

С.Б. СОСОРОВА

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия, soelma_sosorova@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ КАЛИЯ ПОЧВАМИ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Рассматриваются закономерности сорбции калия из водного раствора KCl тремя типами почв (торфянисто-низинной, светло-каштановой, аллювиальной дерновой), сформированными в условиях Западного Забайкалья, и их обрабатываемыми аналогами. Сорбцию калия в почве измеряли в лабораторных условиях с помощью эксперимента, в котором почвы уравнивали раствором KCl с различной начальной концентрацией (0,5; 1,0; 3,0; 5,0 ммоль/л) в течение 24 ч. Полученные изотермы сорбции калия описывались уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха. Параметры данных уравнений указывают на неоднородность связи ионов калия с твердой фазой почв. Максимальное поглощение калия исследуемыми почвами составляло 53,2–87,8 % при исходной концентрации внесенного раствора KCl в 1 ммоль/л, при этом коэффициент распределения (K_d) калия между твердой и жидкой фазами исследуемых почв изменялся от 11,37 до 72,11 л/кг. Наибольшее значение K_d выявлено для торфянисто-низинной почвы и наименьшее для аллювиальной дерновой. Закономерности изменения K_d калия коррелируют со степенью его поглощения почвой. Величина максимальной сорбционной емкости калия почвами изменялась в верхних гумусовых горизонтах от 54,05 до 98,04, в нижних — от 35,71 до 100,0 ммоль/кг. Значения коэффициента K_L уравнения Ленгмюра в гумусовых горизонтах было немногим меньше (0,272–0,668 л/ммоль), чем в минеральных (0,102–1,511 л/ммоль). Это свидетельствует о том, что в минеральных горизонтах калий связывается прочнее. Коэффициент K_F уравнения Фрейндлиха в гумусовых горизонтах изменялся от 9,98 до 23,51 ммоль/кг, в минеральных — от 6,63 до 26,77 ммоль/кг. Установлено, что исследованные почвы характеризуются различной сорбционной активностью по отношению к калию и образуют убывающий ряд по уровню его поглощения: торфянисто-низинные > светло-каштановые > аллювиальные дерновые.

Ключевые слова: калий, изотерма, уравнение Ленгмюра, уравнение Фрейндлиха, коэффициент.

S.B. SOSOROVA

Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
670047, Ulan-Ude, ul. Sakhyanovoi, 6, Russia, soelma_sosorova@mail.ru

THE REGULARITIES OF POTASSIUM SORPTION BY SOILS IN WESTERN TRANSBAIKALIA

The regularities of potassium sorption from an aqueous solution of KCl were studied using three types of soils (peat lowland, light chestnut, and alluvial turf) formed in the conditions of Western Transbaikalia and their treated analogues. Potassium sorption in soil was measured in laboratory conditions using an experiment in which soils were balanced with a solution with different initial concentrations of KCl (0,5, 1,0, 3,0 and 5,0 mmol/L) for 24 h. The resulting potassium sorption isotherms were described by the Langmuir and Freundlich equations. The parameters of these equations indicate inhomogeneities of the bonds of potassium ions with the solid phase of soils. The maximum potassium uptake by the soils under study varied within 53,2–87,8 % at the initial concentration of the introduced solution of KCl in 1 mmol/L, while the distribution coefficient (K_d) of potassium between the solid and liquid phases of the soils used in the study varied from 11,37 to 72,11 L/kg. The highest value of K_d was found for peat-lowland soil and the lowest value for alluvial turf. The patterns of changes in potassium K_d correlate with the degree of its absorption by the soil. The maximum sorption capacity of potassium by the soils under study varied in the upper humus horizons from 54,05 to 98,04 mmol/kg, and in the lower horizons from 35,71 to 100,0 mmol/kg. The values of the K_L coefficient of the Langmuir equation in humus horizons were slightly less (0,272–0,668 L/mmol) than in mineral horizons (0,102–1,511 L/mmol), which indicates that potassium binds more strongly in mineral horizons. The coefficient K_F of the Freundlich equation in humus horizons varied from 9,98 to 23,51 mmol/kg, and in mineral horizons 6,63–26,77 mmol/kg. It was established that the soils under study are characterized by a different sorption activity with respect to potassium and form the following decreasing series according to the level of potassium absorption: peat lowland > light chestnut > alluvial turf.

Keywords: potassium, isotherm, Langmuir equation, Freundlich equation, coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Калий — важнейший элемент питания растений, его поведение в почве во многом определяется общим запасом форм элемента в почве и возможностью их перехода из одного почвенного состояния в другое. Подобные трансформации заключаются в способности ионов занимать различные по прочности связи с почвенной твердой фазой позиции и относятся к противоположно направленным обратимым процессам — фиксации (адсорбции) и мобилизации (десорбции). Изучение специфики процессов фиксации — мобилизации калия в конкретных почвенно-климатических условиях создает основу для эффективного регулирования плодородия почв [1].

Геохимические особенности поведения калия в почвах рассмотрены в работе [2]. Содержание, распределение и запасы калия в почвах Западного Забайкалья достаточно подробно изучены в [3–6]. Вместе с тем исследований по определению предельной емкости поглощения почвами региона калия почти не проводили. Цель настоящей работы — исследование сорбционных свойств почв региона по отношению к калию.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили светло-каштановые, аллювиальные дерновые и торфянисто-низинные почвы Западного Забайкалья (Республика Бурятия) (рис. 1). Разрезы 1И-18 (пашня под овощным севооборотом) и 2И-18 (целина) находятся в пригородной зоне Улан-Удэ, возле карьера Исток (Иволгинский район, $51^{\circ}47'05''$ с. ш., $107^{\circ}28'39''$ в. д., 503 м над ур. моря). Разрез 1К заложен на пашне под овощным севооборотом возле оз. Торма (Иволгинский район, $51^{\circ}33'38''$ с. ш., $107^{\circ}01'13''$ в. д., 566 м над ур. моря). Разрез 2К расположен в 100 м от разреза 1К на целинном участке. Разрезы Закалтус-1 и Закалтус-2 (пашня) заложены северо-западнее с. Закалтус Кабанского района ($52^{\circ}01'40''$ с. ш. $106^{\circ}34'10''$ в. д., 462 м над ур. моря), на краевой части осушенного болотного массива Калтусного прогиба в пределах Усть-Селенгинской впадины.

Светло-каштановые и аллювиальные дерновые почвы сформированы в буферной зоне Байкальской природной территории, а торфянисто-низинные — в центральной. Климат района исследования в целом характеризуется как резко континентальный с большими годовыми и суточными колебаниями температуры воздуха и с неравномерным распределением атмосферных осадков по сезонам года. Лето

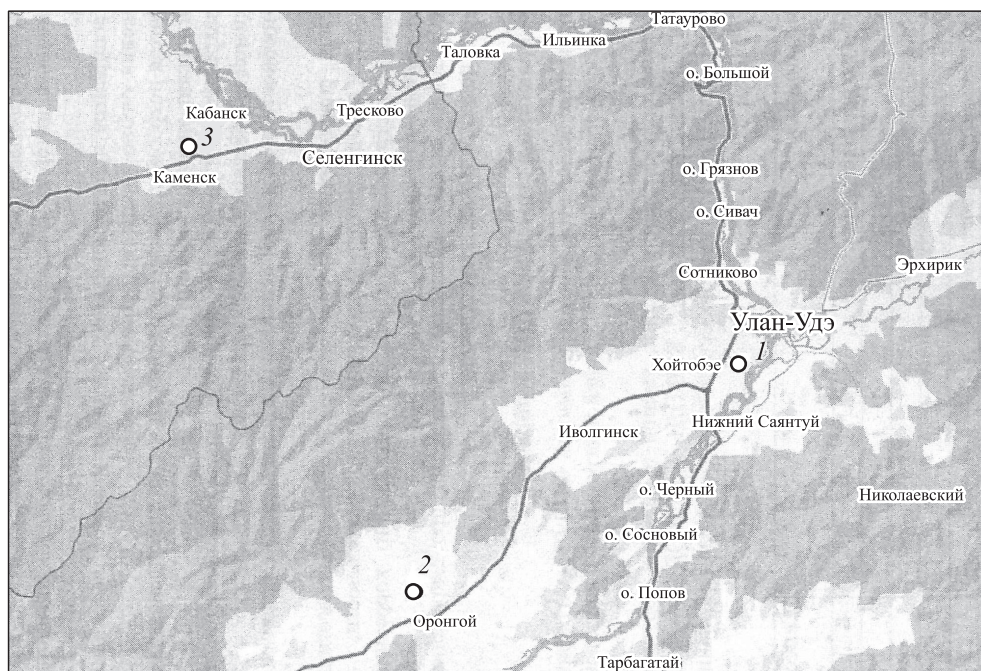


Рис. 1. Картограмма отбора проб.

Разрезы: 1 — 1И-18 и 2И-18, 2 — 1К и 2К, 3 — Закалтус-1 и Закалтус-2.

жаркое сухое (максимальная температура 38 °С), зима малоснежная холодная (минимальная температура –45 °С). Среднегодовая температура составляет –5 °С. Среднегодовое количество осадков — 250–300 мм, больше половины которых приходится на июль — август. Снежный покров устанавливается в середине октября. Сезонное промерзание достигает 2,5 м, местами сохраняется островная многолетняя мерзлота. Здесь развиты преимущественно интрузивные, вулканогенные, осадочные и метаморфические образования палеозоя и мезозоя [7].

Исследуемые аллювиальные дерновые и каштановые почвы сформированы на территории Иволгино-Удинской межгорной впадины забайкальского типа (рис. 2, 3). Впадина представляет собой обширное понижение, вытянутое с юго-запада на северо-восток и ограниченное с северо-запада хребтами Хамар-Дабана, с севера — хр. Улан-Бургасы, с юго-востока — хр. Цаган-Дабан. Рельеф поверхности представлен наклонными и увалистыми аккумулятивными равнинами, сложенными мощной толщей четвертичных песков, валунно-галечными отложениями [8].

Почвообразующими породами, на которых формируются каштановые почвы, являются мало-мощные толщи элюво-делювия плотных пород, содержащие их обломки и слабовыветренный щебень.



Рис. 2. Вид на ландшафт.

а — пригород Улан-Удэ, аллювиальная дерновая почва; б — оз. Торма, светло-каштановая почва.

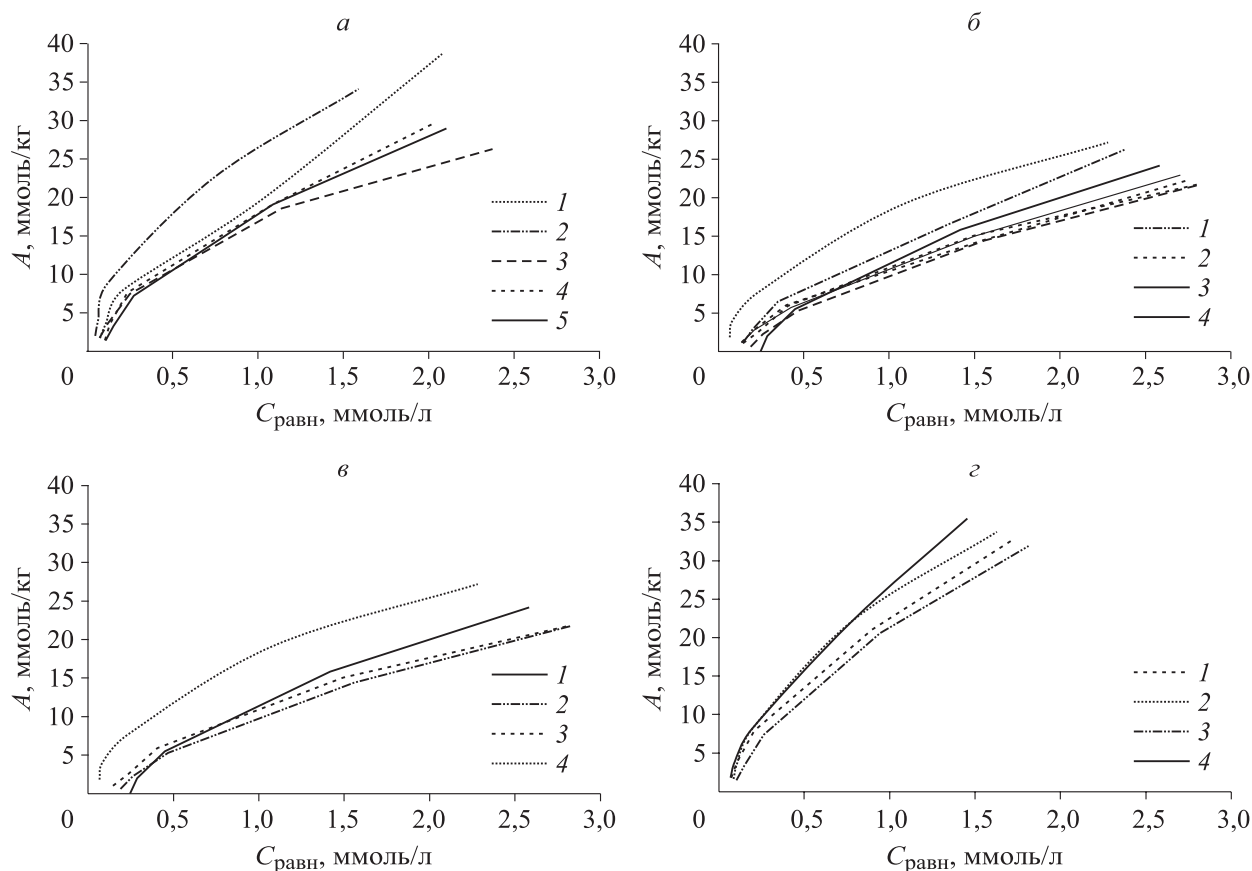


Рис. 3. Изотермы сорбции калия почвами Западного Забайкалья.

Разрезы (глубина, см): а — светло-каштановая почва: 1 — 1К (0–22), 2 — 1К (22–55), 3 — 1К (55–64), 4 — 2К (0–12), 5 — 2К (12–22); б — аллювиальная дерновая почва: 1 — 1И-18 (0–25 см), 2 — 1И-18 (25–60 см), 3 — 1И-18 (60–87 см); в — аллювиальная дерновая почва: 1 — 2И-18 (0–15), 2 — 2И-18 (15–26), 3 — 2И-18 (26–35), 4 — 2И-18 (38–45); г — торфянисто-низинная почва: 1 — Закалтус-1 (0–28), 2 — Закалтус-1 (28–70), 3 — Закалтус-2 (0–35), 4 — Закалтус-2 (35–86).

В межгорных котловинах и на широких участках речных долин почвообразование происходит на мощной толще рыхлых наносов [9]. Растительность, представленная степными сообществами, на некоторых участках трансформирована под воздействием антропогенного фактора (распашка).

Болотный массив Калтусного прогиба находится в пределах Усть-Селенгинской впадины. Поверхность ее равнины слабо расчленена и имеет холмисто-увалистый тип рельефа. Морфологически Калтусный прогиб представляет собой ровную заболоченную низину с небольшими озерами, старицами и протоками, среди которых в виде мелких островков прослеживаются остатки второй надпойменной террасы р. Селенги высотой до 5–7 м. Почти повсеместно развит кочкообразный микрорельеф [10].

По данным А.А. Адушинова и Г.Ф. Редюка (1979 г.) (по [11]), под торфами в Калтусном прогибе до глубины 5–13 м последовательно залегают аллювиальные суглинки, супеси и ниже 10–13 м подстилаются гравийно-галечными отложениями с песком. Резко континентальный климат, характерный для всего Забайкалья, в Кабанском районе несколько смягчается близостью оз. Байкал, что выражается в более выровненном температурном режиме района, а также в количестве выпадающих осадков. Многолетняя среднегодовая температура воздуха здесь составляет $-0,9^{\circ}\text{C}$. Годовая сумма осадков — 510 мм. Количество осадков по годам может меняться в значительных пределах. На осушенной части болота минерализация вод в мелиоративном канале составляет 186 мг/л при значительном содержании органического вещества.

Почвы Калтусного понижения, по данным [12], представлены торфяными болотными низинными и торфяными болотными низинными торфяно-глеевыми почвами. Они формируются под травянистыми, преимущественно осоковыми, ассоциациями. На осушенной части естественная разнотравно-

злаково-осоковая растительность сменяется луговой мезофитной и сеянными многолетними травами. Отмечается активное разложение и гумификация торфа. Болотные низинные торфяно-глеевые почвы, контактирующие с почвами террас, имеют мощность торфяного горизонта 20–30 см, ниже которого формируется сизый глеевый горизонт. На осушенной части болот глеевый горизонт окрашен в охристые тона.

Агрохимические свойства почв определялись по общепринятой методике [13]. Показатели агрохимических свойств исследуемых почв приведены в табл. 1. Почвы Бурятии характеризуются высоким валовым содержанием калия и низким содержанием подвижного калия. Содержание обменного калия для большинства почв каштанового типа находится на уровне низкой и средней обеспеченности, поэтому эффективно внесение калийных удобрений [14].

Внутрипрофильная дифференциация распределения подвижного калия выражена заметно. В частности, верхние горизонты почв выделяются накоплением этих форм калия по сравнению с нижележащими, что, вероятно, связано с процессами биологической аккумуляции и внесением удобрений. Среди доступных для растений соединений калия преобладают необменные формы, которые постоянно пополняют запасы обменного калия, усвояемого растениями [4].

Как отмечается в [15], каштановые почвы исследуемого района характеризуются легкосуглинистым гранулометрическим составом, невысоким содержанием илистой фракции (8–14 %), щебнистостью, небольшой мощностью гумусового горизонта, резким изменением гумусовой окраски, в составе поглощенных оснований преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+} . Характерная особенность минералогического состава песчаной фракции каштановых почв — преобладание полевых шпатов. Остальные минералы — магнетит, сфен, эпидот — содержатся в незначительном количестве. Илистая фракция каштановых почв представлена гидрослюдами, монтмориллонитом, вермикулитом, каолинитом.

Торфяные почвы Калтусного прогиба подстилаются оглеенными суглинками, супесями, мелкими песками. Их минералогический состав сформирован кварцем, полевыми шпатами, роговой обманкой, минералами группы эпидота, слюдой [16]. По данным [17], содержание минералов следующее: кварц — 60–70 %, полевые шпаты — 15–20 %, слюды — 5–10 %, а на долю хромита, граната, оливина, сфена, турмалина, рутила, дистена, силлиманита, амфиболов, эпидота, пироксенов приходится не более 5–8 %.

Концентрация органического углерода в органогенном горизонте торфянисто-низинных почв относительно высокая, а в минеральных горизонтах низкая. Реакция среды слабокислая (см. табл. 1). Отмечались высокие показатели емкости катионного обмена и преобладание Ca^{2+} в составе поглощенных оснований в верхнем и их снижение в нижних горизонтах [11].

Таблица 1

Свойства почв Западного Забайкалья

Почва (разрез)	Горизонт	Глубина, см	$\text{pH}_{\text{водн}}$	Гумус, %	Ca^{2+}	Mg^{2+}	P_2O_5	K_2O
					мг/экв на 100 г		мг/кг, по Мачигину	
АК (1К)	$A_{\text{пах}}$	0–22	7,6	0,67	6,8	1,6	28	80
	B	22–55	8,1	0,29	7,3	2,0	20	46
К (2К)	A	0–12	7,8	1,05	8,5	1,5	28	76
	B	12–22	7,9	0,91	13,1	2,7	64	36
ААД (1И-18)	$A_{\text{пах}}$	0–25(45)	7,2	1,51	9,6	14,4	163	90
	$A_{\text{пах}}B$	25(45)–60	7,1	0,43	4,2	6,3	84	52
АД (2И-18)	A	0–15	7,5	1,08	11,8	11,8	157	180
	B	15–26 (29)	7,6	0,20	6,2	4,1	11	54
ТН (Закалтус-1)	T	0–28	5,9	4,98	14,4	5,1	28	82
	Bg	28–70	5,8	0,38	9,0	2,5	15	64
АТН (Закалтус-2)	T	0–35	5,8	3,95	18,4	4,1	56	98
	Bg	35–86	5,8	0,62	10,4	7,1	17	120

Примечание. Здесь и в табл. 2: АК — агро-светло-каштановая, К — светло-каштановая, ААД — агроаллювиальная дерновая, АД — аллювиальная дерновая, ТН — аллювиальная торфянисто-низинная осушенная, АТН — агроаллювиальная торфянисто-низинная осушенная.

Сорбционные свойства почв определялись в лабораторных условиях в диапазоне концентрации раствора KCl 0,5–5,0 ммоль/л при соотношении почвы к раствору 1:10. Время взаимодействия раствора с почвой — 24 ч. Количество поглощенного калия определялось по разнице его концентрации в исходном и равновесном растворах. По результатам эксперимента построены изотермы адсорбции и рассчитаны параметры сорбции по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха.

Изотерма адсорбции Ленгмюра является наиболее известной среди всех изотерм, описывающих сорбционное равновесие:

$$A = A_{\max} \frac{K_L C_{\text{равн}}}{1 + K_L C_{\text{равн}}},$$

где A — величина адсорбции, т. е. количество адсорбата в единице массы адсорбента в состоянии равновесия, ммоль/кг; $A_{\max}$ — значение предельной адсорбции в единице массы адсорбента, ммоль/кг; $C_{\text{равн}}$ — равновесная концентрация ионов в растворе, ммоль/л; K_L — константа адсорбционного равновесия, зависящая от энергии адсорбции, л/ммоль.

Для построения изотермы уравнение представлено в линейном виде:

$$\frac{C}{A} = \frac{1}{A_{\max} K_L} + \frac{1}{A_{\max}} \cdot C_{\text{равн}}.$$

Постоянные $A_{\max}$ и K_L определяют из наклона и отсекаемого отрезка линейной зависимости. Модель изотермы Ленгмюра предполагает однородность сорбционных центров с полной монослойной адсорбцией растворенных.

Уравнение Фрейндлиха представляет собой эмпирическую зависимость между количеством вещества, адсорбированного на твердой поверхности, и его равновесной концентрацией. Данная модель описывает поглощение ионов на гетерогенной поверхности. Изотерма адсорбции Фрейндлиха математически выражается как

$$\frac{x}{m} = K_F C^{1/n},$$

где x — масса адсорбата, моль; m — масса адсорбента, кг; C — равновесная концентрация адсорбата в объеме раствора, ммоль/л; K_F и n — константы для данного адсорбата и адсорбента при данной температуре.

В линейной форме данное уравнение имеет следующий вид:

$$\log \frac{x}{m} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C.$$

Физический смысл K_F в том, что она равна величине адсорбции при равновесной концентрации, равной единице: если $C_{\text{равн}} = 1$ моль/л, то $K_F = A$.

Характеристику межфазного распределения ионов выражают через коэффициент распределения, который устанавливает соотношение между равновесными концентрациями частиц в сорбенте и в растворе [18]:

$$K_d = C_{\text{тв}}/C_{\text{равн}},$$

где K_d — коэффициент распределения, л/кг; $C_{\text{тв}}$ — равновесная концентрация ионов в сорбенте (в твердой фазе), ммоль/кг; $C_{\text{равн}}$ — равновесная концентрация ионов в растворе, ммоль/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сорбцию калия исследуемыми почвами можно описать изотермой сорбции L -типа (рис. 1), что свидетельствует об отсутствии сильной конкуренции между растворителем и сорбатом за центры сорбции [19].

Параметры сорбции калия рассматриваемыми почвами удовлетворительно описываются уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха, однако коэффициенты аппроксимации (R^2) уравнения Фрейндлиха выше (табл. 2). Применить уравнение Ленгмюра для определения параметров сорбции калия в гумусовом горизонте аллювиальной дерновой почвы не представлялось возможным из-за низкого коэффициента аппроксимации R^2 , что, вероятно, связано с высоким содержанием подвижного калия и его десорбцией при низких концентрациях KCl.

Таблица 2

Параметры сорбции калия почвой

Почва (разрез)	Глубина, см	Поглощено при исходной концентрации КСl равной 1 ммоль/л, %	K_d при исходной концентрации КСl равной 1 ммоль/л, л/кг	Параметры уравнения Ленгмюра			Параметры уравнения Фрейндлиха		
				$A_{\max}$, ммоль/кг	K_L , л/ммоль	R^2	K_F , ммоль/кг	n	R^2
АК (1К)	0–22	78,9	37,56	72,46	0,471	0,7735	23,51	0,8090	0,9712
	22–55	87,8	72,11	46,95	1,511	0,9943	26,77	0,6294	0,9708
	55–64	74,6	29,39	38,76	0,863	0,9943	16,07	0,6584	0,9829
К (2К)	0–12	76,1	31,93	54,05	0,566	0,9230	18,12	0,7440	0,9760
	12–22	72,3	26,11	64,94	0,385	0,8978	17,06	0,8044	0,9784
ААД (1И-18)	0–25	65,1	18,68	72,46	0,234	0,7617	13,03	0,8466	0,9783
	25–60	60,3	15,16	44,84	0,343	0,9358	15,92	0,7677	0,9860
	60–87	57,4	13,49	54,64	0,262	0,9821	10,59	0,8135	0,9954
АД (2И-18)	0–15	55,0	12,22	—	—	0,041	9,88	1,0760	0,9573
	15–26	53,2	11,37	100,00	0,102	0,4592	6,63	0,4652	0,8038
	26–38	59,4	14,61	52,91	0,256	0,8039	10,14	0,8284	0,9681
	38–45	76,8	33,09	35,71	1,333	0,9844	17,34	0,6893	0,9471
ТН (Закалтус-1)	0–28	79,2	38,15	59,88	0,668	0,9704	22,62	0,7468	0,9906
	28–70	80,8	42,00	68,03	0,610	0,9432	25,07	0,7863	0,9792
АТН (Закалтус-2)	0–35	73,7	28,05	98,04	0,272	0,7948	20,44	0,8749	0,9841
	35–86	80,9	42,34	35,71	1,267	0,9844	13,63	0,3508	0,8132

Примечание. Прочерк — нет данных.

Экспериментальные данные показывают, что сорбционная способность торфянисто-низинных почв немногим выше, чем у аллювиальных дерновых и светло-каштановых. Это связано с различием их свойств, минералогического и гранулометрического состава, а также с местоположением в ландшафте. Так, в работе [20] при сравнении сорбционных свойств почв указывается на увеличение сорбции калия при утяжелении гранулометрического состава почвы. Наибольшей способностью к закреплению калия обладают фракции <1 мкм. При этом максимум ее приходится на коллоиды, минимум — на фракцию 1–10 мкм.

Применение удобрений уменьшает калийфиксирующую способность как почвы в целом, так и ее отдельных фракций [21]. При взаимодействии калия с почвами, наряду с повышением количества подвижного калия, происходит его необменное поглощение почвенными коллоидами, фиксация [22]. Некоторое увеличение фиксации калия из удобрений наблюдается в почвах тяжелого гранулометрического состава при длительном применении навоза и при известковании. Однако количество фиксированного калия редко превышает его накопление в обменной форме. В черноземах высокая насыщенность основаниями препятствует вхождению калия в поглощающий комплекс. Количество обменного калия в связи с этим изменяется мало. Насыщенность почвы органическим веществом, преобладание монтмориллонита среди глинистых минералов в условиях недостаточного увлажнения и сравнительно высоких температур способствуют необменному поглощению калия в пахотном горизонте. Однако процесс этот в дерново-подзолистых почвах выражен слабо. Объясняется это тем, что кислая реакция почвенного раствора, ненасыщенность основаниями, значительное количество аммония, небольшое содержание органического вещества и повышенная влажность создают неблагоприятные условия для фиксации калия. Поэтому длительное применение удобрений не приводит к существенному увеличению содержания необменного калия, а в отдельных случаях его количество даже снижается.

Необменное поглощение калия свойственно глинистым минералам монтмориллонитовой группы и группы гидрослюд, имеющим трехслойную разбухающую решетку. Поэтому размер фиксации К почвами в сильной степени зависит от их минералогического состава: чем больше в почве содержится минералов монтмориллонитовой группы и гидрослюд, тем сильнее фиксация. Песчаные и супесчаные почвы калия фиксируют меньше, чем средне- и тяжелосуглинистые [23].

Механизм фиксации следующий: катионы К проникают в межпакетные пространства, когда они имеют наибольшие размеры (в состоянии набухания), и в сетке кислородных атомов тетраэдрических слоев занимают гексагональные пустоты, притягивая к себе оба отрицательно заряженных кислородных слоя, в результате чего оказываются в замкнутом пространстве. Высушивание почвы, особенно чередующееся с увлажнением, может значительно усиливать процессы фиксации К. Поэтому калийные удобрения нецелесообразно вносить в верхний, часто пересыхающий слой почвы [24].

Максимальное поглощение калия исследуемыми почвами составляло 53,2–87,8 % при исходной концентрации внесенного раствора КСl 1 ммоль/л (см. табл. 2). Наименьшее поглощение выявлено в аллювиальной дерновой почве (53,2–65,1 %), а наибольшее — в торфянисто-низинной (73,7–80,9 %), что обусловлено в основном их гранулометрическим составом и содержанием органического вещества. При концентрациях КСl, отличных от 1 ммоль/л, поглощение калия почвой меньше. Возможно, это связано с процессами десорбции при меньшей концентрации КСl и заполнением сорбционных центров при большей. При увеличении содержания калия в растворе свыше 5 ммоль/л выявлено снижение его поглощения исследуемыми почвами с последующим резким снижением при концентрации 10 ммоль/л. Таким образом, с увеличением концентрации ионов калия в растворе от 5 ммоль/л уменьшается его количество, сорбированное твердой фазой почвы.

По данным [24], необменное поглощение (фиксация) калия из внесенных удобрений составляет от 14 до 82 %. Установлено, что каштановые почвы необменно закрепляли К до 44 %, а серые лесные оподзоленные — до 34 % [15]. В работе [25] при изучении почв в зоне Сиды (Южная Эфиопия) отмечается, что в среднем количество адсорбированного почвами калия варьировалось от 29,2 до 67,82 % от добавленного К. Значительная положительная взаимосвязь существовала между долей адсорбированного калия и емкостью катионного обмена, величиной рН, содержанием глины. В [26] подчеркивается, что количество адсорбированного калия увеличивалось с повышением рН и исходной концентрации.

Из данных табл. 2 видно, что коэффициент распределения (K_d) калия между твердой и жидкой фазами исследуемых почв изменялся от 11,37 до 72,11 л/кг. Наибольшее значение K_d выявлено для торфянисто-низинной почвы, наименьшее — для аллювиальной дерновой, т. е. чем выше величина K_d , тем больше калия сорбируется почвой. Закономерности изменения K_d калия коррелируют со степенью его поглощения почвой. Величина предельной емкости сорбции калия изменялась в верхних гумусовых горизонтах от 54,05 до 98,04 ммоль/кг, в нижних горизонтах — от 35,71 до 100,0 ммоль/кг (см. табл. 2).

Значение коэффициента K_L в уравнении Ленгмюра для гумусовых горизонтов было немногим меньше, чем для минеральных, что свидетельствует о том, что в минеральных горизонтах связи К с твердой фазой почвы прочнее. Эти данные согласуются с выводами [27] о том, что калий в нормальных торфяных почвах обладает значительной подвижностью, связанной с непрочной фиксацией его торфом, органической природой коллоидов поглощающего комплекса. Значение коэффициента K_F в уравнении Фрейндлиха для гумусовых горизонтов изменялось от 9,98 до 23,51 ммоль/кг, в минеральных — от 6,63 до 26,77 ммоль/кг (см. табл. 2). Очевидно, что сорбция калия почвой из раствора с переменными его концентрациями протекает на разных типах сорбционных мест с различной прочностью связи К с твердой фазой почвы.

Таким образом, исследованные почвы проявляют различную сорбционную активность по отношению к калию и образуют убывающий ряд по уровню его поглощения: торфянисто-низинные > светло-каштановые > аллювиальные дерновые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы сорбции калия из водного раствора хлористого калия почвой удовлетворительно описываются уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха. Параметры данных уравнений указывают на степень неоднородности связей калия с твердой фазой почв.

Максимальное поглощение калия исследуемыми почвами составляло 53,2–87,8 % при исходной концентрации внесенного раствора КСl 1 ммоль/л, при этом коэффициент распределения (K_d) калия между твердой и жидкой фазами исследуемых почв варьировал от 11,37 до 72,11 л/кг. Наибольшее значение K_d выявлено для торфянисто-низинной почвы и наименьшее — для аллювиальной дерновой. Закономерности изменения K_d калия коррелируют со степенью его поглощения почвой.

Величина предельной емкости сорбции калия исследуемыми почвами изменялась в верхних гумусовых горизонтах от 54,05 до 98,04 ммоль/кг, в нижних горизонтах — от 35,71 до 100,0 ммоль/кг.

Значения коэффициента K_L в уравнении Ленгмюра для гумусовых горизонтов варьировали от 0,272 до 0,668 л/моль, для минеральных — от 0,102 до 1,511 л/ммоль. Это позволяет сделать вывод, что в минеральных горизонтах калий связывается прочнее. Коэффициент K_F в уравнении Фрейндлиха для гумусовых горизонтов составлял 9,98–23,51 ммоль/кг, для минеральных — 6,63–26,77 ммоль/кг.

Данное различие обусловлено и свойствами почв, и их положением в ландшафте. Так, торфянисто-низинная почва под осоково-травянистой растительностью на аллювиальных отложениях, занимающая в ландшафте супераквальную позицию, обладает относительно высокими сорбционными свойствами по отношению к калию. У почв, формирующихся под степной растительностью на рыхлых, часто щебнистых, отложениях, маломощных толщах элюво-делювия плотных пород и занимающих аккумулятивные (дерновая аллювиальная) и трансаккумулятивные (светло-каштановая) позиции в ландшафте, эти показатели ниже.

Значения сорбции калия в пахотных горизонтах агроаллювиальной дерновой и агро-светло-каштановой почв были несколько выше, а у агро-торфянисто-низинной почвы — ниже по сравнению с сорбцией калия в гумусовых горизонтах целинных аналогов. В целом исследованные почвы по сорбционной способности в отношении калия составляют следующий убывающий ряд: торфянисто-низинные, светло-каштановые, аллювиальные дерновые.

Работа выполнена в рамках госзадания (0271–222021–0004, FWSM–2021–0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якименко В.Н. Фиксация калия и аммония почвой агроценозов // *Агрохимия*. — 2011. — № 8. — С. 3–7.
2. Середина В.П. Геохимические особенности поведения калия в почвах // *Вестн. Том. ун-та. Биология*. — 2007. — № 1. — С. 106–118.
3. Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Меркушева М.Г., Абашеева Н.Е. Эколого-агрохимические основы повышения плодородия аллювиальных луговых почв. — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. научн. центра СО РАН, 2001. — 116 с.
4. Пигарева Н.Н., Пьянкова Н.А. Калийный фонд почв Бурятии // *Плодородие*. — 2009. — № 3. — С. 8–9.
5. Рузавин Ю.Н., Чимитдоржиева И.Б., Норбованжилов Р.Д., Тарасова Л.А. Изменение содержания форм калия при длительном сельскохозяйственном использовании черноземных почв Республики Бурятия // *АгроЭко-Инфо*. — 2020. — № 4. — 10 с.
6. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н. Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // *Агрохимия*. — 2020. — № 3. — С. 3–10.
7. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200 000 по листу М-48-VI Селенгинской серии / Сост. В.С. Платов, В.Г. Терещенков, А.А. Савченко, С.М. Бусук, Г.Б. Аносова, С.А. Полянский. — М.: СПб., 2000. — 156 с.
8. Базаров Д.Б. Четвертичные отложения и основные этапы развития рельефа Селенгинского среднегорья. — Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1968. — 166 с.
9. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья — М.: Наука, 1964. — 315 с.
10. Пашинова Н.В., Цыдыпова С.Б., Балданов Н.Д. Проектирование рыбопродуктивного комплекса в Кабанском районе Республики Бурятия // *Инновационное развитие АПК Байкальского региона: Материалы Всерос. (национальной) науч.-практ. конференции, посвященной 90-летию Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. — Улан-Удэ, 2021. — С. 241–245.
11. Гынинова А.Б., Шоба С.А., Балсанова Л.Д., Гынинова Б.Д. Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия). — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. — 344 с.
12. Гынинова А.Б., Корсунов В.М., Балсанова Л.Д., Бешенцев А.Н., Убугунова В.И., Гынинова Б.Д. Почвенный покров Селенгинского дельтового района [Электронный ресурс]. — <http://bic.iwlearn.org/ru/dokumenty/dokumen-tu/publikacii/pochvennyi-pokrov> (дата обращения 20.10.2022).
13. Агрохимические методы исследования почв / Отв. ред. А.В. Соколов. — М.: Наука, 1975. — 656 с.
14. Лапухин Т.П. Система применения удобрений в полевых севооборотах на каштановых почвах сухой степи Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра сельскохозяйств. наук. — Барнаул, 2000. — 32 с.
15. Загузина Н.А., Рузавин Ю.Н. Минералогический состав почв Бурятской АССР и содержание в них различных форм соединений калия // *Почвенные ресурсы Забайкалья*. — Новосибирск: Наука, 1989. — С. 59–66.
16. Болдырев Г.С. Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. — Новосибирск: Наука, 1982. — 182 с.
17. Хажеева З.И. Вещественный и дисперсный состав седиментационных отложений проток дельты р. Селенга // *Горный информ.-аналит. бюллетень*. — 2008. — № 5. — С. 384–386.
18. Зубакова Л.Б., Тевлина А.С., Даванков А.Б. Синтетические ионообменные материалы. — М.: Химия, 1978. — 184 с.

19. **Park H., Singhal N., Jho E.H.** Lithium sorption properties of HMnO in seawater and wastewater // *Water Research*. — 2015. — Vol. 87. — P. 320–327.
20. **Петрофанов В.Л.** Подвижность калия гранулометрических фракций дерновоподзолистых почв и чернозема: Автореф. дис. ... канд. сельскохозяйств. наук. — М., 2012. — 23 с.
21. **Петрофанов В.Л.** Влияние длительного применения удобрений на сорбцию–десорбцию калия гранулометрическими фракциями дерновоподзолистой почвы // *Бюллетень Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. — 2009. — № 64. — С. 73–80.
22. **Жукова Л.М.** Накопление и превращение калия в почвах разного типа при систематическом применении удобрений: Автореф. дис. ... канд. сельскохозяйств. наук. — М., 1966. — 30 с.
23. **Взаимодействие** калийных удобрений с почвой [Электронный ресурс]. — <https://helpiks.org/6-35794.html> (дата обращения 12.09.2022)].
24. **Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.** Агрохимия: Учебник для студентов высш. учебн. заведений. — М.: Колос, 2002. — 584 с.
25. **Kibreselassie D.A., Tekalign M.A., Wassie H.W., Bizuayehu T.A.** Potassium adsorption characteristics of five different textured soils under enset (*Ensete ventricosum* cheesman) farming systems of Sidama zone, South Ethiopia // *JSSEM*. — 2018. — Vol. 9 (1). — P. 1–12. — DOI: 10.5897/JSSEM2017.0666
26. **Mitsios J., Dimirkou A., Ioannou A., Paschalidis Ch., Doula M.** The sorption isotherms of potassium // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. — 1994. — Vol. 25. — P. 9–10.
27. **Моторин А.С.** Калий в осушаемых торфяных почвах Северного Зауралья // *Сиб. вестн. сельскохозяйств. науки*. — 2014. — № 2. — С. 5–12.

Поступила в редакцию 21.09.2022

После доработки 05.12.2022

Принята к публикации 05.04.2023