

## МИГРАЦИОННАЯ ДОСТУПНОСТЬ КАЛИЯ РАСТЕНИЯМ НА СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВАХ

© 2019 г. З. С. Артемьева<sup>1</sup>, А. С. Фрид<sup>1,\*</sup>, В. И. Титова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Почвенный институт им. В.В. Докучаева  
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

<sup>2</sup> Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
603107 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 97, Россия

\*E-mail: asfrid@mail.ru

Поступила в редакцию 06.11.2018 г.

После доработки 12.11.2018 г.

Принята к публикации 10.04.2019 г.

На образцах суглинистых почв (светло-серой, дерново-подзолистой и дерново-слабоподзолистой), отобранных в вариантах полевых опытов, сопоставляли результаты изучения традиционных форм легкоподвижного, обменного и необменного калия, миграционно-доступного калия (опыты по десорбции) и поглощения калия проростками озимой ржи. Поток калия в корни растений составил от 12 до 45% от того, что могла отдать почва при десорбции водой. По величине кинетики десорбции оценены коэффициенты диффузии калия в почвах (диапазон от  $0.15 \times 10^{-8}$  до  $11 \times 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с), а также их зависимости от свойств почв. По результатам вегетационных опытов оценены параметры модели роста корневых систем и модели корневого поглощения калия растениями.

*Ключевые слова:* калий почвы, десорбция из почвы, коэффициенты диффузии калия, миграционная доступность, параметры моделей поступления в растение, озимая рожь, суглинистые почвы.

DOI: 10.1134/S0002188119070032

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работах [1–3] нами была описана миграционная концепция доступности веществ почвы корням растений, изложены ее теоретические и методические предпосылки. Согласно этой концепции, правомерно считать миграционно доступным растению то количество вещества почвы, которое способно подойти к поверхности корня в результате всех возможных почвенных процессов (диффузии в почвенном растворе и адсорбированном состоянии, десорбции и вторичной сорбции, растворения и вторичного осаждения, микробиологических превращений, переноса с потоком поглощенной корнем воды).

Настоящая работа продолжает серию публикаций [4, 5] по сравнению миграционной доступности (МД) калия в почвах с различным гранулометрическим составом в различных вариантах полевых опытов с удобрениями.

Результаты ранее проведенных исследований на 3-х легких почвах показали неустойчивость корреляционных связей между МД калия, его поступлением в проростки зерновых, традиционными формами почвенного калия, другими свой-

ствами почв. Цель настоящей работы – оценить подобные взаимосвязи для 3-х суглинистых почв.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования подробно описана в [4]. Напомним кратко ее основные моменты. На установке типа капилляриметра в лабораторных условиях насыпные образцы почв омывали с поверхности потоком дистиллированной воды и оценивали количество смытого калия ( $Q$ ) за заданное время (до 4 сут). По этому количеству рассчитывали коэффициенты диффузии калия в почве в пересчете на разные формы его содержания в почве (от валового до легкоподвижного). Свойства почв и формы калия определяли в основном традиционными методами. Вегетационные опыты с проростками зерновых (возрастом до 21 сут) проводили в сосудах Вагнера. Для растений определяли содержание N, P, K, биомассу, общую и рабочую (поглощающую) поверхность корней по Колосову [6]. Для расчетов использовали модели диффузии, динамики корневых систем [7] и динамики корневого поглощения веществ растениями [8].

Таблица 1. Условия проведения десорбционных опытов

Вариант полевого опыта	n	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	Влажность почвы, %		Температура (медиана и размах), °С
			от массы	от объема	
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)					
Контроль	2	1.45	30.8	44.7	19.7 (18–21)
НРК	2	1.54–1.56	26.8	41.3–41.8	21.6 (21–22)
Навоз	2	1.55–1.56	26.3	40.8–41.0	24.1 (22–26)
НРК + навоз	2	1.36–1.45	31.7–33.9	45.9–46.1	22.3 (17.5–25.5)
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)					
Контроль	2	1.32–1.46	36.7–36.8	48.6–53.5	24.4 (23–26)
3(НРК)	2	1.59–1.62	24.9	39.7–40.4	23.3 (21–24)
Известь	2	1.57–1.65	26.3	41.3–43.4	19.3 (16.22)
Навоз	2	1.41–1.53	32.6	46.0	19.5 (17–23)
Навоз + 3(НРК)	2	1.51–1.52	27.6	41.7	21.8 (18.5–23)
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая (Марий-Эл)					
Минимальная обработка – 1	2	1.57	27.6	43.3	19.5 (18–21)
Минимальная обработка – 2	2	1.44	31.2	44.9	22.3 (19–24.5)
Усиленная обработка – 1	2	1.50–1.57	28.6	42.9–44.9	20 (18–21)
Усиленная обработка – 2	2	1.47–1.49	29.3	43.1–43.7	19.7 (16–21)

n – число повторностей десорбционного опыта

Образцы пахотного горизонта светло-серой лесной легкосуглинистой почвы были отобраны в 1999 г. в вариантах длительного полевого опыта Нижегородской СХА, заложенного в 1964 г. в учебно-опытном хозяйстве “Новинки” (Богородский р-н Нижегородской обл.). Почва сформирована на лессовидных покровных суглинках (тип агроземов текстурно-дифференцированных или тип агродерново-подзолистых почв в зависимости от глубины вспашки – по Классификации почв России [9]). Исследовали образцы вариантов: контроль (без удобрений), НРК, навоз, НРК + + навоз. Дозы минеральных удобрений ( $N_a$  – до 1992 г.,  $N_{aa}$  – с 1992 г.,  $P_{сдг}$ ,  $K_x$ ) – 45–90 кг д.в./га в зависимости от культуры севооборота, доза полуперепревшего подстильного навоза *KPC* – 40 т/га под одну из культур севооборота. Севооборот плодосменный с чередованием культур: озимая пшеница, картофель, овес, травы, травы (в качестве трав поочередно использовали клевер 2-х лет пользования или викоовсяную смесь и клевер 1-го года пользования).

Образцы дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы были отобраны в 1983 г. и любезно предоставлены В.Г. Граковским из вариантов длительных опытов Долгопрудной опытной станции (ДАОС) Московской области [10]: контроль, 3(НРК), известь, навоз, навоз + 3(НРК). Варианты выбраны контрастно из разных опытов.

Образцы дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой почвы отобраны около 2000 г. и любезно предоставлены Н.С. Алметовым из вариантов опыта Марийской республиканской станции химизации сельского хозяйства (колхоз “Первое мая” Новотарьяльского р-на Республики Марий-Эл) [11]: усиленная и минимальная обработки почвы с 2-мя дозами удобрений (1 и 2). Почва – малогумусная на покровном суглинке, подстилаемом пермскими карбонатными глинами. Севооборот – зернопропашной.

Условия проведения десорбционных опытов для определения миграционной доступности приведены в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представлены химические, физико-химические и агрохимические характеристики образцов почв (табл. 2–4). Там, где имелась информация, приведены также допустимые межлабораторные расхождения методов анализа для бесповторных определений ( $D_{ан}$ ).

Валовые составы (табл. 2) и совокупность агрохимических и физико-химических свойств почв (табл. 3, 4) были проанализированы методами оценки сходства всей совокупности вариантов и методом главных компонент (МГК). Результаты такого анализа неоднозначны. По валовому

**Таблица 2.** Валовой химический состав образцов почв (макроэлементы), %

Вариант	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)										
Контроль	74.8	10.3	3.58	0.92	0.22	2.33	2.51	2.56	1.99	0.22
НРК	77.3	10.1	3.88	0.86	0.18	2.26	2.22	2.58	1.70	0.26
Навоз	78.4	10.2	3.91	0.84	0.20	2.24	2.71	2.72	0.02	0.04
НРК + навоз	76.0	13.3	4.21	0.72	0.14	2.16	1.81	2.63	0.83	**
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)										
Контроль	77.4	12.4	3.69	0.83	0.08	0.81	1.16	2.58	1.01	–
3(НРК)	80.3	10.7	2.56	0.86	0.12	0.84	1.06	2.59	1.01	–
Известь	80.1	10.8	2.72	0.86	0.11	0.79	1.07	2.54	1.01	–
Навоз	79.3	11.3	3.14	0.85	0.09	0.73	1.05	2.56	1.01	–
Навоз + 3(НРК)	79.3	11.2	3.05	0.87	0.09	0.90	0.90	2.67	1.01	–
Д <sub>ан</sub> * [11]	1	1	0.5–0.6	0.2	>0.03	0.5–0.6	0.3–0.4	≥0.4	≤0.06... ≥0.3	≤0.02... ≥0.08

\* Д<sub>ан</sub> – допустимые межлабораторные расхождения методов анализа для бесповторных определений. То же в табл. 3, 4. \*\* Ниже предела обнаружения.

**Таблица 3.** Агрохимические и физико-химические свойства образцов почв

Вариант	С <sub>орг</sub> , %		рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /рН <sub>KCl</sub>	Н <sub>г</sub>	ЕКО		Емкость фиксации К
	1	2			Ca/NH <sub>4</sub>	K/NH <sub>4</sub>	
	мг-экв/кг почвы						
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)							
Контроль	1.03	1.28	6.0/4.9	21.1	293	207	86
НРК	0.96	1.22	6.3/4.6	29.6	289	233	56
Навоз	1.05	1.32	6.2/4.6	24.5	333	222	111
НРК + навоз	0.93	1.17	6.1/4.6	28.0	307	233	74
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)							
Контроль	0.52	0.66	6.8/5.0	14.8	442	267	175
3(НРК)	0.94	1.14	7.4/6.1	10.5	301	261	40
Известь	0.70	0.85	7.2/5.7	8.7	279	222	57
Навоз	0.84	1.04	5.9/4.67	22.8	338	222	116
Навоз + 3(НРК)	1.12	1.35	7.1/5.8	14.0	362	233	129
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая (Марий-Эл)							
Минимальная обработка – 1	–	–	7.6/6.5	4.3	553	311	242
Минимальная обработка – 2	–	–	6.9/6.1	1.1	538	333	205
Усиленная обработка – 1	–	–	7.3/6.2	7.9	409	350	59
Усиленная обработка – 2	–	–	6.8/5.9	17.5	484	294	190
Д <sub>ан</sub> [11]	0.4–0.5	0.3–0.4	0.1/0.4	7–10	≈20...>200	≈20–50	–

Примечание. Содержание органического углерода в графе 1 – по Тюрину, 2 – сухим сжиганием.

составу образцы почв из Новинок четко отличались от образцов из ДАОС по первой главной компоненте (ГК1) большим содержанием CaO, MgO, MnO и меньшим – SiO<sub>2</sub>. В то же время, по величине второй главной компоненты (ГК2) об-

разцы из ДАОС были намного ближе друг другу, чем образцы из Новинок; последние сильно растянуты в том же порядке, что записаны в табл. 2 (т.е. разделялись образцы вариантов без навоза и с навозом). Основным разделяющим показателем

Таблица 4. Формы калия в образцах почв, мг К/кг почвы

Вариант	Валовой	Необменный по Пчелкину (без вычета обменного)	Обменный по Масловой	Легкоподвижный (0.01M CaCl <sub>2</sub> )
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)				
Контроль	21200	330(8.44*)	84(2.15)	40(1.0)
НРК	21400	358(9.16)	106(2.71)	46(1.2)
Навоз	22600	320(8.18)	99(2.53)	40(1.0)
НРК + навоз	21800	360(9.21)	120(3.07)	46(1.2)
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)				
Контроль	21400	391(10)	106(2.71)	30(0.77)
3(НРК)	21500	460(11.8)	190(4.86)	82(2.1)
Известь	21100	348(8.90)	48(1.2)	20(0.51)
Навоз	21300	339(8.67)	106(2.71)	36(0.92)
Навоз + 3(НРК)	22200	535(13.7)	217(5.55)	88(2.25)
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая (Марий-Эл)				
Минимальная обработка – 1	–	400(10.2)	106(2.71)	30(0.77)
Минимальная обработка – 2	–	600(15.3)	217(5.55)	78(2.0)
Усиленная обработка – 1	–	460(11.8)	113(2.89)	30(0.77)
Усиленная обработка – 2	–	600(15.3)	223(5.71)	88(2.25)
Д <sub>ан</sub> [11]	≥3300	–	25–33	–

\*В скобках – мг-экв К/кг почвы.

по ГК2 для образцов из Новинок оказалось содержание TiO<sub>2</sub> – его несколько меньше в вариантах с навозом, а для образцов из ДАОС – содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Напомним, что валовые содержания макроэлементов отражают в основном генетическую характеристику почв, в том числе, почвообразующих пород.

По-другому выглядит ситуация при рассмотрении совокупности агрохимических и физико-химических свойств образцов почв. По первым двум ГК (охватывающим 89% вариации показателей) образцы из ДАОС расположены между образцами из Новинок и Марий-Эл, причем только образцы из Новинок образуют компактную группу с уровнем сходства ≥87%. Образцы из ДАОС и Марий-Эл образовали довольно рыхлые группы, внутри которых варианты с НРК (ДАОС) отделяются от других, а для Марий-Эл разделяются образцы с 1-й и 2-й дозами удобрений, а не с разными обработками. Три территории опытов разделяются (в виде тенденции) ростом содержания калия по Пчелкину и по Масловой: Новинки ≤ ДАОС ≤ Марий-Эл, а варианты внутри территорий – довольно четко по содержанию легкоподвижного калия.

По последней совокупности показателей наиболее высокие и значимые корреляции ( $P = 0.99$ )

найлены между емкостями обмена Са и К, а также между тремя показателями подвижности калия (по Пчелкину, по Масловой и легкоподвижного). Менее тесная и менее значимую корреляцию ( $P = 0.95$ ) отметили между содержанием калия по Пчелкину и емкостями обмена Са и К. Таким образом, несмотря на высокую корреляцию между формами калия, эти формы, в первую очередь, но по-разному повлияли на разделение всей совокупности образцов почв между территориями и внутри территорий.

Результаты десорбционных экспериментов представлены в табл. 5, а рассчитанные по кинетическим кривым десорбции и содержаниям различных форм калия коэффициенты диффузии ( $D$ ) последнего в образцах почв – в табл. 6.

С помощью многофакторного дисперсионного анализа [13] была проанализирована зависимость среднего потока калия ( $q_{\text{дес}}$ ) из почв (табл. 5) от совокупности агрохимических и физико-химических показателей (табл. 3, 4) всех изученных образцов почвы. Найдена наиболее тесная связь со всеми 3-мя формами калия (по Пчелкину, по Масловой и легкоподвижного), причем влияния этих показателей на средний поток очень тесно коррелировали между собой; влияние других показателей было значительно меньше и менее зна-

**Таблица 5.** Миграционно-доступный калий ( $Q$ ) по результатам десорбционных опытов (средние показатели)

Вариант	$Q$ , мкг К/см <sup>2</sup>				Средний поток К из почвы за 4 сут ( $q_{\text{дес}}$ ), мкг/см <sup>2</sup> /сут	
	время, сут					
	1	2	3	4	К	К <sub>2</sub> O
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)						
Контроль	1.94	3.03	4.02	4.92	1.23	1.48
НРК	2.35	3.88	5.41	6.86	1.72	2.07
Навоз	2.53	3.93	4.78	6.00	1.50	1.81
НРК + навоз	2.39	4.01	5.64	6.78	1.70	2.05
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)						
Контроль	1.89	3.43	4.51	5.86	1.47	1.77
3(НРК)	9.29	15.3	20.0	24.3	6.08	7.33
Известь	2.39	3.56	4.73	5.68	1.42	1.71
Навоз	3.03	4.15	5.01	6.00	1.50	1.81
Навоз + 3(НРК)	8.30	12.7	16.9	19.1	4.78	5.76
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая (Марий-Эл)						
Минимальная обработка – 1	1.35	1.8–2.3	2.3–3.2	2.7–4.1	0.68–1.0	0.81–1.2
Минимальная обработка – 2	3.4–4.5	6.7–7.8	9.9–10.5	12.6	3.2	3.9
Усиленная обработка – 1	1.71	2.8–3.0	3.7–4.2	4.6–5.3	1.2–1.3	1.4–1.6
Усиленная обработка – 2	3.1–4.2	5.8–7.8	7.9–11.0	10.1–14.3	2.5–3.6	3.0–4.3

чимо. Для построения регрессионного уравнения за основу был взят обменный калий по Масловой, получено уравнение с хорошими статистическими характеристиками:

$$q_{\text{дес}} = 34.75 - 0.368K(\text{Маслова}) + 0.161 \times 10^{-3} K(\text{Маслова})^2 - 3.38p_{\text{H}_2\text{O}} - 1.615p_{\text{H}_{\text{KCl}}} + 0.0494p_{\text{H}_2\text{O}}K(\text{Маслова}),$$

где средняя ошибка уравнения – 0.61, уровень значимости уравнения – 0.01,  $R^2 = 0.91$ . Здесь  $q_{\text{дес}}$  – средний поток калия (мкг/см<sup>2</sup>/сут),  $K$  (Маслова) – мг К/кг почвы. Из уравнения видно нелинейное изменение среднего потока от содержания обменного калия и величины рН.

По литературным данным, обобщенным в [3], коэффициенты диффузии калия в суглинистых почвах при комнатной температуре имели порядок  $10^{-8} - 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с, следовательно, использование в нашем случае для расчета  $D$  содержания валового калия дает неприемлемые результаты ( $D$  порядка  $10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с) (табл. 6). Приемлемый выбор других форм почвенного калия требует дополнительного обоснования.

Предлагаем для такого выбора опираться на известное выражение для коэффициента диффу-

зии вещества в адсорбирующей двухфазной среде [14, 15]:

$$D = \frac{D_1(l_0/l_1)^2\Theta_1 + D_2(l_0/l_2)^2\Theta_2K_p}{\Theta_1 + \Theta_2K_p}, \quad (1)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты диффузии в растворе и адсорбированном состоянии,  $(l_0/l_1)^2$  и  $(l_0/l_2)^2$  – коэффициенты извилистости при диффузии в этих состояниях,  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  – объемные доли раствора и адсорбирующей твердой фазы,  $K_p$  – коэффициент распределения диффундирующего вещества между твердой фазой (адсорбированным состоянием) и раствором.

Так как известно, что основное количество подвижного калия находится в адсорбированном (в том числе, обменном) состоянии, то  $\Theta_2K_p \gg \Theta_1$  и формулу (1) можно переписать в виде

$$D = D_1(l_0/l_1)^2(\Theta_1/\Theta_2)/K_p + D_2(l_0/l_2)^2, \quad (2)$$

который может быть представлен как регрессия  $D$  на  $1/K_p$  с коэффициентом регрессии  $D_1(l_0/l_1)^2(\Theta_1/\Theta_2)$  и свободным членом  $D_2(l_0/l_2)^2$ , которые в свою очередь можно приблизительно принять слабо меняющимися в рамках данной серии суглинистых образцов. Переменный же коэффициент распределения можно связать с изме-

Таблица 6. Коэффициенты диффузии ( $D \times 10^8$ , см<sup>2</sup>/с) калия в почве

Вариант	Форма калия почвы, взятая для расчета $D$				
	валовая	необменная + + обменная по Пчелкину	необменная по Пчелкину	обменная по Масловой	легкоподвижная
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)					
Контроль	$\frac{0.97 \times 10^{-5}}{(0.95-0.98) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.040}{0.040-0.041}$	$\frac{0.072}{0.071-0.073}$	$\frac{0.61}{0.61-0.62}$	$\frac{2.8}{2.7-2.8}$
НРК	$\frac{(1.1-3.0) \times 10^{-5}}{(1.1-3.0) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.074}{0.038-0.110}$	$\frac{0.15}{0.075-0.216}$	$\frac{0.82}{0.43-1.20}$	$\frac{4.8}{2.3-7.3}$
Навоз	$\frac{1.0 \times 10^{-5}}{(0.4-1.6) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.049}{0.020-0.078}$	$\frac{0.10}{0.042-0.161}$	$\frac{0.51}{0.21-0.81}$	$\frac{3.1}{1.3-4.9}$
НРК+ навоз	$\frac{1.7 \times 10^{-5}}{(1.6-1.7) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.061}{0.059-0.062}$	$\frac{0.14}{0.133-0.139}$	$\frac{0.54}{0.53-0.55}$	$\frac{3.7}{3.6-3.8}$
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)					
Контроль	$\frac{1.5 \times 10^{-5}}{(1.3-1.7) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.045}{0.037-0.052}$	$\frac{0.083}{0.070-0.096}$	$\frac{0.61}{0.51-0.70}$	$\frac{7.6}{6.4-8.8}$
3(НРК)	$\frac{17 \times 10^{-5}}{(11-22) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.36}{0.24-0.48}$	$\frac{1.1}{0.70-1.4}$	$\frac{2.1}{1.4-2.8}$	$\frac{11}{7.5-15}$
Известь	$\frac{0.87 \times 10^{-5}}{(0.4-1.3) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.032}{0.016-0.048}$	$\frac{0.041}{0.021-0.064}$	$\frac{1.7}{0.85-2.5}$	$\frac{10}{4.9-15}$
Навоз	$\frac{0.88 \times 10^{-5}}{(0.3-1.5) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.034}{0.010-0.058}$	$\frac{0.07}{0.02-0.12}$	$\frac{0.35}{0.10-0.60}$	$\frac{3.0}{0.88-5.2}$
Навоз + 3(НРК)	$\frac{8.6 \times 10^{-5}}{(7.8-9.5) \times 10^{-5}}$	$\frac{0.15}{0.13-0.16}$	$\frac{0.42}{0.38-0.46}$	$\frac{0.90}{0.81-0.99}$	$\frac{5.5}{4.9-6.0}$
Дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая (Марий-Эл)					
Минимальная обработка – 1	–	$\frac{0.011}{0.005-0.016}$	$\frac{0.028}{0.014-0.042}$	$\frac{0.15}{0.073-0.23}$	$\frac{1.9}{0.91-2.8}$
Минимальная обработка – 2	–	$\frac{0.083}{0.079-0.087}$	$\frac{0.20}{0.19-0.21}$	$\frac{0.64}{0.60-0.67}$	$\frac{4.9}{4.6-5.2}$
Усиленная обработка – 1	–	$\frac{0.019}{0.015-0.023}$	$\frac{0.033}{0.026-0.040}$	$\frac{0.31}{0.24-0.38}$	$\frac{4.5}{3.5-5.4}$
Усиленная обработка – 2	–	$\frac{0.081}{0.051-0.11}$	$\frac{0.20}{0.13-0.28}$	$\frac{0.59}{0.37-0.81}$	$\frac{3.8}{2.4-5.2}$

Примечание. Над чертой – средние показатели, под чертой – размах варьирования.

ренными формами калия. В первую очередь можно принять  $K_p = K(\text{Пчелкин})/K(\text{CaCl}_2)$  или  $K(\text{Маслова})/K(\text{CaCl}_2)$ , предполагая, что легкоподвижный калий соответствует почвенному раствору. Однако расчет  $D$  из экспериментальных данных по десорбции через  $K(\text{CaCl}_2)$  дал порядок величины  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с, что значительно меньше,

чем известно для воды и разбавленных растворов ( $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с) (табл. 6) [3]. Следовательно, хлоркальциевая вытяжка затрагивает хотя бы частично сорбированный калий, и предложенные выше выражения для  $K_p$  вероятно занижены. Поэтому предложено умножить их дополнительно на величину  $D_1/D(\text{CaCl}_2)$ , отражающую некоторым об-

разом вышеуказанное обстоятельство. В результате получим для регрессии формулу

$$D = D_1(l_0/l_1)^2(\Theta_1/\Theta_2) \frac{K(\text{CaCl}_2)D(\text{CaCl}_2)}{K(\text{Пчелкин})D_1} + K_2(l_0/l_2)^2 = b \frac{K(\text{CaCl}_2)D(\text{CaCl}_2)}{K(\text{Пчелкин})D_1} + a \quad (3)$$

или аналогичную для  $K(\text{Маслова})$  вместо  $K(\text{Пчелкин})$ . При этом существенно важно, что оба члена формулы регрессии должны быть по смыслу положительными.

Перебор всех возможных вариантов расчетов по этой формуле для разных  $D$  из табл. 6 и двух вариантов  $K_p$ , указанных выше, показал лишь 2 подходящих варианта: а) при использовании  $D(\text{Маслова})$  и  $K(\text{Пчелкин})$  и б) при использовании  $D(\text{CaCl}_2)$  и  $K(\text{Маслова})$ . Для них коэффициенты регрессии положительны, величины  $D_2(l_0/l_2)^2$  получились  $0.15 \times 10^{-8}$  и  $0.82 \times 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с (что приемлемо и лишь несколько меньше того, что было ранее найдено для <sup>90</sup>Sr [16]), а рассчитанный по коэффициенту регрессии  $b$  коэффициент диффузии для почвенного раствора  $D_1$  равен  $(2.4-5.2) \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с (что почти совпадает со справочными данными для калия [3]). Таким образом, используя данный полуэмпирический подход, выяснилось, что для расчета коэффициента диффузии калия в данных почвах на основе десорбционных опытов оказалось приемлемым использовать только обменный калий по Масловой и легкоподвижный калий хлоркальциевой вытяжки.

Для этих 2-х коэффициентов диффузии получили также эмпирические зависимости (дисперсионный и регрессионный анализы) от свойств почв:

$$D(\text{Маслова}) \times 10^8 = 6.86 - 0.299H_r - 0.113\text{EKO}(\text{K}) + 0.180K_{\text{фикс}} - 0.156 \times 10^{-2} H_r \cdot \text{EKO}(\text{Ca}) + 0.335 \times 10^{-2} H_r \cdot \text{EKO}(\text{K}) - 0.0233p\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{EKO}(\text{Ca}) + 0.0353p\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{EKO}(\text{K}),$$

где  $R^2 = 0.95$ , значимость уравнения = 0.025, значимость коэффициентов регрессии = 0.05–0.01, стандартное отклонение (средняя ошибка уравнения) =  $0.19 \times 10^{-8}$ ;

$$D(\text{CaCl}_2) \times 10^8 = 36.9 - 1.92H_r + 0.886\text{EKO}(\text{Ca}) - 1.42\text{EKO}(\text{K}) -$$

$$- 0.755 \times 10^{-2} H_r \cdot \text{EKO}(\text{Ca}) + 0.0179H_r \cdot \text{EKO}(\text{K}) - 0.115p\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{EKO}(\text{Ca}) + 0.171p\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{EKO}(\text{K}),$$

где  $R^2 = 0.94$ , значимость уравнения = 0.025, значимость коэффициентов регрессии = 0.05–0.01, стандартное отклонение (средняя ошибка уравнения) =  $1.1 \times 10^{-8}$ .

В оба уравнения регрессии вошли в основном одни и те же показатели, что подтвердило значимую ( $P = 0.95$ ) оценку корреляции между  $D(\text{Маслова})$  и  $D(\text{CaCl}_2)$  ( $r = 0.62$ ). В то же время в отличие от  $D(\text{CaCl}_2)$ , в уравнение для  $D(\text{Маслова})$  вошло влияние емкости фиксации калия. В целом характер уравнений таков, что свободные члены значительно больше максимальных средних величин  $D$  из табл. 6, следовательно, увеличение параметров учтенных в этом случае свойств почв суммарно соответствует снижению расчетных величин  $D$ .

Обратимся к данным вегетационных опытов (табл. 7). Чтобы более четко отразить временную динамику, некоторые исходные данные были подвергнуты графическому сглаживанию. Известно, что параметры различных характеристик растений в ходе их роста и развития, в том числе вынос элементов питания, зависят от множества факторов. В данной работе в вегетационных опытах различались лишь почвенные показатели, поэтому все отмеченные различия можно отнести за их счет.

Как и выше, данные табл. 7 были проанализированы методом дендрограмм сходства и методом главных компонент (МГК). Найдено, что данные для почв Новинок и ДАОС четко разделялись между собой по совокупности большинства показателей, а варианты опытов внутри почв разделялись по содержанию  $K_2O$  в растениях в сроки 7 и 14 сут. Эта картина очень близка полученной ранее при аналогичном анализе валовых составов этих почв. По агрохимическим показателям (см. выше) разделение почв и особенно вариантов было хуже. Такой результат был неожиданным — обычно считается, что рост растений лучше коррелирует с агрохимическими показателями почв.

В то же время анализ зависимости содержания калия в целом растении от физико-химических и агрохимических показателей (дисперсионный и регрессионный анализы) позволил получить хорошее уравнение связи для 21-суточных проростков:

$$K_2O(\text{мг/растение}) = 67.301 -$$

**Таблица 7.** Экспериментальные данные вегетационных опытов с озимой рожью (средние для 40 проростков)

Вариант	Время от посева, сут	Поверхность корней одного растения, м <sup>2</sup>		Воздушно-сухая масса одного растения, мг	Содержание элемента, мг/растение		
		общая	рабочая		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)							
—	0	0	0	1 семя	0.028	0.053	0.08
Контроль	7	2.28	0.55	162	0.37	1.75	2.25
	14	2.65	0.61	182	0.60	2.22	3.80
	21	3.02	0.77	253	0.90	3.08	7.78
NPK	7	1.86	0.55	164	0.40	2.53	3.60
	14	2.23	0.59	183	0.57	3.04	5.22
	21	2.60	0.67	198	0.68	—	—
Навоз	7	1.63	0.67	126	0.48	2.18	1.69
	14	1.91	0.67	186	0.60	2.74	6.18
	21	2.84	0.67	209	—	3.22	8.33
NPK + навоз	7	1.73	0.57	170	0.30	1.91	1.79
	14	2.28	0.67	194	0.51	3.06	5.34
	21	3.01	0.78	228	0.61	—	—
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)							
Контроль	7	0.560	0.138	740	1.36	0.728	3.7
	14	0.673	0.138	850	2.09	1.13	4.9
	21	0.749	0.156	980	2.42	1.34	5.7
3(NPK)	7	0.510	0.146	560	0.731	0.878	2.32
	14	0.548	0.145	860	1.75	1.58	6.81
	21	0.669	0.169	1780	3.79	2.32	12.0
Известь	7	0.481	0.157	730	1.07	0.929	1.11
	14	0.502	0.164	800	1.88	1.07	5.55
	21	0.513	0.164	1400	3.90	1.83	6.76
Навоз	7	0.572	0.169	710	1.15	0.809	4.00
	14	0.496	0.172	720	1.67	0.847	4.66
	21	0.547	0.188	1560	3.64	1.97	9.87
Навоз + 3(NPK)	7	0.495	0.146	480	0.669	0.380	1.51
	14	0.533	0.167	740	1.88	1.3	5.56
	21	0.694	0.192	1500	4.50	1.22	9.46

Примечания. 1. Некоторые величины после графического сглаживания. 2. Прочерк означает необъяснимые данные.

$$\begin{aligned}
 & - 0.080545EKO(Ca/NH_4) - 11.27C_{орг}(\text{Тюрин}) + K_2O(\text{мг/растение}) = 48.475 - \\
 & + 0.387 \times 10^{-3}EKO(Ca/NH_4)K(\text{Маслова}) - - 0.073EKO(Ca/NH_4) - 8.634C_{орг}(\text{Тюрин}) + \\
 & - 0.12785K(\text{Пчелкин}) + + 0.3529 \times 10^{-3}EKO(Ca/NH_4)K(\text{Маслова}) - \\
 & + 0.7665 \times 10^{-4}K(\text{Пчелкин})^2, - 0.05745K(\text{Пчелкин}),
 \end{aligned}$$

где размерности показателей соответствуют таблицам 3 и 4,  $R^2 \approx 1.0$ , уровни значимости уравнения = 0.005 и коэффициентов регрессии = 0.05–0.01, ошибка уравнения = 0.013 мг/растение. Немного упрощенный вариант тоже пригоден:

где  $R^2 = 0.996$ , уровни значимости уравнения = 0.025 и коэффициентов регрессии = 0.10–0.01, ошибка уравнения = 0.23 мг/растение. Дальнейшее упрощение приводит к резкому ухудшению всех статистических характеристик.

**Таблица 8.** Параметры моделей роста корневых систем и поглощения калия в вегетационных опытах с озимой рожью

Вариант	Интервал роста растений, сут	$\tau$ , сут	Скорость возникновения новых корней, ( $a$ , м <sup>2</sup> /сут), ( $b$ , м <sup>2</sup> /сут <sup>2</sup> )	Расчитанный поток К <sub>2</sub> О в корни ( $q_{\text{раст}}$ ), мкг/(см <sup>2</sup> сут)	$q_{\text{раст}}/q_{\text{дес}}$	ККП $\times 10^8$ (см <sup>2</sup> /с) для форм калия почвы	
						обменной по Масловой	легкоподвижной
Светло-серая легкосуглинистая лесная почва (Новинки)							
Контроль	7–14	1.7	0.005	0.27	0.18	2.2	4.6
	14–21	7.6	0.003	0.18	0.12	0.81	1.7
NPK	7–14	1.1	0.005	0.42	0.20	2.5	6.0
	14–21	3.8	0.003	–	–	–	–
Навоз	7–14	–	(0.04)	–	–	–	–
	14–21	–	(0.13)	–	–	–	–
NPK + навоз	7–14	2.3	0.007	0.34	0.17	1.9	4.9
	14–21	2.6	0.006	–	–	–	–
Дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (ДАОС)							
Контроль	7–14	–	(0.016)	–	–	–	–
	14–21	4.1	0.0006	0.30	0.17	1.7	5.9
3(NPK)	7–14	–	(0.005)	–	–	–	–
	14–21	3.5	0.001	1.3	0.18	3.3	7.5
Известь	7–14	–	(0.003)	–	–	–	–
	14–21	–	(0.0016)	–	–	–	–
Навоз	7–14	–	–	–	–	–	–
	14–21	–	–	–	–	–	–
Навоз + 3(NPK)	7–14	5.8	0.0005	2.6	0.45	5.7	14
	14–21	2.7	0.0013	0.98	0.17	2.3	5.7

Примечания. 1. В скобках показаны величины параметра  $a$ . 2. Прочерк – невозможность расчета параметра в данном конкретном случае.

Из этих уравнений следует, что поглощение калия 21-суточными проростками уменьшалось с ростом в почве ЕКО(Ca/NH<sub>4</sub>), содержания органического углерода и содержания калия по Пчелкину. Этот результат не противоречит полученной выше зависимости от агрохимических свойств почв для десорбционного потока ( $q_{\text{дес}}$ ).

Главная задача подобных вегетационных опытов в данной работе состояла в попытке согласования их результатов с результатами опытов по десорбции, в данном случае – калия. Как и в предыдущих работах [4, 5], для такого согласования использовали математическую модель корневого поглощения веществ растениями. Сначала по модели временной динамики поверхности корней рассчитали среднее время активного поглощения веществ элементом рабочей (поглощающей) поверхности корней ( $\tau$ ), принимая для скорости возникновения новой поверхности корней в зависимости от конкретной (измеренной)

их динамики модели  $dS/dt = a$  или  $dS/dt = bt$  ( $S$  – поверхность,  $t$  – время,  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты). Затем рассчитывали поток калия через единицу рабочей (поглощающей) поверхности корней по формуле  $Q(t_2 - t_1) = 0.5b\tau(t_2^2 - t_1^2 - t_2\tau + t_1\tau)q_{\text{раст}}(\tau/2)$ , где  $Q(t_2 - t_1)$  – количество вещества, поглощенное одним растением за интервал времени ( $t_2 - t_1$ ) при  $t_2$  и  $t_1 > \tau$ ,  $q_{\text{раст}}(\tau/2)$  – поток вещества, соответствующий времени  $\tau/2$ . Результаты расчетов параметров модели представлены в табл. 8.

Параметры  $\tau$  близки по порядку величины к тем, что получены ранее для зерновых культур [4, 5, 17]. Поток калия в корни ( $q_{\text{раст}}$ ) явно увеличивался при внесении удобрений по сравнению с контролем в вариантах обеих почв. Максимальный поток в корень соответствовал условию, когда корень не создает препятствий поглощению из контактирующей с ним почвы, и равен  $q_{\text{дес}}$ .

В результате реальное поглощение составило в данном опыте от 12 до 45% от максимального. В модели корневого поглощения [8] это отражено с помощью параметра “коэффициент корневого поглощения” (*ККП*), связанного со способностью растений к корневному поглощению и определяемого из граничного условия на поверхности корня  $q_{\text{раст}} = \text{ККП} \cdot c(0)$ , где  $c(0)$  – концентрация поглощаемого вещества в почве у поверхности корня. Величины *ККП* также представлены в табл. 8; они рассчитаны с помощью формулы (4):

$$\frac{q_{\text{раст}}}{q_{\text{дес}}} = \frac{\sqrt{\pi y} [1 - \text{erf}(y)]}{\exp(-y^2)},$$

пренебрегая поступлением калия с транспирационным потоком влаги. Здесь  $y = \text{ККП}(t/D)^{1/2}$ ,  $\text{erf}(\dots)$  – интеграл вероятности,  $\exp(\dots)$  – экспонента. Полученные оценки *ККП* в этом случае несколько выше тех, что были найдены для легких почв [4, 5].

Корреляционный анализ данных табл. 8 показал сильную и значимую корреляцию между показателями  $q_{\text{раст}}$ ,  $q_{\text{раст}}/q_{\text{дес}}$ , *ККП*(Маслова) и *ККП*(CaCl<sub>2</sub>), не коррелировал с этой группой параметр  $\tau$ . Анализ этих же данных методами дендрограмм сходства и МГК подтвердил эту ситуацию – для ГК1: именно по группе взаимокоррелированных показателей сильно отделился от других вариант навоз + 3(НРК) (ДАОС) для срока 7–14 сут с наибольшими из всех показателями  $q_{\text{раст}}$ ,  $q_{\text{раст}}/q_{\text{дес}}$ , *ККП*(Маслова) и *ККП*(CaCl<sub>2</sub>). Другие варианты разделились между собой по величине ГК2 по параметру  $\tau$ . При этом разделение групп образцов из Новинки и из ДАОС проявилось частично, а четко разделились сроки опыта – меньшие  $\tau$  для 7–14 сут и большие – для 14–21 сут. Разделение образцов из разных вариантов полевых опытов было выражено слабо.

Такое разделение почвенных образцов по параметрам модели корневого поглощения калия растениями заметно отличается от вышеприведенных разделений по характеристикам самих почв и по прямым измерениям в вегетационных опытах, но его видимо следует считать предварительным, т.к. выборка для группировки в этом случае была неполной и составила только 8 случаев из 19 потенциально возможных в табл. 8.

## ВЫВОДЫ

1. Образцы суглинистых почв полевых опытов из 3-х регионов разделялись как в зависимости от валового химического состава, так и по совокупности физико-химических и агрохимических

свойств. Важным разделяющим показателем было содержание калия по Пчелкину и по Масловой.

2. Найдена зависимость десорбционного потока калия из почв от содержания обменного калия и рН почвы.

3. По результатам десорбционных опытов оценены коэффициенты диффузии (*D*) калия в почвах. При этом показано, что для расчетов *D* адекватно использовать содержания калия почвы по Масловой и легкоподвижного (хлоркальциевая вытяжка). Получены зависимости оценок *D* от свойств почв.

4. По результатам вегетационных опытов с проростками озимой ржи получены зависимости поглощения калия целым растением от физико-химических и агрохимических свойств почв. Оценены параметры математических моделей динамики корневых систем растений и динамики поглощения калия растениями. Рассчитано, что реальное поглощение калия составляло от 12 до 45% от максимально возможного.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С. Миграционная концепция доступности веществ почвы корням растений // Агрохимия. 1996. № 3. С. 29–37.
2. Фрид А.С. Методические подходы к оценке доступности веществ почвы корням растений с помощью миграционной концепции // Агрохимия. 1996. № 5. С. 89–99.
3. Фрид А.С. Опыт экспериментальной оценки доступности веществ почвы корням растений на основе миграционной концепции // Агрохимия. 1996. № 6. С. 36–46.
4. Артемьева З.С., Фрид А.С., Тюрникова Е.Г. Миграционная доступность калия растениям на легкой дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2003. № 2. С. 22–30.
5. Артемьева З.С., Фрид А.С., Тюрникова Е.Г. Миграционная доступность калия растениям на легких дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2003. № 6. С. 24–32.
6. Колосов И.И. Поглотительная деятельность корневых систем растений. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 280 с.
7. Фрид А.С. Динамические характеристики роста корневой системы растений и методы их определения // Онтогенез. 1975. Т. 6. № 4. С. 381–388.
8. Фрид А.С. Математическая модель как метод изучения корневого поглощения веществ растениями // Агрохимия. 1974. № 3. С. 122–131.
9. Классификация и диагностика почв России / Составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. Хлыстовский А.Д. Плодородие почвы при длительном применении удобрений и извести. М.: Наука, 1992. 192 с.

11. Перечень стационарных полевых опытов научно-исследовательских учреждений Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Госагропром РСФСР, Отдел. ВАСХНИЛ по Нечерноземной зоне РСФСР, 1989. С. 107–109.
12. Прохорова З.А., Фрид А.С. Изучение и моделирование плодородия почв на базе длительного полевого опыта. М.: Наука, 1993. 189 с.
13. Дисперсионный анализ произвольного опыта с произвольным числом факторов // Алгоритмы и программы для ЭВМ СМ-4. М.: Почвенный ин-т им. В.В.Докучаева, 1985. С. 29–34.
14. Прохоров В.М., Фрид А.С. Количественные закономерности диффузии ионов в почве как пористой адсорбирующей среде // Вопросы энерго- и массо-обмена в системе почва–растение–атмосфера: Тр. по агроном. физике. Л., 1971. Вып. 32. С. 80–89.
15. Розен Г.А. Использование радиоактивного хлора при определении геометрических характеристик диффузии ионов в почвах // Физико-химические аспекты плодородия почв Нечерноземной зоны: Бюл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1984. Вып. XXXI. С. 36–40.
16. Прохоров В.М., Фрид А.С. Вклад адсорбированных ионов в диффузию  $^{90}\text{Sr}$  в почвах // Радиохимия. 1972. Т. 14. № 4. С. 519–526.
17. Баранова З.А., Фрид А.С. Поступление стронция-90, калия и кальция в растения овса из почвы в онтогенезе // Физиология растений. 1975. Т. 22. Вып. 6. С. 1173–1176.

## The Migration Availability of Potassium to Plants on Loamy Soils

Z. S. Artemyeva<sup>a</sup>, A. S. Frid<sup>a, #</sup>, and V. I. Titova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevskii 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia

<sup>b</sup> Nizhegorodskaya State Agricultural Academy, prosp. Gagarina 97, Nizhny Novgorod 603107, Russia

<sup>#</sup> E-mail: asfrid@mail.ru

The results of the comparable study of traditional forms of labile, exchangeable and non-exchangeable potassium, migration-available potassium (desorption experiments) and potassium uptake by winter rye seedlings in the samples of loamy soils (Phaeozem and two Luvisols), collected from stationary long-term field experiments, are presented. The flow of potassium in the plant roots ranged between 12 to 45% of the soil desorption capacity. The coefficients of potassium diffusion in soils (range between  $0.15 \times 10^{-8}$  to  $11 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s), as well as their dependence on soil properties were estimated by the desorption kinetics. The parameters of the root system growth model and the model of root potassium uptake by plants were estimated based on the results of vegetation experiments.

*Key words:* potassium, soil desorption, diffusion coefficients of potassium, the migration availability, model parameters inflow in plant, winter rye, loamy soil.