup> IPI Coll. Soligorsk, USSR, 1990. P. 133–144.
10. *Hannay Y.Y., Johnson J.W.* Potassium nutrition of soybean // Potassium in agriculture. Madison, Wis., USA: ASA, 1985. P. 754–764.
11. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
12. *Носов В.В.* Значение калийных удобрений для сохранения экологического равновесия // Плодородие. 2002. № 2. С. 28–30.
13. *Липкина Г.С.* Содержание подвижных соединений калия в интенсивно удобряемых дерново-подзолистых суглинистых почвах // Почвоведение. 1986. № 12. С. 69–75.
14. *Мартынович Л.И., Мартынович Н.Н.* Влияние систематического применения удобрений на калийный режим почвы в зерносвекловичном севообороте // Агрохимия. 1992. № 6. С. 23–28.
15. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Черных И.Н.* Оценка калийного режима дерново-подзолистых почв с использованием термодинамических показателей // Вестн. сел.-хоз. науки. 1988. № 12. С. 43–51.
16. *Убугунов Л.Л., Убугунова В.И.* Калийный фонд аллювиальных почв Байкальского региона // Почвоведение. 1999. № 4. С. 530–536.
17. *Тютюнов С.И., Карабутов А.П., Соловichenko В.Д.* Динамика подвижного калия в черноземе типичном в связи с различным уровнем интенсивности использования пашни // Земледелие. 2017. № 8. С. 7–10.
18. *Панников В.Д., Минеев В.Г.* Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
19. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
20. *Шеуджен А.Х.* Биогеохимия. Майкоп: Адыгея, 2003. 1028 с.
21. *Мазаева М.М.* Магниевое питание растений и магниевые удобрения: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1967. 42 с.
22. *Прокошев В.В., Неугодова О.В., Смирнов Ю.А., Государева З.И.* Магниевые удобрения в интенсивном земледелии. М.: ВНИИТЭИ-агропром, 1987. 52 с.
23. *Аристархов А.Н.* Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
24. *Афанасьев Р.А.* Магний в системе почва–растение–животное // Плодородие. 2005. № 5. С. 19–21.
25. *Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленев Н.А.* Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
26. *Мазаева М.М.* Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможности проявления необеспеченности им растений при длительном применении NPK-удобрений // Агрохимия. 1977. № 9. С. 97–101.
27. *Тихомирова В.Я.* Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // Агрохимия. 2011. № 5. С. 84–89.
28. *Гедройц К.К.* Почвенный поглощающий комплекс и почвенные поглощенные катионы как основа генетической почвенной классификации. Л.: Коминтерн, 1927. 110 с.
29. *Якименко В.Н.* Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы // Агрохимия. 2012. № 12. С. 47–52.
30. *Богдевич И.М., Ломонос О.Л.* Магниевые удобрения на дерново-подзолистых почвах: аналит. обзор. Минск: ИПА, 2009. 40 с.

## Change of Potassium and Magnesium Content in Soil Profile of Long-Term Field Experiment

V. N. Yakimenko

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS  
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia  
E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

In long-term field experiment on gray forest medium-loamy soil of forest-steppe of Western Siberia it was shown that the long-lasting potassium balance deficit in agrocenoses led to a significant deterioration of potassium soil condition and crop productivity. The content of available potassium forms significantly decreased in the soil layer 0–60 cm. In the arable soil horizon (0–20 cm) the content of exchange potassium stabilized at a low level (6–7 mg/100g; in the native soil – 12 mg), remaining stable for many years. With a deficit-free potassium balance the accumulation of potassium forms in the soil was observed mainly in the upper 0–20 cm layer. Long-term soil fallowing or crop growing without fertilizing had little effect on the content of exchangeable magnesium. A significant decrease in the level of exchange magnesium in the soil layer 0–60 cm occurred under systematic application of  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  as nitrogen fertilizer; with additional KCl application and increasing the yield of cultivated crops there was a tendency to further decrease of available soil magnesium reserves.

*Key words:* potassium and magnesium content, soil profile, long-term field experiment.