

На правах рукописи



Петрофанов Владислав Леонидович

**ПОДВИЖНОСТЬ КАЛИЯ
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ ДЕРНОВО-
ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ И ЧЕРНОЗЕМА**

Специальность 03.02.13 – Почвоведение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Москва – 2012

Работа выполнена в лаборатории химии и физико-химии почв ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии

Научный руководитель: Доктор сельскохозяйственных наук, ст.н.с. **Фрид А.С.**

**Официальные
оппоненты:**

Чижикова Н.П. – док. с.-х. наук, проф., ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, зав. лаборатории минералогии и микроморфологии почв

Павлов К.В. – канд. биол. наук, факультет почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова, каф. агрохимии и биохимии растений, ассистент

Ведущая организация:

ФГОУ ВПО Российский Государственный Аграрный Университет – Московская Сельскохозяйственная Академия им. К.А. Тимирязева

Защита состоится «19» апреля 2012 г. в 11⁰⁰ в актовом зале на заседании диссертационного совета Д.006.053.01 при ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии: г. Москва, Пыжевский пер., д. 7., стр.2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии

Автореферат разослан «15» марта 2012 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: 119017 г. Москва, Пыжевский пер., д. 7., стр.2, Ученый совет. Факс: (495) 951-50-37, e-mail: lubimova@agro.geonet.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор сельскохозяйственных наук



И.Н. Любимова

Актуальность. Калий является одним из основных биофильных элементов, который отвечает за плодородие и производительную способность почв. Несмотря на большое количество работ, посвященных калийному состоянию почв, поведение калия в почвах остается в центре внимания почвоведов. Одной из наиболее дискутируемых является проблема формирования калий-снабжающей способности почв.

Существенное влияние на подвижность калия в почве и доступность его растениям оказывают взаимодействие между раствором и твердой фазой почв. Скорость и направление реакций между растворимым, обменным калием и калием почвенных минералов определяют судьбу калия в почве – будет ли он выщелочен в нижележащие горизонты, использован растениями или превращен в необменные, труднодоступные растениям формы. Однако, в то время как различным аспектам ионного обмена почвенного калия посвящено большое количество исследований, работы по изучению кинетики реакций калия в почве ограничены. Существует ряд публикаций, посвященных кинетике десорбции калия из почв (*Барсова и др., 1992; Соколова и др., 1999; Bugarin Montoya R. et al., 2007; Carski et al., 1985; Dhillon et al., 1989, 1990; Eick et al., 1990; Elkhatib et al., 1988; Jalali, 2006; Jardine et al., 1984; Martin et al., 1983; Sparks, 1985, 1986; Srinivasarao et al., 2006*), а также посвященных изучению кинетики реакций в чистых глинистых системах (*Feigenbaum et al., 1981; Huang et al., 1968, 1989; Jackson, 1964; Morland, 1968; Pedro, 1973; Rasmussen, 1972; Reed et al., 1962; von Reichenbach, 1969; Rich, 1968, 1972; Schroeder, 1978; Sparks et al., 1985; Zhou, et al., 2007*). Изучению же кинетики десорбции калия из гранулометрических фракций почв, где поглощающий комплекс имеет сложную структуру, в которой тесным образом связаны глинистые минералы, оксиды, органическое вещество, посвящено очень мало работ (*Cox et al., 1997; Mengel et al., 1998; Meurer et al., 2001; Talibudeen et al. 1972*). Очень небольшое количество работ (*Козлова и др., 2000; Пивоварова, 1988; Сергеенко, 1986; Скоропанова, 1989, Якименко, 2003*) посвящено изучению десорбции калия из гранулометрических фракций, в которых были использованы различные вытяжки (1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 0,5 н. уксусная кислота, 1М HNO_3 , 0,01 М HCl , низкомолекулярные органические кислоты, Н- и Са-смолы, 0,01 М CaCl_2). Практически не изучена кинетика и динамика выхода калия из почв и их гранулометрических фракций при различных уровнях обеспеченности питательными элементами. Недостаточно данных для оценки роли отдельных гранулометрических фракций в снабжении растений этим элементом.

Цель. Оценить содержание подвижных форм калия и особенности динамики его десорбции из пахотных горизонтов дерново-подзолистых почв и чернозема в целом и их гранулометрических фракций при различных системах удобрения.

Основные задачи исследования: 1) Дать оценку содержания подвижных форм калия для почв и их гранулометрических фракций; 2) Выявить долевое участие отдельных гранулометрических фракций в общем содержании подвижных форм калия; 3) Изучить динамику десорбции калия из образцов почв и гранулометрических фракций на основе использования 0,01 М раствора CaCl_2 ; 4) Изучить связь показателей калийного состояния и интенсивности десорбции со свойствами почв, гранулометрических фракций и системами удобрений; 5) оценить потенциальную обеспеченность растений калием с учетом распределения элемента по легко- и труднодоступным обменным позициям.

Научная новизна.

1) Впервые изучены параметры десорбции калия из гранулометрических фракций (включая коллоидную и предколлоидную) трех почв, функционирующих в условиях длительных полевых опытов с удобрениями и различающихся по гранулометрическому составу;

2) Получены данные по содержанию подвижных форм калия гранулометрических фракций указанных почв;

3) Оценены доли калия в планарных и специфических позициях для гранулометрических фракций в зависимости от почвы и их уровня обеспеченности калием.

Практическая значимость. 1) Полученные данные позволяют оценить относительную скорость агроистощения изученных почв по калию при сельскохозяйственном использовании и гранулометрические фракции, лимитирующие этот процесс; 2) Дана количественная оценка обеспеченности изученных почв калием для минимальных и оптимальных урожайностей различных сельскохозяйственных культур с учетом распределения десорбируемого калия по различным позициям минералов гранулометрических фракций.

Апробация работы. Результаты докладывались в 2007, 2008, 2009, 2010 гг. на ученом совете ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии; на XVII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 2010 г.; а также на расширенном заседании лаборатории химии и физикохимии почв в 2011 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи, 1 тезисы. Из них 1 статья в реферируемом издании, рекомендуемом ВАК.

Объем и структура работы. Работа состоит из 5 глав, выводов, списка литературы из 252 источников (из них 149 на иностранных языках). Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, в том числе содержит 25 таблиц и 11 рисунков.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность М.Ш. Шаймухаметову за доверие продолжения его трудов и идей, постановку целей и задач исследований; А.С. Фриду за неоценимую всестороннюю поддержку и помощь в рассмотрении и интерпретации полученного материала; Н.Б. Хитрову, Л.С. Травниковой за консультации, планирование, оценку работы и обсуждение ее результатов; Т.А. Соколовой, И.И. Толпеште, О.Б. Роговой, Р.Ф. Байбекову, Н.Ф. Ганжаре, Б.А. Борисову, Д.Ю. Колтыхову, В.И. Топтыгиной, А.В. Горобцу, Н.С. Никитиной, Р.В. Гришиной, А.А. Изосимову, Е.Д. Зверевой за содействие при выполнении экспериментальных работ.

Содержание работы

Глава 1. Обзор развития исследования подвижности калия в почвах

На основании анализа отечественной и зарубежной литературы в главе отражены известные на данный момент сведения о роли гранулометрических фракций, их минералогического состава и применения удобрений в подвижности калия в почвах. Работы по изучению содержания калия в гранулометрических фракциях в нашей стране начаты Важениным (1959), Горбуновым (1936, 1959) и Пчелкиным (1966). В последствии направление было поддержано Сергеевко (1986), Пивоваровой (1988), Скоропановой (1989), Козловой (2001), Якименко (2003), которые исследовали различные формы калия в гранулометрических частицах почв. Аналогичные работы по изучению содержания калия в гранулометрических фракциях проводили за рубежом МакКаллистер (McCallister, 1987), Мехди с соавт. (Mehdi et al., 1998), Ванг Ю Жанг (Wang Yu Zhang et al., 2001). Однако, если за рубежом есть работы по изучению кинетики и динамики десорбции калия из гранулометрических фракций (Talibudeen et al. 1972; Cox et al., 1997; Mengel et al., 1998; Meurer et al., 2001), в нашей стране такие данные отсутствуют. При этом, как у нас в стране, так и за рубежом до сих пор нет данных по кинетике и динамике десорбции калия из гранулометрических фракций

почв, функционирующих при разном уровне внесения удобрений и обеспеченности почв калием.

Глава 2. Характеристика объектов и методы исследований

2.1 Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования были использованы образцы почв пахотных горизонтов (0-20 см) трех длительных опытов с удобрениями. Все почвы, использованные в опытах, периодически известковались для поддержания нейтральной реакции среды.

1) Опыт ТСХА, заложенный в 1912 г. Д.Н. Прянишниковым на опытном поле Дояренко (дерново-подзолистая супесчаная почва). Варианты опыта на поле № 133, которые были использованы: 1. Без удобрений; 2. N100P150K120; 3. N100P150K120+навоз (20т/га). Образцы были отобраны в 1999 году. 2) Опыт ТСХА, заложенный в 1976 г в учхозе Михайловское Подольского района Московской области (дерново-подзолистая среднесуглинистая почва). Варианты опыта: 1. Без удобрений; 2. N108P51K159; 3. N84P13K59+ навоз (17,5 т/га). Образцы были отобраны в 2006 году. 3) Полевой опыт Петринского опорного пункта Почвенного института им.В.В. Докучаева (чернозем типичный легкоглинистый). Был заложен в 1964 году. Варианты опыта: 1. Без удобрений; 2. N45P60K45; 3. Навоз (20т/га); 4. N23P30K23+навоз (10 т/га). Образцы были отобраны в 2006 году.

Фракции меньше 0,2 мкм и 0,2-1,0 мкм выделялись путем центрифужного осаждения частиц после обработки ультразвуком при 22 кГц по Шаймухаметову. Остаток почвы, после выделения илстых фракций, разделялся на фракции: *1,0-10 мкм, 10-50 мкм, больше 50 мкм* по Астапову.

Минералогический состав определялся рентген-дифрактометрическим методом для фракций меньше 10 мкм в образцах вариантов «контроль» и «NPK+навоз» и дальнейшим расчетом соотношения основных групп глинистых минералов по методике Биска (Biskayе, 1965).

Гумус определен методом Тюрина с титриметрическим окончанием. *Обменный калий* определен методом Масловой. *Емкость катионного обмена* (ЕКО) определяли методом Шолленбергера

Для оценки динамики десорбции калия из гранулометрических фракций и почв был использован кинетический подход, предложенный Спарксом. Вытеснение калия проводилось путем десятикратной обработки образцов 0,01М CaCl₂ раствором в соотношении фракция-раствор – 1:100 и почва-раствор – 1:10. *Легкоподвижный калий* определялся по данным первой экстракции. После суточного настаивания раствор отделялся от образцов путем 5-минутного центрифугирования при ускорении не менее 1500g с последующей декантацией раствора. Полученный раствор анализировался на содержание калия пламенно-фотометрическим способом. Десорбцию калия из образцов проводили как без предварительной обработки, так и после предварительной обработки хлористым калием. Обработка осуществлялась путем часового взбалтывания и настаивания образца в течение суток с раствором, содержащим 0,005 н. KCl и 0,01М CaCl₂ (инкубирование) с последующим разделением твердой и жидкой фаз. Такая концентрация хлористого калия имитировала очень высокие дозы внесения удобрений (более 5т K⁺/га), а концентрация хлористого кальция аналогична по ионной силе и концентрации почвенному раствору.

Для описания динамики десорбции калия использовалось уравнение первого порядка:

$$\ln(C_0 - C_t) = \ln C_0 - k_d t \quad (1)$$

где C_0 -суммарно вытесненное количество калия, мг/100 г образца; C_t – суммарно вытесненное количество калия на момент времени t , мг/100 г образца; k_d – коэффициент интенсивности десорбции; t –время, час

Долю калия, занимающего специфические (межпакетные) позиции определяли по методике, предложенной Талибуудином, на основе графиков, построенных по уравнению параболической диффузии.

Повторность исследований – трехкратная. Полученные данные были статистически обработаны с использованием многофакторного дисперсионного анализа. Среди факторов для дисперсионного анализа использовали: размер частиц, варианты с удобрениями, варианты без/с инкубированием, почвы (по генезису). Определены значения наименьшего существенного различия при уровне значимости 0,05 ($HCP_{0,05}$) и критерий F-Фишера для оценки существенности различий и доли влияния факторов на изменение результатов анализа.

2.2 Агрохимическая характеристика объектов исследования

В разделе приводятся общие физические и агрохимические свойства гранулометрических фракций и почв (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Общая химическая характеристика исследованных почв

Почва	Вариант опыта	pH водн	pH _{ксл}	C _{орг} %	ЕКО, ммоль/100 г почвы	Содержание ила, %	K ₂ O _{валл} %	K ⁺ Масл, мг/100 г	K ⁺ CaCl ₂ , мг/100 г
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	5,34	4,6	1,5	6,8	5,3	1,94	2,2	1,2
	НPK	5,84	5,4	1,7	7,0	5,3	1,87	8,3	5,3
	НPK+Навоз	н/о	5,6	2,1	8,1	5,2	1,87	8,6	5,4
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	7,16	6,7	1,6	13,9	15,9	1,99	9,1	3,2
	НPK	6,11	5,6	1,9	13,7	15,6	2,01	14,6	6,6
	НPK+Навоз	6,48	6,0	2,4	15,0	16,5	2,03	17,8	8,4
Чернозем типичный легкоголистый	Контроль	6,58	5,7	5,1	29,7	33,0	1,95	17,1	3,8
	НPK	6,37	5,6	5,3	30,6	32,7	1,91	19,9	5,3
	Навоз	6,43	5,6	5,4	30,8	33,0	1,91	20,7	5,5
	НPK+Навоз	6,29	5,4	5,2	30,5	32,5	1,91	23,2	6,7

Общее содержание ОВ в результате длительного применения удобрений в дерново-подзолистых супесчаных и среднесуглинистых почвах увеличивается примерно на 30% в вариантах с внесением органических удобрений. В черноземе изменение этого показателя незначительно (табл. 1). Распределение органического вещества в почвах и их гранулометрических фракциях представлено в табл. 4.

Валовое содержание калия трех почв находится в одном диапазоне 1,87-2,03% от массы почвы. Изученные почвы сильно различаются по количеству обменного калия, характеризующего уровни обеспеченности калием различных групп сельскохозяйственных культур.

Значения *водного pH* всех почв в диапазоне 5,3-7,2, солевого pH – в диапазоне 4,6-6,7.

Емкость катионного обмена изученных почв изменяется в соответствии с изменением их гранулометрического состава и содержания органического вещества: от 6,8-8,1 ммоль/100г в дерново-подзолистой супесчаной до 13,9-15,0 ммоль/100г в среднесуглинистой почвах. В черноземе ЕКО достигает 29,7-30,8 ммоль/100г. Содержание илистой фракции составило 5,3% для дерново-подзолистой почвы опыта Прянишникова (ТСХА), 15,6-16,5% в опыте учхоза «Михайловское» (ТСХА), 32,5-33,0% в опыте Петринского опорного пункта.

По полученным данным в табл. 2 можно сказать, что изучаемые почвы контрастны по гранулометрическому составу.

Таблица 2. Гранулометрический состав изученных почв.

Вариант опыта	Доля фракций (мкм) в почве, %				
	< 0,2	0,2-1,0	1,0-10	10-50	>50
Дерново-подзолистая супесчаная почва					
Контроль	2,3	3,0	12,2	23,6	59,0
NPK	2,3	3,0	13,9	27,6	53,3
NPK+Навоз	2,2	3,0	13,3	25,2	56,3
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва					
Контроль	8,9	7,0	19,9	51,0	13,2
NPK	9,2	6,4	20,0	50,6	13,8
NPK+Навоз	9,3	7,2	19,7	49,7	14,0
Чернозем легкоглинистый					
Контроль	22,4	10,6	18,2	35,9	13,0
NPK	22,1	10,6	18,2	36,9	12,1
Навоз	22,9	10,1	17,9	38,5	10,7
NPK+Навоз	22,6	9,9	17,9	39,4	10,3

Минералогический состав тонких фракций исследованных почв представлен в табл. 3 и на рис. 1.

Таблица 3. Минералогический состав исследованных фракций почв

Вариант опыта	Размер фракции мкм	Преобладающие минералы	Распределение слоистых силикатов, %			Распределение каркасных силикатов					
			Смешаннослойные образования	ГС	Ка	Хл	Кв	КПШ	Пл		
										Сл-См	Хл-В, Сл-В
Дерново-подзолистая супесчаная почва											
Контроль	<0,2	СС	0	39	30	22	9	-	-	-	
	0,2-1,0	СС + КС	0	31	38	21	10	++	+	+	
	1,0-10	КС	0	18	39	21	22	+++	++	++	
	NPK+Навоз	<0,2	СС	0	28	48	12	12	-	-	-
		0,2-1,0	СС + КС	0	21	46	25	8	++	+	+
	1,0-10	КС	0	14	57	14	15	+++	++	++	
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва											
Контроль	<0,2	СС	24	0	64	6	6	-	-	-	
	0,2-1,0	СС + КС	4	18	47	21	10	+	+	+	
	1,0-10	КС	0	15	59	9	18	+++	++	++	
	NPK+Навоз	<0,2	СС	20	0	65	9	6	-	-	-
		0,2-1,0	СС + КС	2	8	51	26	13	+	+	+
	1,0-10	КС	0	12	61	12	16	+++	++	++	
Чернозем легкоглинистый											
Контроль	<0,2	СС	50	0	43	5	2	-	-	-	
	0,2-1,0	СС + КС	0	7	70	12	10	++	++	++	
	1,0-10	КС	0	0	81	13	6	+++	++	++	
	NPK+Навоз	<0,2	СС	42	0	49	7	2	-	-	-
		0,2-1,0	СС + КС	0	0	79	13	8	+++	++	++
	1,0-10	КС	0	0	74	18	8	+++	++	++	

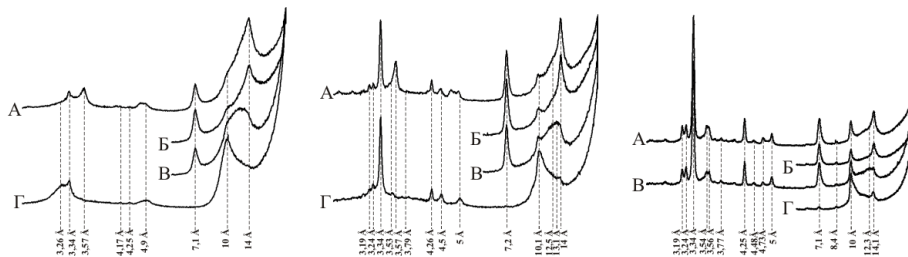
Примечание: Буквенные обозначения сокращений: СС – слоистые силикаты, КС – каркасные силикаты, Сл-См – слюда-сметит, Хл-В – хлорит-вермикулит, Сл-В – слюда-вермикулит, ГС – гидрослюда, Ка – каолинит, Хл – хлорит, Кв – кварц, КПШ – калиевые полевые шпаты, Пл – Плагноклаз; По содержанию каркасных минералов: «-» – отсутствуют; «+» – незначительное количество, «++» – среднее количество; «+++» – большое количество.

Среди глинистых минералов наблюдаются закономерности по распределению их по вариантам опытов и размерам гранулометрических фракций.

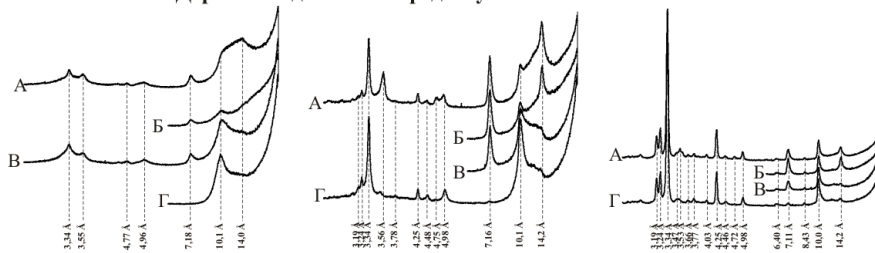
1. Доминирующими среди глинистых минералов дерново-подзолистой супесчаной почвы являются смешаннослойные образования хлорит-вермикулитового типа. В дерново-подзолистой среднесуглинистой почве – гидрослюды и смешаннослойные образования хлорит-вермикулитового и слюда-сметитового типа. В черноземе

легкоглинистом – гидрослюды и смешаннослойные образования слюда-сметкитового типа.

Дерново-подзолистая супесчаная почва



Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва



Чернозем легкоглинистый

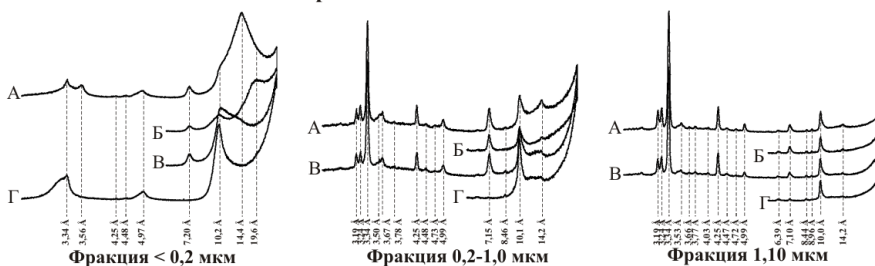


Рис.1 Рентгендифрактограммы гранулометрических фракций <math>< 10 \mu\text{m}</math>

А - Исходные образцы в воздушносухом состоянии, Б - образцы после сольватации с глицерином, В - образцы после прокалывания при 350°C, Г - Образцы после прокалывания при 550°C

2. С увеличением размера частиц увеличивается доля кварца, калиевых полевых шпатов и плагиоклаза.

3. Фракции <math>< 0,2</math> и $0,2-1,0 \mu\text{m}$ варианта «NPK+навоз» содержат большее количество гидрослюд по сравнению с аналогичными фракциями варианта «контроль». Это объясняется необменной фиксацией тонкими фракциями калия и аммония вносимых удобрений.

4. При переходе от почв легкого гранулометрического состава к более тяжелому отмечается увеличение содержания смектитов в коллоидных фракциях и снижение доли вермикулитов. При этом в варианте «контроль» смектитов больше по сравнению с удобренными вариантами почв.

В табл. 4 представлены данные по содержанию органического вещества в гранулометрических фракциях. В почвах оно увеличивается от самой легкой

супесчаной дерново-подзолистой почвы к легкоголинистому чернозему. Согласно данным, приведенным в табл. 4, *максимальное количество органического вещества (в расчете на массу фракций) содержится во фракциях <10 мкм*. В супесчаной дерново-подзолистой почве максимальное количество его обнаружено во фракции <0,2 мкм, в среднесуглинистой дерново-подзолистой почве и в черноземе – во фракции 0,2-1,0 мкм.

Таблица 4. Содержание органического вещества в гранулометрических фракциях и исходных почвах, % от массы соответствующего образца.

Почва	Вариант опыта	Фракции, мкм					Почва в целом
		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	9,9	7,2	5,3	0,7	0,0	1,5
	НРК	9,1	6,4	5,7	1,1	0,6	1,7
	НРК+Навоз	10,2	7,5	6,8	1,1	0,4	2,1
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	4,2	7,5	2,8	0,3	1,5	1,6
	НРК	4,7	7,8	3,6	0,4	0,3	1,9
	НРК+Навоз	5,0	9,2	4,6	0,4	0,4	2,4
Чернозем легкоголинистый	Контроль	6,8	13,5	10,6	0,8	0,5	5,1
	НРК	7,0	13,4	10,5	0,7	0,7	5,3
	Навоз	6,7	12,5	10,7	0,7	0,7	5,4
	НРК+Навоз	7,0	12,7	10,2	0,6	0,9	5,2

В работе также оценено долевое участие фракций в содержании органического вещества почвы; на долю фракций <10 мкм приходится от 75% до 94% органического вещества почвы. В супесчаной дерново-подзолистой почве основная масса органического вещества содержится во фракции 1-10 мкм. В среднесуглинистой дерново-подзолистой почве и черноземе ОВ распределено между фракциями физической глины более равномерно. Участие гранулометрических фракций >10 мкм в содержании органического вещества почвы незначительно и уменьшается по мере увеличения доли илистой фракции в почвах от легкой супесчаной к тяжелой легкоголинистой почве.

Результаты определения емкости катионного обмена почв и их гранулометрических фракций представлены в табл. 5.

Таблица 5. Емкость катионного обмена гранулометрических фракций и почв, ммоль/100 г образца

Почва	Вариант опыта	Фракции, мкм					Почва в целом
		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	66	56	34	2	0,2	7
	НРК	67	53	25	4	0	7
	НРК+Навоз	74	57	37	3	1,3	8
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	73	49	24	8	8	14
	НРК	70	55	19	7	7	14
	НРК+Навоз	76	57	24	5	3	15
Чернозем легкоголинистый	Контроль	86	68	59	3	0,8	20
	НРК	93	69	51	3	0,9	31
	Навоз	83	75	55	3	0,7	31
	НРК+Навоз	88	74	52	2	0,7	31

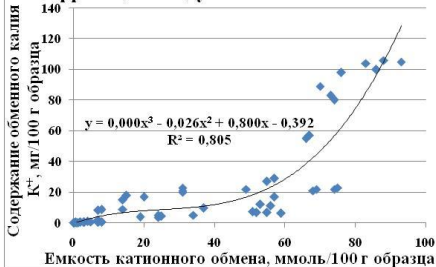
Максимальные значения ЕКО (66-93ммоль/100г) характерны для коллоидных фракций и постепенно уменьшаются к фракциям 1-10 мкм, оставаясь, тем не менее, высокими (до 59 ммоль/100г в черноземе), что связано с наличием глинистых минералов (табл. 3) в комплексе с органическим веществом (табл. 4). Более всего ЕКО связано с изменением размеров частиц.

Распределение обменного (по Масловой) и легкоподвижного (однократная вытяжка 0,01М СаСl₂ раствором) калия по фракциям, использованных для проведения опыта с последовательной десорбцией калия представлено в табл. 6.

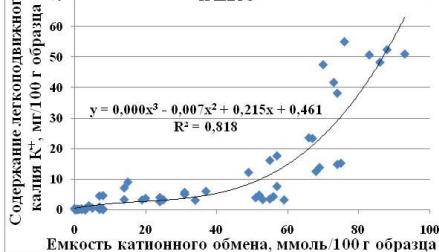
Таблица 6. Формы калия в исследованных фракциях и почвах, мг K⁺/100 г образца

Почва	Вариант опыта	Фракции, мкм					Почва в целом
		<0,2	0,2-1,0	1,0-10	10,0-50,0	>50	
Обменный калий по Масловой (1М CH ₃ COONH ₄)							
Дерново-подзолистая супесчаная	Контроль	55	11	5,1	0,4	0	2,2
	NPK	57	12	4,4	1,0	0	8,3
	NPK+Навоз	80	17	9,6	0,6	0	8,6
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	Контроль	83	22	3,6	0,7	0,4	9,0
	NPK	89	27	4,0	0,6	0,4	15
	NPK+Навоз	98	29	4,9	0,7	0,5	18
Чернозем типичный легкоглинистый	Контроль	100	21	6,2	0,7	0,3	17
	NPK	105	22	7,3	0,6	0,3	20
	Навоз	104	23	6,8	0,6	0,3	21
	NPK+Навоз	106	22	6,8	0,8	0,5	23
Легкоподвижный калий (0,01 М. CaCl ₂); НСР _{0,05} =1,6							
Дерново-подзолистая супесчаная	Контроль	23,6	4,4	3,2	0,1	0	1,0
	NPK	23,4	3,4	3,3	1,4	0,5	4,6
	NPK+Навоз	38,2	7,7	6,1	0	0,2	4,7
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	41,7	12,3	2,7	0,3	0,1	3,4
	NPK	47,5	16,2	3,3	0,4	0,2	7,2
	NPK+Навоз	55,0	17,7	4,1	0,6	0,2	9,1
Чернозем типичный легкоглинистый	Контроль	48,3	12,6	3,3	0,3	0,1	3,8
	NPK	51,0	13,9	4,0	0,4	0,2	5,1
	Навоз	50,7	15,3	3,6	0,4	0,2	5,2
NPK+Навоз	52,4	14,9	4,9	0,4	0,2	5,8	

Корреляция между обменным калием и ЕКО



Корреляция между легкоподвижным калием и ЕКО



Корреляция между обменным и легкоподвижным калием

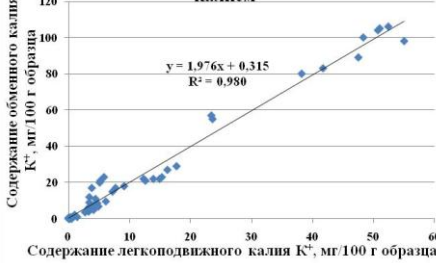


Рис.2 Корреляционные зависимости между ЕКО, обменным и легкоподвижным калием почв и гранулометрических фракций.

Содержание обменного калия примерно вдвое больше по сравнению с легкоподвижным, как для образцов почв, так и гранулометрических фракций. При этом закономерности распределения элемента по фракциям сохраняются для обеих форм элемента. Значительное содержание калия отмечено во фракциях меньше 10 мкм. Максимальное содержание калия установлено для фракций коллоидов (около 100 мг/100 г для обменной форме и 50 мг/100 г для легкоподвижной формы элемента в черноземе). Содержание калия в предколлоидной фракции по сравнению с коллоидами

в 3-5 раза меньше: от 11,2 до 29,0 мг/100 г образца в обменной форме; от 3,4 до 17,7 мг/100 г образца в легкоподвижной форме. Содержание калия во фракции 1-10 мкм от 3,6 до 7,3 мг/100 г образца в обменной форме; от 2,7 до 6,1 мг в легкоподвижной форме, что в 10-15 раз меньше, чем для фракции меньше 0,2 мкм.

Корреляционные зависимости на рис. 2 отражают тесную взаимосвязь между ЕКО и содержанием легкоподвижного и обменного калия. Применение удобрений, как фактора, влияющего на изменение содержания калия, а также тип почвы в данном случае имеют меньшее значение. Более подробно этот вопрос рассматривается в разделе 4.6.

Глава 3. Сорбционные свойства почв и их гранулометрических фракций в отношении калия

3.1 Сорбция калия почвами и гранулометрическими фракциями

Таблица 7. Количество калия, сорбированного фракциями и почвами в результате инкубирования с раствором 0,005н. КСl в 0,01М CaCl₂ в течение суток, мг K⁺/100 г образца.

Вариант	Фракции (мкм)					Почва в целом
	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва						
Контроль	322	276	43	93	64	30
NPK	297	203	4	46	31	24
NPK+навоз	245	168	40	3	23	19
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва						
Контроль	291	195	74	7	3	56
NPK	277	177	74	28	32	46
NPK+навоз	311	197	73	33	37	46
Чернозем легкоглинистый						
Контроль	342	212	121	38	40	90
NPK	347	187	138	34	14	84
Навоз	320	175	126	34	12	83
NPK+навоз	299	159	122	13	6	78

Примечание: Значения НСР_{0,05} (здесь и далее в скобках: существование (+) и не существование (-) различий, оцененная с использованием критерия F-Фишера и доля влияния фактора в %): по почвам – 15 мг K⁺/100 г (+, 1%); по фракциям – 11 мг K⁺/100 г (+, 91%); по вариантам удобрений – 15 мг K⁺/100 г (+, 1%); по повторностям 26 мг K⁺/100 г (-); средняя ошибка среднего – 9 мг K⁺/100 г; относительная ошибка среднего – 8%.

При сравнении сорбционных свойств почв в целом прослеживается четкая зависимость увеличения сорбции калия от легкой к самой тяжелой. Однако при рассмотрении входящих в их состав гранулометрических фракции прослеживаются иные закономерности, не связанные с общей тенденцией для почв в целом (табл.7).

Наибольшей способностью к поглощению калия обладают фракции <10 мкм. При этом максимум ее приходится на коллоиды, минимум – на фракцию 1-10 мкм. Существенно ниже способность к закреплению калия во фракциях >10 мкм, однако доля этих фракций в почве составляет около 80% в дерново-подзолистой супесчаной почве, чуть более 60% в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве и около 50% в черноземе.

В результате статистического анализа подтверждено, что среди исследованных почв именно различие образцов по размеру частиц является самым важным фактором дифференциации по количеству сорбированного калия. Влияние вариантов, связанных с системами удобрений и типом почв небольшое (примечание к табл. 7).

3.2 Долевое участие гранулометрических фракций в сорбционной способности почв в отношении калия

Долевой вклад фракций в закреплении калия почвой оценен с учетом доли каждой из них в почве (табл. 8). Поглотительная способность фракций крупнее 10 мкм

невелика, однако, с учетом их массы в почве видно, что доля сорбированного почвой калия, приходящаяся на фракцию 10-50 мкм, варьирует в пределах 2-30% – для дерново-подзолистой супесчаной почвы, 6-21% – для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы и 4,7-10 % – для чернозема. Доля поглощенного калия, приходящаяся на фракцию крупнее 50 мкм, в дерново-подзолистой супесчаной почве – 39-47%, в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве – 0,6-6,6%, в черноземе находится в пределах 1,0-4,7 %.

Таблица 8. Доля фракций в сорбции калия почвой, %

Вариант	Образцы фракций (мкм)				
	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50
Дерново-подзолистая супесчаная почва					
Контроль	9,2	10	6,4	27	47
NPK	16	14	1,4	29	39
NPK+навоз	19	17	18	2,3	44
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва					
Контроль	45	23	25	5,9	0,6
NPK	36	16	21	20	6,3
NPK+навоз	37	18	18	21	6,6
Чернозем легкогоглинистый					
Контроль	55	16	16	9,9	3,7
NPK	56	15	19	9,2	1,3
Навоз	57	14	18	10	1,0
NPK+навоз	61	14	20	4,7	0,6

Примечание: Значения НСР_{0,05}: по почвам – 8% (-); по фракциям – 7% (+, 25%); по вариантам с удобрениями – 8% (-); по повторностям 15% (-); средняя ошибка среднего – 5%; относительная ошибка среднего – 26%

Глава 4. Десорбционные свойства почв и их гранулометрических фракций в отношении калия

4.1 Десорбционные свойства фракций и почв

В табл. 9 приведены данные по суммарно вытесненному количеству калия раствором 0,01M CaCl₂ в результате проведения опыта по динамике десорбции элемента. Опыт по последовательной порционной десорбции калия проводился как с образцами без предварительного насыщения калием, так и с образцами после насыщения изучаемым элементом в результате инкубирования.

При сравнении результатов опыта без инкубирования в образцах фракций и исходных почв в целом, были отмечены закономерности, аналогичные результатам определения обменного и легкоподвижного калия (табл. 6). Наибольшее количество калия в обоих типах почв вытесняется из фракций меньше 10 мкм. Из фракций больше 10 мкм вытеснение калия не существенно.

Результаты опыта по десорбции показали, что большая часть калия высвобождается за первые 2-3 экстракции (70-80%). Характер кривых десорбции отражает закономерности изменения интенсивности десорбции калия. Следует еще отметить, что коллоиды способны, как к большему насыщению калием, так и самой большей отдаче его.

В результате инкубирования вытеснение калия в образцах увеличивается в несколько раз. Однако закономерности распределения минимальных и максимальных значений среди разных по размеру гранулометрическими фракциями сохраняются. Так, после инкубирования с калием из коллоидной фракции высвобождается максимальное количество калия. Для образцов из дерново-подзолистой супесчаной почвы оно составило 340-430 мг/100 г, из дерново-подзолистой среднесуглинистой – 304-320 мг/100г фракции, из чернозема – 350-360 мг/100г фракции. По мере укрупнения частиц количество калия, десорбированного из фракций, уменьшается.

В результате инкубирования минимальное значение суммарно вытесненного калия, не во всех фракциях может быть отнесено к варианту «контроль».

Таблица 9. Количество калия, высвободившегося в результате 10-ти кратной последовательной десорбции 0,01 М CaCl₂, мг K⁺/100 г образца

Почвы	Варианты	Фракции, мкм					Почва в целом
		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Неинкубированные образцы							
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	43,6	8,6	5,6	0,5	0,1	1,8
	NPK	46,5	13,2	6,7	1,8	1,0	8,5
	NPK+Навоз	73,1	19,6	11,8	0,6	0,8	8,6
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	73,5	20,3	3,9	0,3	0,1	7,3
	NPK	81,6	26,7	5,3	0,5	0,2	14,2
	NPK+Навоз	93,3	29,5	6,6	0,7	0,2	17,8
Чернозем типичный легкоглинистый	Контроль	94,2	23,4	6,0	0,4	0,1	12,2
	NPK	101,9	31,0	7,5	0,5	0,3	16,7
	Навоз	100,7	31,0	6,3	0,6	0,3	16,9
	NPK+Навоз	103,0	26,0	8,7	0,5	0,3	19,8
Образцы с предварительной инкубацией							
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	339,4	240,5	140,9	20,9	4,3	35,1
	NPK	377,9	220,8	95,2	24,6	8,6	49,1
	NPK+Навоз	430,2	304,6	142,8	23,4	6,2	49,2
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	321,1	186,2	59,6	6,8	1,9	47,3
	NPK	304,2	171,4	52,9	6,7	3,1	51,0
	NPK+Навоз	309,9	183,6	57,5	7,2	3,6	53,1
Чернозем типичный легкоглинистый	Контроль	359,9	161,1	85,0	9,7	0,8	78,3
	NPK	359,5	157,2	87,3	9,6	3,5	81,1
	Навоз	357,1	154,4	82,5	9,3	3,7	80,9
	NPK+Навоз	350,8	149,2	86,9	8,6	3,6	81,6

Примечание. Значения НСР_{0,05}: по почвам – 3,7 мг K⁺/100 г (+, 0,4%); по вариантам с предварительным инкубированием – 4,5 мг K⁺/100 г (+, 23%); по фракциям – 2,6 мг K⁺/100 г (+, 51,1%); по вариантам с удобрениями – 3,7 мг K⁺/100 г (+, <0,1%); по повторностям 6,4 мг K⁺/100 г (-); средняя ошибка среднего – 2,3 мг K⁺/100 г; относительная ошибка среднего – 3,3%

4.2 Десорбируемость нативного калия из почвы и их гранулометрических фракций

Одним из дискуссионных вопросов по десорбции калия по свидетельству Медведевой (Медведева и др., 1983) и Дилон (Dhillon et al., 1989) является вопрос о влиянии вносимого калия на дополнительный выход калия самой почвы. Такой калий Дилон называет *нативным*. Для определения количества высвобождающегося нативного калия после инкубирования мы используем формулу:

$$K_{\text{нат}} = K_{\text{св}} - K_{\text{сорб}}, \text{ где } (2)$$

где $K_{\text{нат}}$ – количество нативного калия, десорбированного из почвы или ее гранулометрических фракций, мг/100 г образца; $K_{\text{св}}$ – суммарно вытесненное количество калия из предварительно инкубированных образцов в результате 10-ти кратной обработки 0,01М CaCl₂ раствором, мг/100 г образца; $K_{\text{сорб}}$ – количество калия, сорбированного образцами в результате инкубирования, мг/100 г образца.

Результаты по извлекаемому нативному калию из образцов гранулометрических фракций и почв после инкубирования приведены в табл. 10.

Положительные значения в табл.10 свидетельствуют, о том, что в результате инкубирования последующий процесс экстрагирования позволяет вытеснить нативный калий образцов помимо того количества, которое было предварительно сорбированно. Однако, полученные отрицательные значения показывают, что после 10-ти кратной экстракции калия из предварительно инкубированных образцов дополнительное

высвобождение нативного элемента может не происходить. При этом отрицательные значения свидетельствуют о произошедшей фиксации калия. Таким образом, можно отметить, что при внесении дополнительного количества калия его фиксация во фракциях <0,2 мкм в основном не происходит. А в легкой почве, сравнивая данные с табл. 9, кроме того наблюдается еще и дополнительное вытеснение нативного калия. Гранулометрические фракции >0,2 мкм дерново-подзолистой среднесуглинистой и чернозема легкоголинистого, а так же частицы дерново-подзолистой супесчаной почвы >10 мкм фиксируют калий, который был предварительно внесен при инкубировании.

Таблица 10. Рассчитанное количество нативного калия, вытесненного после инкубирования, мг К⁺/100 г образца.

Варианты	Фракции, мкм					Почва
	<0,2	0,2-1,0	1,0-10,0	10,0-50,0	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва						
Контроль	18	-36	98	-73	-60	5
НPK	81	17	91	-21	-23	25
НPK+навоз	185	137	103	21	-16	30
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва						
Контроль	30	-8	-15	0	-1	-9
НPK	27	-6	-21	-22	-29	5
НPK+навоз	-13	-16	-26	-33	7	52
Чернозем легкоголинистый						
Контроль	18	-51	-36	-29	-40	-12
НPK	13	-30	-51	-24	-11	-3
Навоз	37	-21	-43	-25	-9	-3
НPK+навоз	52	-9	-35	-5	-3	4

Примечание. Значения НСР_{0,05}: по почвам – 3,7 мг К⁺/100 г (+, 0,4%); по фракциям – 2,6 мг К⁺/100 г (+, 51,1%); по вариантам с удобрениями – 3,7 мг К⁺/100 г (+, <0,1%); по повторностям 6,4 мг К⁺/100 г (-); средняя ошибка среднего – 2,3 мг К⁺/100 г; относительная ошибка среднего – 3,3%

4.3 Долевое участие гранулометрических фракций в десорбируемости калия из почв

Таблица 11. Доля фракций в десорбции калия из почвы, %

Варианты	Образцы фракций без инкубирования с калием, мкм					Образцы фракций, инкубированные с калием, мкм				
	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50
Дерново-подзолистая супесчаная почва										
Контроль	47,1	12,0	31,7	5,8	3,4	19,8	18,1	43,2	12,4	6,4
НPK	30,9	11,6	27,4	14,7	15,4	21,5	16,5	33,4	17,1	11,5
НPK+навоз	34,4	12,3	33,4	9,8	10,2	20,4	19,2	40,5	12,6	7,4
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва										
Контроль	73,5	15,9	8,6	1,8	0,2	50,1	22,8	20,7	6,0	0,4
НPK	71,2	16,3	10,0	2,3	0,2	52,3	20,6	19,9	6,4	0,8
НPK+навоз	69,6	17,0	10,5	2,6	0,3	50,3	23,0	19,7	6,2	0,9
Чернозем легкоголинистый										
Контроль	84,9	10,0	4,4	0,6	0,1	69,1	14,6	13,3	3,0	0,1
НPK	82,2	12,1	5,0	0,7	0,1	68,5	14,4	13,7	3,0	0,4
Навоз	83,6	11,4	4,1	0,8	0,1	70,4	13,5	12,7	3,1	0,3
НPK+навоз	84,3	9,3	5,7	0,7	0,1	70,0	13,0	13,7	3,0	0,3

Примечание: Значения НСР_{0,05}: по почвам – 1,4% (-); по вариантам с предварительным инкубированием – 1,7% (-); по фракциям – 1,1% (+, 72%); по вариантам с удобрениями – 1,4% (-); по повторностям 2,4% (-); средняя ошибка среднего – 0,9%; относительная ошибка среднего – 4,3%

Описанные выше свойства фракций служат источником для понимания их вклада в калийный режим почвы в целом. С учетом доли каждой фракции в почве были получены данные по долевному участию фракций в процессе высвобождения калия из почв (табл. 11). Так же как и при сорбционных процессах, от самой легкой почвы к

самой тяжелой по гранулометрическому составу наблюдается увеличение участия в десорбции калия гранулометрической фракции $<0,2$ мкм. При внесении калия (инкубирование) показано, что наиболее заметные изменения долевого участия происходит во фракциях $<0,2$ мкм (уменьшение доли) и 1-10 мкм (увеличение доли).

4.4 Зависимость изменения коэффициентов селективности калия от доли калия в емкости катионного обмена

Исходя из представленных графиков на рис.3, значения коэффициентов селективности калия по отношению к кальцию по Гапону, рассчитанные для образцов гранулометрических фракций и почв без предварительного инкубирования с калием, для всех вариантов опыта с удобрениями и по всем повторностям практически ложатся на одну кривую. В то же время, в результате инкубирования с калием наблюдается два процесса: 1) смещение кривых в сторону большей насыщенности ЕКО калием; 2) увеличение максимальных значений K_d . Первый процесс объясняется дополнительной сорбцией внесенного калия; второй процесс, возможно, обусловлен описанным Дилоном (*Dhillon et al., 1989*) воздействием вносимого калия на полимерные соединения Fe и Al, что приводит к открытию ранее недоступных высокоселективных позиций.

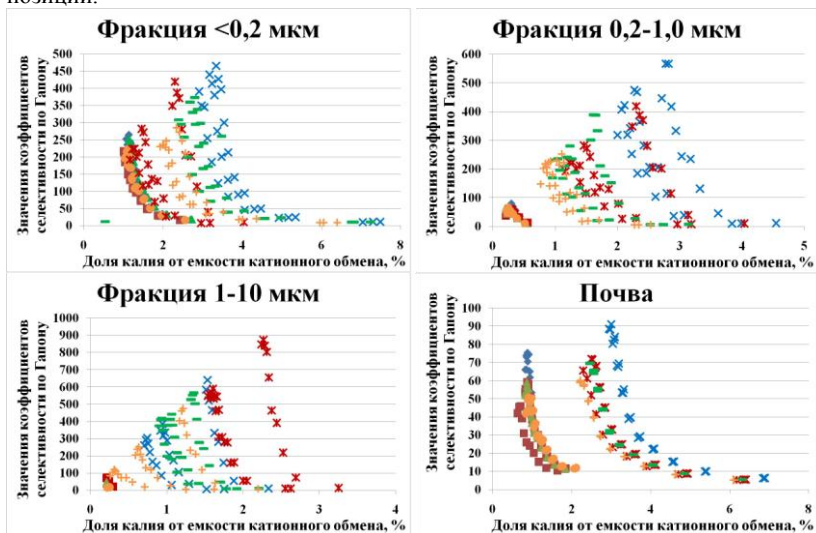


Рис.3 Зависимость коэффициентов селективности по Гапону (ось ординат) от доли калия в емкости катионного обмена (ось абсцисс) на примере образцов чернозема легкоголинистого.

Условные обозначения образцов различных вариантов опытов с удобрениями:

- ◆ Контроль без инкубирования
- NPK без инкубирования
- ▲ Навоз без инкубирования
- NPK+навоз без инкубирования
- × Контроль после инкубирования
- * NPK после инкубирования
- Навоз после инкубирования
- + NPK+навоз после инкубирования

Образцы вариантов полевого опыта с удобрениями, включая «контроль», без инкубирования с калием, дают близкие друг к другу кривые. В лабораторном же опыте с внесением калия кривые для разных вариантов с удобрениями расходятся. Это

характерно и для гранулометрических фракций, и для почв в целом. Полученный экспериментальный материал позволяет сделать вывод, что равновесие ионного обмена калия и кальция между твердой и жидкой фазами в почвах в данных лабораторных условиях не достигается. Длительный период взаимодействия калийных удобрений с твердой фазой почв, такой как в полевых условиях, приводит систему почва-раствор в более равновесное состояние.

Среди трех почв, как без инкубирования, так и в результате проведенного инкубирования, наибольшее варьирование значений K_G отмечено для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, самое меньшее – для дерново-подзолистой супесчаной почвы. Значение K_G для легкоглинистого чернозема близки к значениям для дерново-подзолистой супесчаной почвы. С увеличением доли калия в ЕКО значения коэффициента селективности снижается. При этом наиболее резкие изменения значений K_G происходят при доле калия от ЕКО меньше 1%.

При рассмотрении гранулометрических фракций < 10 мкм более четкие закономерности отмечены при уменьшении размера частиц и при переходе от более легкой по гранулометрическому составу почвы к более тяжелой. Так же как для почвенных образцов, для гранулометрических фракций в результате инкубирования значения коэффициентов селективности увеличиваются. По мере увеличения размеров гранулометрических фракций доля калия от ЕКО, при которой прекращается резкое падение значений K_G , уменьшается.

Полученные данные требуют дальнейшего более глубокого изучения.

4.5 Описание динамики десорбции калия с использованием уравнения первого порядка

Таблица 12. Средние значения коэффициентов интенсивности десорбции за весь цикл вытеснения калия, k_d , $10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$

Вариант опыта	Образцы без инкубирования с калием						Образцы, инкубированные с калием					
	Фракции, мкм					Почва в целом	Фракции, мкм					Почва в целом
	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва												
Контроль	2,219	2,134	1,901	0,6	0,7	2,020	2,811	3,343	2,654	5,0	4,2	2,863
НPK	1,924	1,689	1,836	3,8	1,6	1,913	2,694	2,689	2,413	4,6	6,7	2,517
НPK+навоз	1,928	1,559	1,812	2,2	1,4	1,901	2,565	2,616	2,553	6,6	7,5	2,503
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва												
Контроль	2,280	2,202	1,903	–	7,4	2,060	2,568	2,748	2,651	8,9	9,0	2,459
НPK	2,242	2,232	1,912	7,4	9,3	2,137	2,495	2,588	2,455	7,1	8,8	2,370
НPK+навоз	2,271	2,172	2,103	9,4	6,6	2,152	2,478	2,555	2,494	8,0	7,6	2,343
Чернозем легкоглинистый												
Контроль	1,877	1,574	1,800	3,7	8,0	1,552	2,187	1,835	2,049	6,6	5,9	1,859
НPK	1,838	1,452	1,560	3,4	4,5	1,574	2,178	1,812	2,012	6,1	6,8	1,848
Навоз	1,858	1,713	1,917	3,0	2,0	1,579	2,154	1,906	2,103	5,4	14,0	1,842
НPK+навоз	1,849	1,614	1,749	3,6	4,4	1,561	2,121	1,975	2,011	5,0	5,1	1,823

Примечание: Значения $HC_{P_{0,05}}$:

1. Для образцов почвы в целом и фракций меньше 10 мкм: по почвам – $0,050 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 35,5%); по вариантам без/с инкубированием – $0,061 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 39,8%); по фракциям – $0,043 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 2,8%); по вариантам с удобрениями – $0,050 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 2,3%); средняя ошибка среднего – $0,031 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; относительная шибка среднего – 1,4%;

2. Для фракций больше 10 мкм: по почвам – $1,5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 30%); по вариантам без/с инкубированием – $1,8 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 16%); по фракциям – $1,8 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (+, 2%); по вариантам с удобрениями – $1,5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (-); средняя ошибка среднего – $0,9 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; относительная ошибка среднего – 16%.

Использование динамического метода исследования позволило определить то, насколько легко гранулометрические фракции высвобождают калий почвы.

Процесс десорбции калия во фракциях меньше 10 мкм и для образцов почв в целом хорошо аппроксимируется кинетическим уравнением первого порядка ($R^2=0,98-0,99$).

Для фракций больше 10 мкм коэффициент корреляции варьирует сильнее ($R^2=0,77-0,98$).

Данные по коэффициентам интенсивности десорбции приведены в табл. 12. Очевидно, что в целом есть большая разница в интенсивности десорбции калия между гранулометрическими фракциями <10 мкм и >10 мкм. Значения k_d для фракций <10 мкм, как правило, ниже. Для неинкубированных образцов диапазон значений от 1,45 до $2,28 \times 10^{-2} \text{ч}^{-1}$, для инкубированных – от 1,81 до $3,34 \times 10^{-2} \text{ч}^{-1}$. Для фракций >10 мкм варьирование коэффициентов больше – от 0,57 до $9,42 \times 10^{-2} \text{ч}^{-1}$ – для неинкубированных образцов и от 4,22 до $14,03 \times 10^{-2} \text{ч}^{-1}$ – для инкубированных с калием образцов. В основном, высвобождение калия из гранулометрических фракций >10 мкм происходит намного быстрее, чем из гранулометрических фракций <10 мкм. Прежде всего, это связано с присутствием глинистых минералов в более мелких фракциях по сравнению с более крупными. Получено также, что интенсивность десорбции калия в результате инкубирования увеличивается.

Для почвенных образцов в целом, как в вариантах без инкубирования, так и с инкубированием отмечается близость значений k_d к средним значениям коэффициентов интенсивности десорбции для фракций меньше 10 мкм. Это указывает на то, что основная роль в обеспечении растений принадлежит именно данным фракциям; именно они поддерживают уровень интенсивности десорбции калия для почвы в целом.

4.6 Описание динамики десорбции калия с использованием модели параболической диффузии

Распределение калия по планарным и специфическим позициям гранулометрических фракций и почв в целом представлено в табл. 13.

Таблица 13. Доля калия, занимающего специфические позиции, %

Вариант опыта	Образцы без инкубирования с калием						Образцы, инкубированные с калием					
	Фракции, мкм					В целом по почве	Фракции, мкм					В целом по почве
	<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50	
Дерново-подзолистая супесчаная почва												
Контроль	16,0	17,2	18,3	0,0	0,0	21,6	3,5	2,0	3,3	0,0	0,0	3,3
НРК	23,9	50,8	25,6	0,0	0,0	26,3	4,5	4,4	4,9	0,0	0,0	6,3
НРК+навоз	23,1	49,7	27,0	0,0	0,0	26,3	5,3	4,9	4,0	0,0	0,0	6,3
Дерново-подзолистая суглинистая почва												
Контроль	10,8	11,4	12,7	0,0	0,0	18,6	4,5	2,8	2,3	0,0	0,0	6,7
НРК	11,2	11,5	16,8	0,0	0,0	14,9	5,0	3,6	3,2	0,0	0,0	7,8
НРК+навоз	10,7	12,2	13,8	0,0	0,0	14,7	5,2	3,9	3,2	0,0	0,0	8,6
Чернозем легкоглинистый												
Контроль	25,6	41,7	27,8	0,0	0,0	55,8	11,6	9,2	0,0	0,0	0,0	29,1
НРК	27,2	51,8	44,1	0,0	0,0	53,8	12,1	17,4	10,2	0,0	0,0	29,2
Навоз	26,5	30,0	20,4	0,0	0,0	53,8	12,4	13,5	8,1	0,0	0,0	29,7
НРК+навоз	26,8	33,8	27,1	0,0	0,0	55,9	13,0	12,3	9,6	0,0	0,0	30,2

Расчеты производились путем вычисления количества калия, занимающего планарные позиции, с помощью графического представления диффузионной модели. В качестве примера вычислений приводится рис. 4. Экстраполяция прямолинейного участка после изгиба кривой на ось ординат дает значение вытесненного калия с планарных позиций. Разность между суммарно вытесненным калием и количеством калия на планарных позициях позволяет узнать количество калия, которое занимают специфические позиции. К специфическим позициям относятся межпакетное пространство слоистых силикатов, сколы, нескомпенсированные заряды кластогенных силикатов, в частности полевых шпатов. Во фракциях >10 мкм специфические позиции не выявлены. Больше всего доля калия в специфических позициях – в легкоглинистом черноземе, как в образцах без инкубирования, так и после инкубирования. Для дерново-подзолистых почв влияние гранулометрического состава не однозначно.

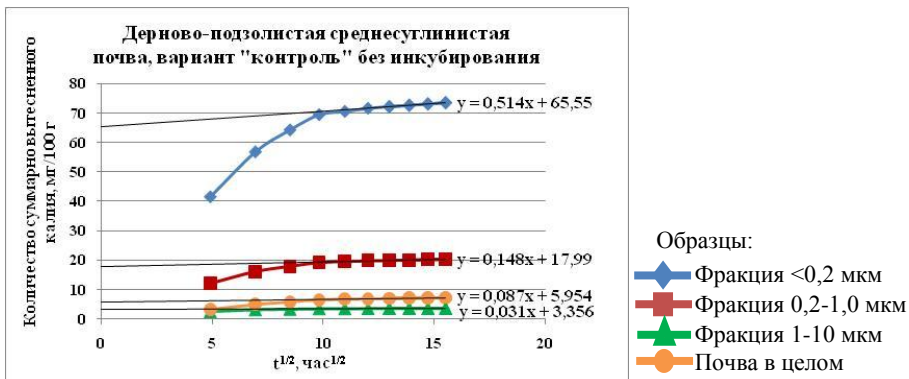


Рис. 4. Динамика десорбции калия в координатах диффузионной модели

В результате инкубирования доля калия в специфических позициях, как для фракций, так и для почв в целом уменьшается.

В связи с описанным распределением калия по планарным и специфическим позициям имеет смысл вернуться к вопросу корреляции между легкоподвижным и обменным калием, представленным на рис. 2, но уже в более подробном рассмотрении.

На рис. 5 приводятся корреляционные зависимости для каждой гранулометрической фракции в отдельности и для образцов почв.

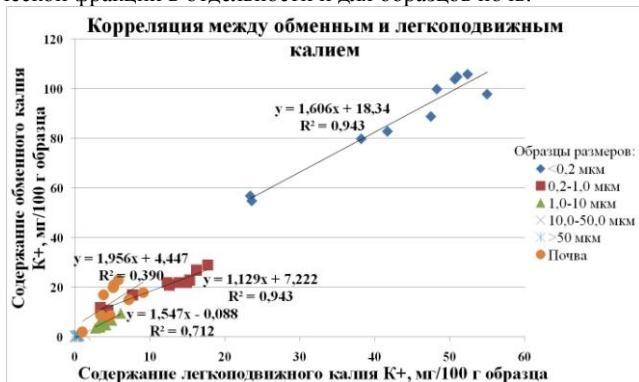


Рис. 5 Корреляция между обменным и легкоподвижным калием для образцов всех трех почв

Исходя из рис. 5 очевидно, что наибольшая корреляция между легкоподвижным и обменным калием наблюдается для фракций < 0,2 и 0,2-1,0 мкм. Корреляционная зависимость для фракций 1-10 мкм слабее, но остается достаточно высокой. Однако для почвенных образцов в целом значение коэффициента корреляции невысоко. Таким образом, основные закономерности связи между легкоподвижным и обменным калием относятся к илистой фракции. Коэффициент регрессии при переменной x отражает во сколько раз больше обменного калия в образцах по сравнению с легкоподвижным. Свободный член уравнения позволяет оценить среднее значение разницы между содержанием обменного и легкоподвижного калия. Стоит отметить, что эта разница близка средним значениям количества калия, занимающего специфические позиции.

Глава 5. Возможности практического применения результатов исследования

5.1 Дифференцированная оценка запасов обменного калия в почвах с учетом интенсивности десорбции

В соответствии с проведенной работой предпринята попытка сопоставить запасы калия в почве с реальным потреблением элемента сельскохозяйственными культурами. Таблица 14 отражает запасы калия в почве при пересчете на 1 га пашни для слоя 20 см и при плотности 1,4 т/м³ для дерново-подзолистой супесчаной почвы и 1,2 т/м³ – для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы и легкоглинистого чернозема.

Таблица 14. Запасы обменного калия (K⁺) в исходных образцах почв с учетом гранулометрического состава и интенсивности десорбции, кг/га

Положение калия в гранулометрических фракциях	Вариант опыта	Фракции, мкм					Сумма по фракциям	Почва в целом
		<0,2	0,2-1,0	1-10	10-50	>50		
Калий планарных позиций (быстро десорбирующийся)								
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	21	7	15	4	2	49	47
	НPK	22	6	20	14	15	75	187
	НPK+навоз	35	8	32	13	13	101	188
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	141	30	16	4	1	191	143
	НPK	159	36	21	6	1	223	290
	НPK+навоз	187	45	27	8	1	267	364
Чернозем легкоглинистый	Контроль	376	34	19	4	0	434	130
	НPK	394	38	18	5	1	455	186
	Навоз	406	53	22	6	1	486	188
	НPK+навоз	409	41	27	5	1	482	210
Калий специфических позиций (медленно десорбирующийся)								
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	7	1	4	0	0	11	13
	НPK	7	6	7	0	0	20	66
	НPK+навоз	10	8	12	0	0	30	67
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	17	4	2	0	0	23	33
	НPK	20	5	4	0	0	29	51
	НPK+навоз	22	6	4	0	0	33	63
Чернозем легкоглинистый	Контроль	130	25	7	0	0	162	164
	НPK	147	41	14	0	0	202	215
	Навоз	146	22	6	0	0	174	218
	НPK+навоз	150	21	10	0	0	181	266
Суммарное количество калия								
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Контроль	28	7	19	4	2	60	60
	НPK	29	11	26	14	15	94	253
	НPK+навоз	45	16	44	13	13	131	255
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва	Контроль	158	34	18	4	1	214	175
	НPK	179	41	26	6	1	252	340
	НPK+навоз	210	51	31	8	1	301	427
Чернозем легкоглинистый	Контроль	506	59	26	4	0	595	294
	НPK	541	79	33	5	1	658	401
	Навоз	553	75	27	6	1	662	406
	НPK+навоз	558	62	38	5	1	662	476

Наиболее доступным калием в почвах является калий планарных позиций, калий специфических позиций относится, согласно Медведевой, к труднодоступной части обменного калия. Дисбаланс по обменному калию между суммой по фракциям и высвобожденным из ненарушенного почвенного образца может быть обусловлен на легких дерново-подзолистых почвах потерей незакрепленного в почве калия в результате процедур фракционирования и осаждения коллоидной фракции; в результате часть калия перешла в раствор. Для чернозема эта разница объясняется наличием калия на планарных позициях, которые в результате агрегирования минералов была зашлепена в внутриагрегатном пространстве. Вследствие этого калий не мог быть извлечен в раствор.

Таблица 15. Средний вынос калия с урожаями культур (кг/га) и обеспеченность почв калием

Культура	Вынос калия (К ⁺) на 1 ц основной продукции с учетом поочной с 1 га, кг	Минимальный урожай			Оптимальный урожай				
		Вынос калия (К ⁺) с 1 га, кг ¹	Обеспеченность почв калием			Вынос калия (К ⁺) с 1 га, кг ¹	Обеспеченность почв калием		
			А	Б	В		А	Б	В
Озимая пшеница	2,1	$\frac{29,4}{14}$	1	1	1	$\frac{63 \cdot 105}{30 \cdot 50}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Яровая пшеница	1,9	$\frac{26,6}{14}$	1	1	1	$\frac{57}{30}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Озимая рожь	2,2	$\frac{33}{15}$	1	1	1	$\frac{77}{35}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Ячмень	1,7	$\frac{25,5}{15}$	1	1	1	$\frac{59,5}{35}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Овес	2,2	$\frac{26,4}{12}$	1	1	1	$\frac{55}{25}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Кукуруза на зерно	2,6	$\frac{36,4}{14}$	1	1	1	$\frac{130}{50}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Просо	2,7	$\frac{32,4}{12}$	1	1	1	$\frac{67,5}{25}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Гречиха ²	3,2	$\frac{25,6}{8}$	1	1	1	$\frac{64}{20}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Лен-долгунец	5,8	$\frac{40,6}{7}$	1	1	1	$\frac{75,4}{13}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Подсолнечник на семена	10,0	$\frac{50}{5}$	1	1	1	$\frac{250}{25}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Картофель	0,7	$\frac{84}{120}$	1	1	1	$\frac{210}{300}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3
Свекла сахарная	0,7	$\frac{84}{120}$	1	1	1	$\frac{210}{300}$	1	1	1
			2	2	2		2	2	2
			3	3	3		3	3	3

Примечание: ¹ – значение над чертой – количество калия (К⁺) выносимого с урожаем, указанным под чертой; ² – культуры, способные извлекать калий из необменных форм. Почвы: А – Дерново-подзолистая супесчаная почва, Б - Дерново-подзолистая суглинистая почва, В – чернозем легкогоглинистый; Варианты с удобрениями: 1 – «контроль», 2 – «NPK», 3 – «NPK+навоз»; Обеспеченность калием (по цветовой градации путем сравнения граф запасов калия в почве в целом из табл. 24 и выносом калия с урожаем (табл. 15)): **зеленый** – достаточно калия планарных позиций, **желтый** – достаточно калия при условии мобилизации из специфических позиций, **красный** – требуется вносить дополнительно калий.

Различия значений калия специфических позиций между суммой по фракциям и соответствующими значениями для почвенных образцов ненарушенного состава так же может иметь объяснение. Для всех трех почв в данном случае может быть только одна причина. Из гранулометрических фракций в результате десорбции калий извлекается

только из межпакетного пространства. В результате последовательной десорбции калия из почвенных образцов, элемент был извлечен не только из межпакетных позиций, но и из планарных позиций, которые были заблокированы при внутриагрегатном взаимодействии. В результате периодического перемешивания образцов внутриагрегатные связи могли быть разрушены, что позволило извлечь калий из планарных позиций, находившихся в заблокированном положении. Некоторой аналогией такому перемешиванию можно считать распашку почв, когда боронование и дискование обуславливает разбивание крупных комков почв и создание оптимальных для питания растений по размеру почвенных агрегатов.

Для сопоставления количества калия, доступного для питания, с реальным выносом культур составлена табл. 15

В соответствии с ней для получения минимальных урожаев для всех почв и культур, кроме картофеля и свеклы (в варианте «контроль» супесчаной почвы), достаточно легкоподвижного калия. Для получения оптимальных урожаев на некоторых почвах и их вариантах в исследованных длительных полевых опытах требуется либо мобилизация калия из труднодоступных позиций, либо дополнительное внесение калия, что отмечено желтым и красным цветами соответственно.

5.2 Оптимальные параметры содержания калия в почвах.

Дозы калийных удобрений можно определить по изотермам сорбции калия, зная по нормативам диапазон оптимальных значений легкоподвижного, либо обменного калия. По легкоподвижному калию оптимальным значением, предложенным Шаймухаметовым (2000), является 7-10 мг K^+ / 100 г почвы. В переводе на значение обменного калия, согласно выше описанной корреляции, это составляет 14-20 мг K^+ / 100 г почвы (17-24 мг K_2O / 100 г почвы) и соответствует «Зонально-провинциальным нормативам...» (2010).

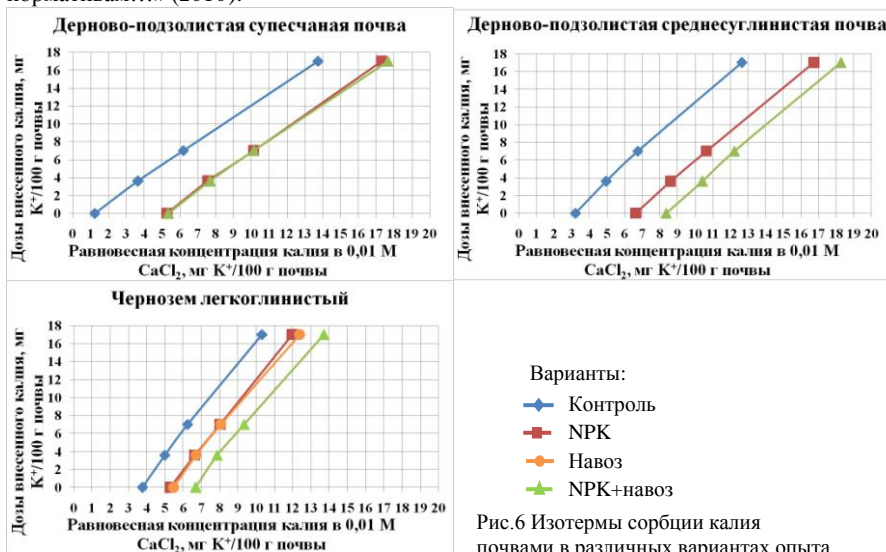


Рис.6 Изотермы сорбции калия почвами в различных вариантах опыта

Для этого были получены изотермы сорбции калия при различных дозах внесения этого элемента. В опыте были использованы растворы 0,01М CaCl₂, содержащие KCl в количестве 0; 0,0001; 0,0002; 0,0005М. Такие концентрации калия в растворах

достаточно для того, чтобы построить необходимые изотермы (рис. 6). На полученных графиках определяем, при каких дозах можно получить равновесное содержание калия равное оптимальному (7-10 мг K^+ / 100 г почвы).

Для перевода лабораторных данных исследования по дозам внесения удобрений из мг/100 в кг/га высчитывается переводной коэффициент, учитывающий плотность и глубину пахотного слоя 1 га почвы. Для перевода значений из ионной формы в форму K_2O – 1,205.

Выводы:

1. Содержание подвижных форм калия в исследованных почвах увеличивается с утяжелением их гранулометрического состава. Закономерности распределения калия по гранулометрическим фракциям одинаковы, как для обменной, так и для легкоподвижной формы элемента. Максимальное содержание обеих форм калия установлено для фракций <0,2 мкм (коллоиды). Содержание калия в более крупных гранулометрических фракциях уменьшается по мере увеличения их размера. Легкоподвижный калий (однократная вытяжка 0,01М $CaCl_2$) в среднем и для почв, и для гранулометрических фракций <10 мкм составил половину от обменной формы калия. Десятикратное вытеснение калия в образцах без инкубирования показало результат, сопоставимый со значениями обменной формы калия.
2. Наибольшей способностью к поглощению калия обладают фракции <10 мкм. При этом максимум ее приходится на коллоиды, минимум – на фракцию 1-10 мкм. Однако фиксация калия коллоидами в результате опыта не установлена. Проявление калий-фиксирующей способности было отмечено для гранулометрических фракций >0,2 мкм в среднесуглинистой и легкоглинистой почвах.
3. Значительная часть подвижного калия в исходных почвах приходится во фракциях <10 мкм. По мере утяжеления гранулометрического состава почв, увеличивается вклад этих фракций в сорбцию и десорбцию калия. При внесении калия в почву главным образом происходит перераспределение долевого участия сорбированного калия между гранулометрическими фракциями <0,2 мкм и 1-10 мкм в пользу последней. При этом доленое участие других фракций изменяется не так значительно.
4. Интенсивность десорбции калия из почв определяется суммарной интенсивностью десорбции этого элемента из гранулометрических фракций <10 мкм. Интенсивность десорбции калия из гранулометрических фракций >10 мкм значительно больше, что свидетельствует о более слабом удержании калия этими фракциями.
5. Быстрое высвобождение калия на начальном участке опыта по динамике десорбции может быть связано с выходом элемента из планарных позиций. Дальнейшее замедление интенсивности десорбции калия – с высвобождением калия из специфических позиций, представленных межпакетным пространством трехслойных глинистых минералов и сколами каркасных силикатов (для калиевых полевых шпатов).
6. Внесение удобрений влияет на изменение содержания подвижных форм калия, как в почве в целом, так и в гранулометрических фракциях <10 мкм. Содержание калия от варианта «контроль» к варианту «NPK+навоз» увеличивается для неинкубированных образцов, но при этом сорбция элемента уменьшается. Влияние внесения удобрений на содержание калия во фракциях >10 мкм не отмечено.
7. Для обеспечения минимальных урожаев основных сельскохозяйственных культур в основном будет достаточно калия, который находится на планарных (легкодоступных) позициях минералов. Однако под пропашные культуры, требовательные к калийному питанию, на супесчаных почвах без внесения удобрений не обойтись. Для получения оптимальных урожаев на тяжелых почвах возможна

мобилизация калия из специфических позиций для вариантов без удобрений (под пропашные культуры). Для супесчаной почвы требуется внесение удобрений (в вариантах «контроль») сверх мобилизации калия из специфических позиций.

Публикация результатов:

В журналах, рекомендованных ВАК

1. *Шаймухаметов М.Ш.* «Влияние длительного применения удобрений на K-фиксирующую способность почв»/ *М.Ш. Шаймухаметов; В.Л. Петрофанов* // **Почвоведение**, 2008; №4. с. 494-506
2. *Shaimukhametov M.Sh.* Effect of long-term fertilization on the K-fixing capacity of soils / *M.Sh. Shaimukhametov, V.L. Petrofanov* // Eurasian Soil Science. 2008. Т. 41. № 4. Р. 441-451

В других журналах, материалах и тезисах конференций

1. **Петрофанов В.Л.** «Влияние длительного применения удобрений на сорбцию-десорбцию калия гранулометрическими фракциями дерново-подзолистой почвы». / **В.Л. Петрофанов** // Бюллетень Почвенного института №64, 2009 г., с. 73-80
2. **Петрофанов В.Л.** «Опыт использования кинетического метода в исследовании десорбции калия из гранулометрических фракций почв» / **В.Л. Петрофанов** // Тезисы докладов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Ломоносов-2010, секция Почвоведение, М., типография Россельхозакадемии, 2010 г., с. 86-87