

УДК 631.416.4:631.82:631.862(571.54)

КАЛИЙНОЕ СОСТОЯНИЕ КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В СУХОЙ СТЕПИ ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2022 г. А. С. Билтуев^{1,*}, Л. В. Будажапов¹, А. К. Уланов¹, Н. Н. Дармаева¹¹Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
ул. Третьякова, 25з, Улан-Удэ 670045, Россия

*E-mail: burniish@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 04.06.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В условиях сухой степи Забайкалья в длительном стационарном полевом опыте изучено влияние удобрений на калийное состояние почв. Выявлены закономерности изменения содержания валового, необменного и обменного калия от вида удобрений и баланса калия в полевом севообороте. Существенное увеличение валового калия отмечено при внесении органических удобрений в дозах 20–40 т навоза/га, применение К40 на фоне Р40К40 позволило сохранить его исходное содержание. Запасы необменного калия снижались в пахотном слое и возрастали в подпахотном. Содержание обменного калия зависело от баланса элемента в севообороте и содержания необменного калия. Увеличение среднегодового баланса калия на 1 кг/га пашни севооборота приводило к повышению содержания обменной формы на 0.09 мг/кг в пахотном слое почвы, в подпахотном – на 0.44 мг/кг. Выявлена сильная зависимость содержания обменной и необменной форм калия. Наибольшее количество обменного калия в пахотном горизонте отмечено при внесении 40 т навоза/га.

Ключевые слова: каштановая почва, длительный полевой опыт, система удобрений, калийное состояние.

DOI: 10.31857/S0002188122100040

ВВЕДЕНИЕ

Калийное состояние почв определяется минералогическим и гранулометрическим составом почвообразующих пород, а также степенью деградации калийсодержащих минералов в различных ее горизонтах. Антропогенное воздействие на калийный статус выражается в изменении содержания различных форм калия под воздействием обработки почв, возделывания культур и применения удобрений. При этом фактор удобрений обладает наиболее значимым влиянием [1, 2].

Пахотные каштановые почвы Бурятии в любой части профиля характеризуются большим количеством валового калия ($K_{\text{вал}}$), превышающим в абсолютном большинстве случаев 3%. Столь высокое содержание калия, не свойственное аналогичным почвам в европейской части страны, объясняется минералогическим составом пород и гранулометрическим составом почв. В питании растений участвуют обменный ($K_{\text{обм}}$) и необменный ($K_{\text{необм}}$) формы калия, формирующие актуальные и потенциальные его запасы. Содержание $K_{\text{необм}}$ составляет от 2.0 до 8.9% от $K_{\text{вал}}$, постепен-

но снижаясь с глубиной [3, 4]. Содержание $K_{\text{обм}}$ значительно уступает содержанию необменных форм, при этом зачастую с глубиной эта разница увеличивается. Обменный калий варьируют в пределах от 6 до 22 мг/100 г почвы, достигая максимального содержания в слое почвы 0–30 см. В старопашотных каштановых почвах Бурятии содержание обменной формы оценивают по методу Чирикова как повышенное [5]. Данный метод определения был принят в начале 1970-х гг. Агротехслужбой “Бурятская” как стандартный метод определения обменного калия в каштановых почвах региона.

Калийное состояние почв обусловлено своеобразием почвообразующих факторов. Антропогенные воздействия как обработка почвы, выращивание культурных растений, внесение удобрений, севообороты создает новые условия функционирования почв [6–8].

Цель работы – в длительном стационарном полевом опыте в сухостепной зоне Бурятии определить закономерности изменения валового содержания, обменных и необменных форм калия при различных вариантах применения удобрений.

Таблица 1. Изменение содержания валового K_2O в слое 0–20 см каштановой почвы при длительном применении удобрений (1968–2018 гг.)

Вариант	Среднегодовое внесение на 1 га пашни севооборота	Баланс K_2O в севообороте, \pm кг/га/год	$K_{вал}$, мг/кг	$\pm\Delta K_{вал}$	
				мг/кг	мг/кг/год
Исходная почва	–	–	35 200		
Контроль	–	–31	34 240	–960	–19.2
N40P40K40	K28	–34	34 880	–320	–6.4
Навоз 20 т/га	навоз 8 т	–10	35 680	480	9.6
Навоз 40 т/га	навоз 15 т	19	36 760	1560	31.2
Навоз 10 т/га + N50P25K60	навоз 4 т + K26	–15	34 960	–240	–4.8
HCP_{05}				300	

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Калийное состояние почв в агроценозе изучали в стационарном полевом опыте, заложенном в 1967 г. на типичной каштановой мучнисто-карбонатной среднемощной супесчаной сезонно-мерзлотной почве, обладающей низким потенциальным плодородием.

Опыт размещен на опытном поле Бурятского НИИСХ в южной сухостепной зоне Республики Бурятия. Для изучения калийного состояния почв из общей схемы опыта были выделены варианты: контроль (без удобрений), N40P40K40, навоз 20 т/га, навоз 40 т/га, навоз 10 т/га + N50P25K60. Минеральные удобрения ($N_{аа}$, $P_{сд}$, K_x) вносили ежегодно под весеннюю вспашку, органические (полуперепревший навоз КРС) и органо-минеральные – один раз в ротацию под перепашку пара. В качестве исходной почвы принят почвенный образец длительной залежи (1968–2019 гг.) на территории размещения длительного агрохимического опыта. Учетная площадь делянок 100 м², повторность в опыте четырехкратная. Агротехника возделывания культур – общепринятая для сухостепной зоны Республики Бурятия [8].

Почвенные образцы на анализ отбирали весной в паровом поле. Содержание калия в почве определяли: валового – разложением почвы фтористоводородной кислотой [9], обменный – по Пчёлкину [9], обменный – по Чирикову [9]. Статистическая обработка данных проведена стандартными методами, эмпирическое моделирование проводили на основе корреляционного анализа и построения парных моделей на основе метода наименьших квадратов [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание калия в каштановых почвах является наиболее стабильным показателем калийного состояния почв. Подобное связано с тем, что >90% калия находится в минеральном скелете почв, наиболее консервативном пуле почвенного калия. Длительное экстенсивное использование почв, возделывание сельскохозяйственных культур при отрицательном балансе калия приводит к уменьшению содержания более подвижных форм калия – обменной и необменной [1, 7, 11]. В целом за весь период исследования валовое содержание калия изменялось в соответствии с его балансом в севообороте (табл. 1), связь между этими показателями была очень сильной ($r = 0.93$).

Описательная модель влияния баланса калия в севообороте (B_K , кг/га) на содержание валового калия в различных вариантах опыта наиболее адекватно определялась линейным трендом (1):

$$K_{2O_{вал}} = 35909 + 42.6B_K, \quad R^2 = 0.88. \quad (1)$$

Достоверное снижение содержания валового калия от исходного отмечено в неудобренном варианте, а превышение – при применении органических удобрений – навоз в дозах 20 и 40 т/га в паровом поле.

Длительное внесение K40 в составе полного минерального удобрения и органо-минеральной системы, с внесением навоза 10 т/га + N50P25K60 позволило сохранить исходное содержание $K_{вал}$.

Систематическое применение удобрений влияло на содержание обменного и необменного калия в зависимости от систем удобрения (табл. 2). Возделывание полевых культур без удобрений привело к существенному снижению, а их применение – к сохранению или увеличению исходного количества обменного калия в пахотном слое

Таблица 2. Содержание обменной и необменной форм калия в различных слоях почвы при длительном применении различных систем удобрения в зернопаровом севообороте (среднее за 2017–2019 гг.)

Вариант	K ₂ O, мг/кг			
	0–20 см		20–40 см	
	обменный	необменный	обменный	необменный
Исходная почва	112	2100	104	1260
Контроль	79	1270	59	1450
N40P40K40	130	1460	67	1500
20 т/га навоза	127	1560	75	1640
40 т/га навоза	168	1870	96	1950
10 т/га + N50P25K60	108	1570	74	1460
HCP ₀₅	17	90	16	110

почвы. Наибольшее содержание $K_{обм}$ отмечено при внесении навоза 40 т/га, превышение над контролем составило 112, а над исходной почвой – 50%. Относительно меньший прирост показало внесение калия в составе минеральных трехкомпонентных удобрений, а также органических удобрений в дозе навоз 20 т/га. Обеспеченность растений калием в этих вариантах находилась на уровне высокого (по Чирикову). Наименьшие показатели содержания обменного калия на уровне средней обеспеченности отмечены в контроле. Другие варианты достоверно превышали контрольный и находились в градации повышенной обеспеченности обменным калием. При ранжировании по возрастанию содержания $K_{обм}$ в слое 0–20 см почвы варианты опыта размещались в ряду: контроль → навоз 10 т/га + N50P25K60 → навоз 20 т/га → N40P40K40 → навоз 40 т/га.

Подпахотный горизонт также активно участвовал в калийном питании растений. Этот горизонт более уплотнен и в меньшей степени обеспечен влагой, вносимые удобрения попадают в этот слой вследствие миграции солей калия по профилю [12]. Обеспеченность обменным калием в слое 20–40 см была на уровне средних показателей, лишь в варианте навоз 40 т/га – повышенной. В отличие от пахотного горизонта применение удобрений не позволило достичь порога исходного содержания обменного калия. В целом ранжирование вариантов по обеспеченности обменным калием в слое 20–40 см повторяло аналогичное ранжирование в слое 0–20 см.

Ближний резерв калийного питания ($K_{необм}$) участвует в питании растений в результате перехода в обменное и водорастворимое состояние, поэтому тенденция к его распределению в вариантах опыта также зависела от баланса калия в севообороте. При отрицательных его показателях

расходовался калий удобрений и обменный калий почвы, происходила интенсивная его мобилизация из необменной формы [13].

Снижение исходного содержания $K_{необм}$ в почве пашни было столь интенсивным, что его запасы в слое 0–20 см не могли восполнить ни минеральные, ни органические удобрения. Даже при положительном балансе калий удобрений повышал содержание обменной формы и лишь снижал потери необменной. Максимальное количество $K_{необм}$ отмечено в варианте применения навоза 40 т/га, минимальное – в контроле. При ранжировании по возрастанию содержания $K_{необм}$ в слое 0–20 см варианты опыта размещались в ряду: контроль → N40P40K40 → навоз 20 т/га → навоз 10 т/га + N50P25K60 → навоз 40 т/га.

В подпахотном горизонте в отличие от пахотного наблюдали увеличение содержания $K_{необм}$ относительно исходного состояния. Соотношение $K_{необм} : K_{обм}$ в исходной почве составляло 19 в слое 0–20 см и 12 – в 20–40 см. Длительное возделывание почв снизило его до 11–16 в пахотном горизонте, но увеличило до 20–25 в подпахотном. В этой связи отметили тенденцию к накоплению калия удобрений в необменном состоянии в слое 20–40 см и интенсивное его извлечение из слоя 0–20 см. Размеры использования запасов $K_{необм}$ из пахотного горизонта были больше, чем из подпахотного.

При сравнении равных по действующему веществу и срокам внесения (в паровое поле) систем удобрения (органической, навоз 20 т/га и органо-минеральной, навоз 10 т/га + N50P25K60) выявлено, что органический вариант удобрения накапливал больше обменного и необменного калия в различных слоях почвы.

Таблица 3. Корреляционные связи ($r \pm s_r$) содержания $K_{обм}$ в различных слоях почвы с другими показателями калийного режима ($n = 9$)

Фактор	Баланс K_2O , \pm кг/га	$K_{необм}$ (0–20 см)	$K_{обм}$ (20–40 см)	$K_{необм}$ (20–40 см)
$K_{обм}$ (0–20 см)	0.86 ± 0.19	0.91 ± 0.22	0.88 ± 0.18	0.90 ± 0.17
$K_{обм}$ (20–40 см)	0.90 ± 0.16	0.77 ± 0.24	–	0.89 ± 0.29

Примечание. Связь существенна при $r \geq 0.67$ ($t_{факт} \geq 2.4$).

В опыте выявлено, что внесенные удобрения повышали в большей степени содержание обменной формы калия, чем необменной. При увеличении баланса доля необменного калия в общей сумме $K_{обм} + K_{необм}$ снижалась, а обменного – увеличивалась, т.е. темпы приращения обменной формы были больше, чем необменной.

Корреляционный анализ позволил установить сильное и достоверное влияние баланса калия в севообороте и запасов $K_{необм}$ на содержание $K_{обм}$ в пахотном и подпахотном горизонтах почвы (табл. 3).

Большая выборка позволила создать эмпирические модели определения основных форм калия каштановых почв в зернопаровом севообороте под воздействием удобрений. Эмпирическая модель совместного воздействия значимых факторов на содержание обменного калия имело вид множественной регрессии (2, 3):

$$\begin{aligned} K_{обм} (0-20 \text{ см}) &= \\ &= 0.09B_K + 0.14K_{необм} (0-20 \text{ см}) - 96.73, \quad (2) \\ R^2 &= 0.84, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{обм} (20-40 \text{ см}) &= \\ &= 0.44B_K + 0.02K_{необм} (20-40 \text{ см}) - 45.56, \quad (3) \\ R^2 &= 0.83. \end{aligned}$$

Общие тренды зависимости содержания калия в почве были довольно стабильными и зависели от баланса поступления/выноса калия в почве. Между тем амплитуды краткосрочных изменений в определенные периоды были приурочены к вариациям гидротермических условий, которые изменяли не только размеры калийного питания, но и кинетику обменной и необменной адсорбции и десорбции, влияя на скорость трансформации элемента между различными формами [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, содержание различных форм калия в каштановых почвах Бурятии при длительном применении удобрений изменялось в соответствии с балансом этого элемента в севообороте. Снижение валового количества калия отмече-

но в варианте без удобрений, сохранение исходного содержания – при применении $K40$ в составе полного минерального удобрения и органико-минерального удобрения навоз 10 т/га + $N50P25K60$, увеличение – при внесении органических удобрений в дозах 20–40 т навоза/га.

Обменный калий интенсивно расходовался из пахотного и подпахотного горизонтов, его содержание при применении удобрений зависело от баланса элемента в севообороте и содержания необменного калия. Изменение баланса на 1 кг/га и содержания необменного калия на 1 мг/кг сопровождалось изменением содержания обменной формы соответственно на 0.09 и 0.14 мг/кг в слое 0–20 см почвы. В слое 20–40 см эти показатели составляли 0.44 и 0.02 мг/кг. Максимальное количество обменного калия в пахотном горизонте каштановых почв отмечено при внесении дозы навоза 40 т/га.

Необменный калий интенсивно расходовался из пахотного слоя почвы. Систематическое применение удобрений не позволило восстановить исходного уровня его содержания. Наименьшие его потери относительно исходного содержания отмечены в варианте с внесением 40 т навоза/га (–224 мг/кг), наибольшее – в контроле (–825 мг/кг). В подпахотном горизонте, напротив, отмечено увеличение содержания $K_{необм}$ относительно исходного состояния при применении удобрений. Максимальное приращение содержания этой формы происходило в варианте применения навоза 40 т/га, минимальное – в контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамзиков Г.П., Маслова И.Я., Жуков Г.А., Дзикович К.М. Калий в земледелии Сибири // Проблемы агрохимического сырья Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1985. С. 73–79.
2. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
3. Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н. Минералогический состав почв Бурятской АССР и содержание в них различных форм соединений калия // Почвенные ресурсы Забайкалья. Новосибирск: Наука, СО, 1989. С. 59–66.

4. *Абидуева Т.Е., Соколова Т.А.* Глинистые минералы и калийное состояние степных почв Западного Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 101 с.
5. *Лапухин Т.П.* Система применения удобрений в полевых севооборотах на каштановых почвах сухой степи Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул, 2000. 40 с.
6. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы. М.: Высш. шк., 1964. 398 с.
7. *Гамзиков Г.П.* Эффективное использование удобрений под полевые культуры на почвах Западной Сибири // *Агрохимические исследования в Сибири*. Научные основы использования и охраны земельных ресурсов Сибири. Новосибирск, 1984. С. 4–24.
8. Система земледелия Республики Бурятия. Улан-Удэ: БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2018. 349 с.
9. *Важенин И.Г.* Методы определения калия в почве // *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. С. 128–164.
10. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Либроком, 2009. 328 с.
11. *Якименко В.Н.* Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 16–24.
12. *Билтуев А.С., Лапухин Т.П., Будажапов Л.В.* Климат, плодородие почв и продуктивность зерновых культур в аридных условиях Забайкалья: состояние и прогноз. Улан-Удэ: Бурят. ГСХА, 2015. 141 с.
13. *Давлятишин И.Д., Лукманов А.А., Бадиков А.* Калий в пахотных почвах лесостепи // *Плодородие*. 2013. № 2 (71). С. 27–29.
14. *Sparks D.L.* Potassium dynamics in soils // *Adv. Soil Sci.* 1987. V. 6. P. 1–63.
15. *Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.

Potash State of Chestnut Soil with Prolonged Use of Fertilizers in the Dry Steppe of Transbaikalia

A. S. Biltuev^{a,#}, L. V. Budazhapov^a, A. K. Ulanov^a, and N. N. Darmaeva^a

^a*Buryat Scientific Research Institute of Agriculture
ul. Tretyakova 25z, Ulan-Ude 670045, Russia*

[#]*E-mail: burniish@inbox.ru*

In the conditions of the dry steppe of Transbaikalia, the effect of fertilizers on the potash state of soils was studied in a long-term stationary field experiment. The regularities of changes in the content of gross, non-exchangeable and exchangeable potassium from the type of fertilizers and the potassium balance in the field crop rotation are revealed. A significant increase in gross potassium was noted when organic fertilizers were applied in doses of 20–40 t/ha of manure, and the use of K40 against the background of P40K40 allowed to maintain its initial content. The reserves of non-exchangeable potassium decreased in the arable layer and increased in the sub-arable layer. The content of exchangeable potassium depended on the balance of the element in the crop rotation and the content of non-exchangeable potassium. An increase in the balance by 1 kg/ha of arable land led to an increase in the content of the exchange form by 0.09 mg/kg in the arable layer of the soil, and in the sub-arable layer – by 0.44 mg/kg. A strong dependence of the content of exchangeable and non-exchangeable forms of potassium was revealed. The greatest amount of exchangeable potassium in the arable horizon was observed when applying 40 t/ha of manure.

Key words: chestnut soil, long-term field experience, fertilizer system, potash state.