

УДК 631.416.4

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КАЛИЯ В ПОЧВЕ

В.И. САВИЧ, И.Г. ПЛАТОНОВ, Ю.А. ДУХАНИН*, Н.Л. ПОВЕТКИНА, А.Ф. САФОНОВ

(Кафедра почвоведения, кафедра земледелия)

В работе обосновывается целесообразность комплексной оценки состояния калия в почве по факторам емкости, интенсивности, кинетики, буферным свойствам почв в отношении калия, способности почв к поддержанию концентрации подвижного калия при его отчуждении с урожаем. Показана перспективность оценки калийного состояния почв с учетом структурных взаимосвязей между формами калия, подвижным калием и физико-химическими свойствами почв.

Состояние соединений калия в почвах в значительной степени определяет их плодородие и урожай с.-х. культур. Однако как с повышением уровня интенсификации производства, так и при резком обеднении почв калием требования к детализации оценки его состояния в почвах возрастают. Существующие методы определения содержания подвижных форм калия в почвах не позволяют полностью описать процессы трансформации соединений калия в системе почва - растение. При этом на практике возникают проблемы с оптимизацией доз внесения калийных удобрений для получения почв с заданными свойствами и достижения высокой эффективности химизации. В ряде случаев, несмотря на отрицательный баланс калия, содержание подвижных форм калия в почве не уменьшается. В то же время внесение калийных удобрений в отдельных случаях не увеличивает определяемое в почве содержание подвижных форм калия. Эффективность

применения калийных удобрений в ряде случаев значительно ниже запланированных уровней. Предлагаемая комплексная оценка состояния соединений калия в почвах позволяет дать объяснения вышеперечисленным проблемам.

Объектом исследования выбраны дерново-подзолистые почвы учхоза «Михайловское» Московской обл. и серые лесные среднесуглинистые почвы учхоза «Дружба» Ярославской обл. [21, 23]. При интерпретации данных использованы результаты многолетних опытов, заложенных акад. РАСХН И.С. Шатиловым и проф. В.А. Деминим. Для сравнения дополнительным объектом исследования являлись почвы, резко отличающиеся от указанных по генезису и минералогическому составу (чернозем учхоза «Муммовское» Саратовской обл., мерзлотно-таежная почва Магаданской обл. краснозем, серозем [12, 13, 14, 15, 16, 23]).

Методика исследования состояла в проведении лабораторных ис-

* Министерство сельского хозяйства РФ.

следований по оценке состояния калия в почве с использованием широкого набора десорбентов, в постановке модельных опытов по оценке трансформации и миграции в почве вносимых в нее калийных удобрений, в статистической обработке данных агрохимической службы для установления математической зависимости содержания подвижных форм калия в почвах с другими свойствами почв [1]. Принятый уровень вероятности $P=0,95$.

Экспериментальная часть

С нашей точки зрения, необходима комплексная оценка состояния калия в почве. В качестве параметров, определяющих его состояние, необходимо учитывать: 1) содержание подвижных форм калия (фракционный состав соединений калия — фактор емкости; 2) закономерности изменения содержания подвижного калия в почве от pH, концентрации десорбента, влажности, температуры — фактор мобильности; 3) буферные свойства почв по отношению к калию; 4) оценку способности почв к поддержанию концентрации калия в почвенном растворе и в подвижной форме при его отчуждении с урожаем; 5) баланс калия как в пахотном, так и в корнеобитаемом слое; 6) структурные взаимосвязи состояния калия в почвах со свойствами почв, их процессами и режимами. Оценка состояния калия по указанным параметрам позволяет охарактеризовать калийное состояние почв с разных сторон, оценка по одному из показателей дополняет оценку по другому показателю.

1. Содержание в почвах подвижных форм калия

Для характеристики калийного состояния почв определяют количество калия в почве в различной

форме связи (валовое содержание калия, подвижный калий, обменный калий, кислоторастворимый, водорастворимый калий, содержание положительно и отрицательно заряженных соединений, активность калия [1, 2, 3, 5]).

Содержание различных форм калия в серой лесной почве учхоза «Дружба» составляло для слоя 0–20 и 0–40 см соответственно: водорастворимого — $1,7 \pm 0,1$ и $1,5 \pm 0,2$; обменного — $6,6 \pm 0,3$ и $11,4 \pm 0,3$; подвижного (0,1н. $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) — $13,3 \pm 0,7$ и $12,9 \pm 0,5$; необменного гидролизуемого — $161,2 \pm 4,9$ и $109,2 \pm 2,8$; кислоторастворимого (2н. HCl) — $171,2 \pm 2,1$ и $123,3 \pm 3,7$ мг/100 г почвы.

Калий присутствует в почве не только в виде положительно заряженных соединений K^+ , но также в виде положительно (+) и отрицательно (-) заряженных органических соединений [17, 20, 21]. Так, по нашим данным, в дерново-подзолистой пахотной почве учхоза «Михайловское» в пахотном слое содержалось 0,5 мг/100 г положительно заряженных соединений калия и 0,4 мг/100 г отрицательно заряженных (при десорбции в условиях напряжения 25 в 5 мин). При напряжении 75 В и времени десорбции 20 мин содержание положительно и отрицательно заряженных соединений было соответственно равно 4,8 и 1,2 мг/100 г. Для горизонта A_2B при 25 и 75 В эти величины равнялись 0,2 и 0,4; 2,1 и 0,7; для горизонта B_r — 0,5 и 0,3; 1,5 и 0,4. Таким образом, содержание в почвах положительно заряженных соединений калия значительно больше, чем отрицательно заряженных форм, однако последние все же присутствуют в почве. Для разных типов почв характерна и определенная активность калия, которая достаточно хорошо коррелирует с содержанием водорастворимых форм [14, 16].

Однако согласно проведенным ранее исследованиям [16] в почвах с преобладанием базидов концентрация катионов в суспензии ниже, чем в фильтрате, а в почвах с преобладанием ацидоидов концентрация катионов в суспензии выше, чем в фильтрате. Например, в центрифугате, полученном при 3000 и 9000 об/мин, концентрация калия в дерново-подзолистой, серой лесной почве, черноземе и каштановой почве составляло соответственно 9,9 и 7,2; 3,2 и 1,9; 5,1 и 4,0; 9,9 и 5,7 мг/100 г.

Состояние калия в почве оценивается и по соотношению водорастворимых и легкоподвижных катионов К и Са, К и Н, по доле калия среди поглощенных почвой катионов [1, 4, 10, 21, 25]. Однако приводимые в литературе градации должны быть уточнены для разных типов почв и в зависимости от их свойств.

2. Использование для оценки состояния калия в почвах фактора мобильности

Все почвы характеризуются не только абсолютными величинами валового, подвижного и усвояемого калия, но и степенью подвижности калия в зависимости от различных факторов (рН, концентрации десорбента, температуры, времени взаимодействия и т. д.). Степень подвижности калия в почве можно установить с помощью фактора мобильности, характеризующего степень зависимости содержания подвижного калия в растворе десорбента от концентрации десорбента и величины других, ранее указанных независимых переменных. Этот показатель может выражаться через коэффициент $1/p$ в уравнении Фрейдлиха: $X = KC^{1/p}$, описывающем десорбцию калия из почв, а также че-

рез AQ/AC и $(AQ/AC \cdot Q_{max})100$ [12]. При этом каждая почва отличается своей величиной фактора мобильности. Фактор мобильности как показатель, характеризующий увеличение функции Q при изменении аргумента (температуры, концентрации десорбента и т. д.), различен для каждого воздействующего фактора по абсолютной величине, но во всех случаях близок по характеру зависимости [12]. Очевидно, что данный параметр может оцениваться как для сорбции, так и для десорбции калия, для факторов емкости, интенсивности, кинетики, буферных свойств почв [11].

В табл. 1 приведена величина фактора мобильности при вытеснении калия из разных типов почв среднесуглинистого гранулометрического состава в зависимости от концентрации десорбента (С) и температуры взаимодействия.

Таблица 1
Величина фактора мобильности (1/p) при вытеснении калия раствором НС1

Тип почвы	1/p при изменении С	1/p при изменении t°
Дерново-подзолистая	0,10	0,08
Серая лесная	0,17	0,09
Чернозем	0,23	0,14
Каштановая	0,62	0,12
Краснозем	0,11	0,07
Серозем	0,13	0,06

(Для десорбции калия применяли 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 и 0,40 н. концентрации НС1 и 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 н. концентрации CH_3COONH_4 при температуре 0°, 10°, 40°). Как видно из представленных данных, большая величина фактора мобильности характерна для каштановой почвы и чернозема.

Величина фактора мобильности, выраженная через коэффициент $1/p$, отличается от величины, выраженной через коэффициент AQ/AC .

Однако и в том и в другом случае наибольшим фактором мобильности обладала каштановая почва, а наименьшим — дерново-подзолистая. При вытеснении калия раствором уксуснокислого аммония наибольший фактор мобильности также был у каштановой почвы, а наименьший — у серой лесной и дерново-подзолистой.

Таким образом, по величине фактора мобильности при изменении температуры и концентрации десорбента у исследуемых образцов отмечается аналогичная зависимость. Величина фактора мобильности равна коэффициенту $1/p$ в уравнении Фрейдлиха, описывающем процесс сорбции или десорбции калия. При оценке описания десорбции калия ($0,05 \sim 0,4n$. HC1) из почв уравнением Фрейдлиха для горизонта Ап дерновой почвы получены следующие эмпирические и теоретические значения: 0,29 и 0,29; 0,98 и 0,46; 0,57 и 0,54; 0,66 и 0,59; 0,72 и 0,71, а для горизонта В —

0,48 и 0,50; 0,55 и 0,55; 0,57 и 0,59; 0,62 и 0,72; 0,67 и 0,71.

Очевидно, что десорбция калия из почв переменными концентрациями десорбента протекает на разных типах сорбционных мест, с разной прочностью связи калия с твердой фазой почвы. Поэтому для отдельных стадий десорбции характерны и свои коэффициенты в уравнениях, описывающих десорбцию (табл. 2).

Фактор мобильности несет дополнительную информационную нагрузку и при оценке количества вытесненного из почв калия, внесенного с удобрениями (табл. 3).

Фактор мобильности характеризует неоднородность сорбционных мест и позволяет рассчитать изменение количества десорбируемого из почв калия при увеличении концентрации десорбента. При одинаковом количестве калия, вытесненного слабой концентрацией десорбента, большая величина $1/p$ свидетельствует о лучшей обеспечен-

Таблица 2
Значения эмпирических констант в уравнении $LgX = IgK + 1/nlgC$, описывающем десорбцию калия из почв 0,05-0,4n. HC1 (Ап)

Тип почвы	1/n для периодов десорбции			1/n для всего периода десорбции	K
	0,05-0,15	0,10-0,20	0,15-0,40		
Дерновая	0,33	0,36	0,23	0,30	-0,91
Мерзлотно-таежная	0,09	0,20	0,31	0,18	-0,82

Таблица 3
Количество вытесненного сорбированного калия из дерново-подзолистой почвы, мг/100 г (n=29)

Исходная концентрация раствора KCl, мг на 5 г при сорбции	Вытеснение K мг/100 г при десорбции раствором HC1				$\Delta Q/\Delta C^*$
	0,05 н.	0,10 н.	0,15 н.	0,20 н.	
200	293,0±1,0	565,5±16,7	749,5±5,5	978,5±10,6	4,6
20	136,3±1,4	208,0±3,8	231,7±6,7	239,6±8,7	0,7
1,0	24,5±1,2	43,1±0,9	49,3±0,9	50,9±1,5	0,2
0,1	9,8±0,4	19,7±1,8	24,6±4,3	37,9±2,2	0,2

* ΔC мгэкв/л.

ности почв калием [11]. Перспективна оценка данного показателя и при определении способности почв к поддержанию концентрации ионов в почвенном растворе при их отчуждении с урожаем [21].

3. Буферные свойства почв по отношению к калию

Изучение буферных свойств почв по отношению к калию имеет большое практическое значение. В литературе широко принято определение калийной буферной способности (РВСК по Бекетт). Значения РВСК отражают зависимость фактора емкости (Q) от фактора интенсивности (I): $РВСК = Q/I$; $РВСК = \Delta K_0/AR_0$, где $AR_0 = aK^+/\sqrt{aCa^{2+}}$.

Ряд авторов [2, 3, 4, 5, 8] утверждает, что потенциальная буферная способность почвы постоянна для данной почвы, но зависит от времени взаимодействия, температуры, соотношения почва-раствор. Она мало изменяется при внесении калийных удобрений и выращивании с.-х. культур. В то же время очевидно, что при неоднотипности связей калия в ППК при отчуждении части калия с урожаем, прочность его связи с твердой фазой почвы возрастает, значение AR_0 уменьшается, и показатель РВСК увеличивается.

При внесении калийных удобрений отмечается обратная картина. Указанные зависимости могут нарушаться, если при отчуждении и сорбции калия происходит трансформация отдельных компонентов ППК. Значение РВСК теоретически не может быть однотипным для широкого интервала исходных концентраций сорбата K^+ . Оно равно $tg \alpha$ — угла наклона экспериментальной прямой, описывающей сорбцию, десорбцию калия из почвы раствором $CaCl_2 + KCl$ в координа-

тах АК мгэкв/100 г, AR_0 — в молях на 1 л. Эта величина может быть определена как фактор мобильности и, очевидно, неоднозначна во всем интервале изменения вышеуказанных величин.

Считается, что линейная часть Q/I выражает зависимость обмена между Са и К, находящихся на верхних поверхностях ППК. Эта часть изотермы соответствует сорбции калия из раствора $KCl + CaCl_2$. Искривленная часть изотермы Q/I , отвечающая за десорбцию К из ППК в раствор $KCl + CaCl_2$, характеризует участки со специфическим «сродством» ППК и K^+ и участки в межслоевом пространстве минералов. Однако более вероятно существование в почве не двух, а большего типа сорбционных мест по отношению к калию [7, 22, 24], что подтверждается данными табл. 2.

По полученным нами данным, величины РВСК для чернозема были равны 61,5; 134,0; 102,1; 132,8 и 138,1, а для дерново-подзолистой почвы — 41,9; 51,6; 51,4; 49,2 и 41,5. В то же время для красной ферралитной почвы они составляли всего 15,5 и 14,6; 23,2; 20,0; 26,5. По нашим данным, потенциальная буферная способность исследуемых серых лесных почв к калию составляла от 125 до 200, увеличиваясь в нижних горизонтах.

По указанной методике фактор емкости в мг/100 г почвы характеризует концентрацию калия в растворе $KCl + CaCl_2$ в мгэкв/100 г почвы, при которой не происходит ни накопления, ни выделения калия почвой. Это равновесная концентрация калия, которая будет наблюдаться в естественном почвенном растворе при ионной силе, близкой к раствору $KCl + CaCl_2$. Этот показатель оценивает калийное состоя-

Т а б л и ц а 4

Буферная емкость серых лесных почв по отношению к калию

Доза K_2O , кг д.в. на 1 га	Требуется внести K_2O кг/га для изменения содержания калия на 1 мг/100 г	
	водорастворимые формы	подвижный калий
200	125	37,0
800	242,4	61,5

ние с одной стороны. Фактор интенсивности (I), по данной методике AR_0 , характеризует отношение активности ионов калия к корню квадратному из активностей ионов калия и магния. Изменение Q/I характеризует состояние калия с другой стороны.

С нашей точки зрения, перспективно вычисление буферных свойств почв по отношению к калию, как количество калия, которое надо добавить к почве для того, чтобы изменить содержание его подвижных форм на 1 мг/100 г (в полевых условиях 1 кг д.в. K_2O на 1 га сверх выноса с урожаем). В то же время буферные свойства почв по отношению к калию могут быть оценены, как количество калия, которое надо добавить к почве для того, чтобы изменить прочность связи калия с ППК, скорость выхода калия из твердой фазы почвы в раствор на единицу.

По полученным данным, для дерново-подзолистых среднесуглинистых почв Московской обл. количество калия, которое надо внести в почву сверх выноса с урожаем для изменения содержания подвижных форм калия на 1 мг/100 г (вытяжка 0,1н. CH_3COONH_4), составляет 60-90 кг/га, увеличиваясь для почв более тяжелого гранулометрического состава, более гумусированных. Эта величина значительно выше для водорастворимых форм калия в условиях полевых опытов по сравнению с модельными экспериментами. Это подтверждают и данные, полученные для серых лесных почв учхоза «Дружба» (табл. 4).

Значения отдельных показателей калийного состояния почв не всегда коррелируют друг с другом, так как оценивают калийный режим с разных сторон. Так, в серой лесной почве показатели калийного состо-

яния для горизонтов A_1 и A_2B составляли соответственно: AK_0 мг на 100 г — $0,07 \pm 0,01$ и $0,04 \pm 0,01$; AR_0 — $0,05 \pm 0,01$ и $0,02 \pm 0,01$; PBC^K — $146,0 \pm 12,5$ и $183,5 \pm 16,7$; содержание водорастворимого калия — $1,7 \pm 0,2$ и $1,5 \pm 0,2$; подвижного калия — $13,3 \pm 0,7$ и $12,9 \pm 0,5$; содержание кислоторастворимого калия — $171,2 \pm 2,0$ и $122,2 \pm 3,2$ мг/100 г. В серой лесной глееватой почве в горизонтах A_1 и A^h (погребенном) рассматриваемые показатели были соответственно равны: AK_0 мг/100 г — $0,15 \pm 0,01$ и $0,04 \pm 0,01$; AB_0^K — $0,10 \pm 0,01$ и $0,01 \pm 0,01$; PBC^K — $145,0 \pm 0,1$ и $183,5 \pm 16,7$.

4. *Оценка способности почв к поддержанию концентрации калия в почвенном растворе и в подвижной форме при его отщуждении с урожаем*

Содержание калия в любой из вытяжек определяется эффективными константами ионного обмена. Эта величина зависит от количества подвижных фракций исследуемого иона в почве, но не всегда пропорциональна ему (чем больше почва насыщена определенным ионом, тем менее селективные сорбционные места он занимает и большее количество иона переходит в раствор десорбента). Например, при содержании подвижного калия 10 мг/100 г почвы в песке и глине (вытяжка 0,1н. CH_3COONH_4) в почве

легкого гранулометрического состава общее содержание подвижного калия в твердой фазе почв будет меньше, чем в глинистой почве. Для получения одинакового урожая подвижного калия в песчаной почве хватает на меньшее количество лет, чем на глинистой почве.

Показатель, характеризующий данное свойство почвы [10, 12, 19], предлагается называть возобновляющей способностью почв или способностью почв к восстановлению концентрации ионов в почвенном растворе при их отчуждении с урожаем [19]. Чем больше эта величина, тем более плодородна почва. Так, при соотношении почва - раствор 1:5, 1:20 и 1:100 из дерново-подзолистой почвы вытеснено соответственно 0,32; 0,71 и 1,01 мгэкв К на 100 г почвы, из серой лесной почвы — 0,46; 1,08 и 2,51; из чернозема — 0,29; 0,61 и 1,03; из краснозема — 0,58; 0,61 и 4,17; из серозема — 0,28; 0,92 и 3,02 мгэкв на 100 г почвы.

В проведенных на серых лесных почвах исследованиях оценивали содержание калия в 10 последовательных вытяжках H_2O , 0,1н. CH_3COONH_4 , 0,05н. щавелевой кислоты, 0,2н. HCl . Исследования проведены на серой лесной среднетощей целинной почве (Р-1), серой лесной среднетощей пахотной почве (Р-2), серой лесной среднетощей поверхностно глееватой почве (Р-3), серой лесной смытой мощной среднесуглинистой почве (Р-4). Все почвы среднесуглинистые.

Способность почв к поддержанию концентрации ионов в почвенном растворе при их отчуждении с урожаем (характеризуемая количеством калия, вытесненного 10 последовательными вытяжками) дает дополнительную характеристику

калийного состояния почв. Эта величина не всегда коррелирует с содержанием K_2O в первой вытяжке. По полученным материалам, сумма подвижных фракций калия, вытесненных из почв 10 последовательными вытяжками H_2O , $H_2C_2O_4$, CH_3COONH_4 , в основном выше для подпахотных горизонтов, чем для пахотного слоя (в 8 случаях из 12). Она ниже для горизонтов A_2 и A_1A_2 целинной почвы. В табл. 5 приведены данные оценки калийного состояния для серой лесной (Р-1) и серой лесной смытой почвы, из которых видно, в верхнем горизонте по сравнению с A_2B меньше содержания подвижного калия, но больше сумма фракций, вытесняемых 10 последовательными вытяжками и больше величина $AQ/n = tg a$. Для вытяжек Одн. CH_3COONH_4 и 0,2н. HCl величина $tg a$ характеризует уменьшение количества вытесненного калия из твердой фазы почв при проведении последовательной десорбции калия 10 вытяжками.

Для вытяжек H_2O и 0,05н. $H_2C_2O_4$ величина $tg a$ характеризует разнокачественность сорбционных мест, так как максимальное количество вытесненного калия отмечается не в 1-й, а в 4-9-й (для H_2O) и 5-й (для $H_2C_2O_4$) последовательных

Таблица 5
Способность серых лесных почв к поддержанию концентрации калия в растворе десорбента при десорбции (мг/100 г, вытяжка 0,1 н. CH_3COONH_4)

Разрез, горизонт	Содержание		$\Delta Q/n$
	первая вытяжка	сумма	
Р-1 A_1	3,8	18,2	0,31
A_1A_2	3,9	15,6	0,35
A_2B	7,9	29,2	0,71
Р-4 $Aп$	6,5	26,9	0,58
A_2B	7,5	28,3	0,68

* ΔQ — разница в концентрациях калия в 1-й и 10-й вытяжках, n — число вытяжек.

вытяжках. Это связано с освобождением при последовательной десорбции новых сорбционных центров с большей подвижностью калия и, возможно, с изменением рН среды при последовательной десорбции. Данная величина может быть использована для прогноза возможной продолжительности использования системы удобрений с дефицитом баланса калия (табл. 6).

Таблица 6

Содержание подвижных форм калия в серой лесной почве севооборота при его дефицитном балансе

Вариант	Уровень удобренности	- DK ₂ O мг/100 г на 10% дефицит
Дефицит 49% (1)	1 — низкий	1,98
Дефицит 40% (2)	2 — средний	2,07
Дефицит 38% (3)	3 — высокий	1,68

Как видно из представленных в табл. 6 данных, в варианте 3 с большей дозой азотных и фосфорных удобрений в связи с более интенсивным развитием дернового процесса уменьшение содержания подвижного калия на 10% дефицита баланса менее значительно.

Концентрация калия от 1-й к 10-й последовательным вытяжкам закономерно изменяется, что является показателем, характерным для определенных почв. По полученным данным, AQ/p (где AQ — разница концентраций калия в 1-й и 10-й последовательных вытяжках, p — число вытяжек), больше для нижних горизонтов (A_2B) и меньше для слоя A_i и $A^{\wedge}g$ целинной почвы. Этот показатель выше при вытеснении калия из почв 0,05н. $H_2C_2O_4$, меньше при вытеснении калия из почв 0,2н. HC_1 и еще ниже при вытеснении калия из почв 0,1н. CH_3COONH_4 .

Таким образом, способность почв к поддержанию концентрации под-

вижных форм калия при его отчуждении с урожаем является характеристическим показателем как для типов почв, так и для отдельных горизонтов. Этот показатель зависит от степени удобренности. С нашей точки зрения, перспективно оценивать его изменение для разных интервалов насыщенности почв калием.

5. Баланс калия в почве

Баланс калия в почве является важной характеристикой калийного состояния почв. При этом возможен расчет баланса для валовых и подвижных форм калия, для пахотного слоя или корнеобитаемого слоя, всего почвенного профиля. Как правило, на практике рассчитывают баланс подвижных форм калия для пахотного слоя [6, 7, 10].

С нашей точки зрения, баланс калия в почве определяется не только его выносом с урожаем и внесением с удобрениями, но и рядом других положительных и отрицательных составляющих баланса. При этом из отрицательных статей баланса наибольшее значение имеет его вынос с урожаем, вымывание калия за пределы почвенного профиля и необменная фиксация части калия, вносимого с удобрениями. Из положительных статей баланса наибольшее значение имеют поступление (перераспределение) калия в пахотный слой за счет развития дернового процесса почвообразования [6] и переход калия из необменного в обменное состояние за счет корневых выделений и продуктов разложения корневых и пожнивных остатков выращиваемых растений, внесение калия с удобрениями.

В опыте кафедры растениеводства МСХА на дерново-подзолистых почвах в вариантах без внесе-

ния удобрений содержание подвижных форм калия в среднеокультуренной почве уменьшилось за 38 лет с.-х. использования до 4-9 мг/100 г, а в хорошо окультуренной — до 8-10 мг/100 г. При этом уменьшение содержания подвижного калия в почве в значительной степени связано с его выносом с.-х. растениями. На более окультуренных почвах выше урожай и вынос калия культурами. Так, на слабоокультуренной почве без внесения удобрений отчуждение с поля K_2O составляло 6,7 кг/га (в среднем за 1966-2002 гг.), а поступление в почву с пожнивными остатками — 15,5 кг/га; на хорошо окультуренной почве с высокой дозой удобрений — соответственно 20,1 и 50,2 кг/га.

В то же время уменьшение содержания подвижного калия в почве за 38 лет было менее значительным по сравнению с его выносом с урожаем и миграцией в грунтовые воды с учетом внесения калия с удобрениями. При этом разные культуры в неодинаковой степени возвращали калий в почву с, пожнивными остатками. Так, на слабоокультуренной почве с урожаем викоовсяной смеси отчуждалось с поля 25,3, а возвращалось в почву 15,8 кг/га калия, в то время, как с травами 2-го года — соответственно 32,1 и 62,6 кг/га. Это подтверждают данные о накоплении подвижных форм калия в почве за счет развития дернового почвообразовательного процесса. Данный процесс

связан как с переходом калия из обменного в обменное состояние под влиянием биохимического выветривания, так и с перераспределением калия из нижних слоев в верхние в связи с аккумуляцией его в корнях, площадь которых больше в нижних горизонтах, а масса — больше в верхнем слое. Аналогичные данные получены и другими авторами [6].

На серых лесных почвах учхоза «Дружба» проф. В.А. Деминым в 8-польном севообороте был заложен опыт по изучению влияния состояния калия в почве при его внесении с удобрениями на уровень урожайности. В качестве вариантов приняты: 1 — контроль, 2 — 15N, 25P, 21K — 1-й уровень урожайности; 22N, 39P, 8K + 10 т навоза — 2-й уровень урожайности и 53N, 64P, 14K + 10 т навоза — 3-й уровень урожайности. При этом внесение калия составило в севообороте во 2-м варианте 18% к его выносу, в 3-м — 40 и 38%, т. е. спланирован дефицитный баланс по калию. Данные о изменении содержания подвижных форм калия в исследуемых почвах за 18 лет (табл. 7) подтверждают, что дефицитный баланс по калию привел к уменьшению содержания подвижных форм калия. Однако при равном дефиците калия и внесении больших доз азота (3-й уровень урожайности) наблюдается менее значительное уменьшение содержания калия в почве.

При лучшей обеспеченности почв подвижными формами азота и фос-

Таблица 7

Содержание калия в серой лесной почве (0-20 см) при внесении различных доз удобрений, мг/100 г (2004 г.)

Доза удобрений	В вытяжке 0,2н. HCl	Δ по сравнению с 1986 г.	В вытяжках	
			H ₂ O	2н. HCl
При 1-м уровне урожайности	11,8	-9,7	1,5	166
При 2-м уровне урожайности	13,2	-8,3	1,4	170
При 3-м уровне урожайности	15,1	-6,4	2,1	174

фора (равной обеспеченности калием) развитие дернового процесса почвообразования нарастает. Это соответствует увеличению положительной статьи в балансе калия и снижению обеднения почв калием. В контрольном варианте содержание водорастворимых, вытесняемых 0,2 н. HCl и 2 н. HCl форм калия, составляли соответственно 1,8; 13,2 и 175 мг/100 г.

В вариантах 1 и 2 по сравнению с вариантом 3 при равном дефиците калия в почве отмечается меньшее содержание его водорастворимых, подвижных и прочносвязанных форм.

Следует отметить, что в контроле урожай был значительно ниже,

чем в вариантах 1, 2, 3, поэтому и вынос калия с урожаем ниже. Это соответствует и более высокому содержанию калия в почве контроля.

Растения потребляют калий не только из верхнего пахотного слоя, но и из подпахотных слоев. Чем лучше развита корневая система растений, чем плодороднее нижние слои, тем глубже проникают корни и больше используют калий из слоя 20-40 см [6]. Ярче это наблюдается при большей степени удобренности почв. В данном случае разница содержания K_2O в A_1 и в A_2 (в слоях 0-20 и 20-40 см) должна быть выше. Это подтверждают и полученные нами данные (табл. 8).

Таблица 8

Разница в содержании калия в слоях 0-20 см и 20-40 см, мг/100 г

Доза удобрений	K_2O		
	водорастворимый	подвижный	кислоторастворимый
Контроль	-0,4	-0,9	+44
При 1-м уровне урожайности	+0,1	+0,6	+50
При 2-м уровне урожайности	+0,4	+1,5	+51
При 3-м уровне урожайности	+0,7	+1,7	+51

б. Структурные взаимосвязи состояния калия в почвах со свойствами почв, их процессами и режимами

Важным фактором характеристики калийного состояния почв являются структурные взаимосвязи состояния калия в твердой фазе с другими свойствами почв. Перспективно выяснение математических зависимостей состояния калия в почве от внешних факторов (влажности, температуры) и совокупности свойств почв, зависимостей между различными параметрами, характеризующими калийное состояние, закономерностей изменения взаимосвязей во времени и в пространстве. При этом структур-

ные взаимосвязи оцениваются по вектору, форме связей, тесноте, продолжительности связей, скорости и степени адекватности ответной реакции, закономерному изменению связей во времени и в пространстве. С практической точки зрения, в первую очередь перспективно выяснение также влияния содержания калия на другие свойства почв, и других свойств почв на калийное состояние, взаимосвязей между формами калия в почве.

Зависимость урожайности с.-х. культур от свойств, процессов и режимов калия в почве описана в первом приближении параболической зависимостью, а в более узких интервалах независимых переменных — экспоненциальной зависимо-

стью [7, 21]. На очень небольших отрезках изменения независимых переменных зависимость может быть условно принята линейной [12, 15]. Аналогичные зависимости характерны и при оценке состояния калия в почве от других свойств, процессов и режимов почв.

Для конкретных условий и сочетания свойств почв оптимально и определенное калийное состояние. Как уменьшение ниже допустимых пределов, так и увеличение выше допустимых пределов содержания подвижных форм калия в почвах приводят к появлению в почве ряда неблагоприятных в агрономическом отношении свойств. Увеличение выше допустимого предела содержания подвижных форм калия в почвах в ряде случаев приводит к их диспергированию, ухудшению структуры, уменьшению водопроницаемости, увеличению подвижности и потере гумуса, к неблагоприятному изменению соотношения подвижных форм $K:Ca$ и т. д. [9, 23].

По полученным нами данным ($n = 8 - 95$), при увеличении содержания подвижного калия в дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах от $24,5 \pm 1,4$ мг/100 г до $39,3 \pm 2,3$ мг/100 г (от $2,9 \pm 0,2\%$ до $4,7 \pm 0,2\%$ от емкости поглощения почв) количество нефилтрирующихся образцов увеличивалось с 27,7 до 52,6%.

Закономерные связи существуют и между содержанием калия в отдельных горизонтах почв, что определяется сочетанием протекающих почвообразовательных процессов. Закономерные связи отмечаются и между содержанием калия в отдельных слоях структурных отдельностей. Так, по полученным нами данным, содержание водорастворимых соединений калия во

внешней части структурных отдельностей слабоокультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы составляло 2,2, а во внутренней — 1,4 мг/кг. В то же время для хорошо окультуренной почвы во внешней части структурных отдельностей содержание калия составляло 2,4, а во внутренней — 1,8 мг/100 г. При этом отношение $Ca:K$ равнялось для слабоокультуренной почвы — внешней и внутренней части отдельностей 2,4 и 5,0, а для хорошо окультуренной — 6,3 и 4,3.

Содержание различных форм калия в почвах связано структурными взаимосвязями. При этом зависимости отличаются как для отдельных почв, так и для разных слоев почвенного профиля. Например, для слоя 0-40 см серой лесной почвы учхоза «Дружба» содержание водорастворимого калия (X_0) связано корреляционной зависимостью с количеством подвижного калия (X_2) и не зависит от содержания кислоторастворимого калия (X_3): $X_1 = -2,26 + 0,27X_2 + 0,002X_3$. При оценке этой зависимости для условий модельного опыта при промывании почв водой из расчета 400 мм осадков установлена следующая зависимость: $X_1 = -7,78 + 0,19X_2 + 0,03X_3$, а после предварительного внесения поверхностно калия из расчета 300 кг K_2O на 1 га для слоя 0-6 см — $X_1 = -9,79 + 0,57X_2 - 0,006X_3$. То есть зависимость содержания в почве водорастворимого калия от содержания подвижного калия более значима.

В то же время, с нашей точки зрения, в уравнения регрессии необходимо ввести такие независимые переменные, как емкость поглощения почв, содержание илстой фракции, доля слюд и гидрослюд,

полевых шпатов и других минералов в минералогическом составе почв и т. д. [21, 22].

Изменение условий внешней среды, безусловно, приводит и к изменению содержания подвижных и водорастворимых форм калия в почвах. Математические зависимости таких связей также будут характеристическими для определенных почв. Высушивание почв способствует повышению в них концентрации электролитов, ионной силы и, как следствие, коагуляции коллоидов. Это сопровождается фиксацией ионов или переходом их из легкоподвижного в менее подвижное состояние. Очевидно, что данный процесс ярче выражен для почв более тяжелого гранулометрического состава, с большей долей минералов типа 2:1, 2:2, при большей доле интрамицеллярного поглощения.

Проведенными исследованиями установлены особенности фиксации калия почвами при их попеременном увлажнении и высушивании. Установлено, что высушивание почв приводит к фиксации калия в почвах, уменьшающейся в относительных величинах в почвах, более насыщенных калием. Так, в контрольном варианте серой лесной почвы учхоза «Дружба» зависимость содержания водорастворимого калия от кратности высушивания образцов определяется $Y = 4,6111 - 0,4778X$, а для варианта с внесением в почву калийных удобрений $Y = 3,8704 - 0,5741X$. Для менее подвижных форм калия данная зависимость должна быть выражена в меньшей степени. Однако в том случае, когда калийные удобрения будут вноситься после высушивания, их подвижность более вероятно будет возрастать. Очевидно, что эффект должен зависеть от градиента изменения при высушива-

нии влажности и температуры, скорости изменения этих параметров, продолжительности периодов увлажнения и высушивания.

Характеристические структурные взаимосвязи отмечаются и между содержанием биофильных элементов, определяющих их оптимум [23, 25]. Очевидно, что при недостатке в почве фосфора и азота высокое содержание подвижного калия не может быть поглощено растениями и реализовано в урожае. В данном случае предел оптимального содержания подвижных форм калия в почве определяется другими лимитирующими факторами (рН, содержанием кальция, магния, влаго- и теплообеспеченностью, приходом фотосинтетически активной радиации и т. д.). В то же время высокий предел содержания подвижных форм калия в почве определяется и возможностью появления при этом неблагоприятных свойств почв (дисперсности, низкой водопроницаемости и т. д.). Рассматриваемые структурные взаимосвязи являются важным показателем плодородия почв и должны учитываться при комплексной оценке состояния калия в почвах.

Таким образом, с нашей точки зрения, определение в почве только содержания подвижного калия в одной вытяжке является недостаточным критерием оценки плодородия почв по их калийному состоянию. Необходимо комплексная оценка состояния калия в почве по факторам емкости, интенсивности, кинетики, мобильности, буферности, возобновляющей способности и структурным взаимосвязям состояния калия с другими свойствами почв [19, 20, 21, 23]. Для интегральной оценки обеспеченности почв калием для выращивания отдельных культур перспективно исполь-

зование методик на основе принципа обратной связи — введение калия в суспензию почвы, на которой выращивается тестируемое растение — идентификация ответной реакции растения по параметрам фотосинтеза — поиск экстремума [18].

Выводы

1. Для более объективной оценки калийного состояния почв рекомендуется его комплексная характеристика, включающая определение фракционного состава соединений калия, прочности связи калия с почвой, скорости его перехода из твердой фазы в раствор, буферных свойств почв по отношению к калию, способности почв к восстановлению концентрации подвижных форм калия при их отчуждении с урожаем, баланса калия, определению структурных взаимосвязей между состоянием калия и свойствами почв, условиями среды. Все эти показатели оценивают состояние калия в почвах с разных сторон и дополняют друг друга.

2. Процессы десорбции калия из почв удовлетворительно описываются уравнением Фрейндлиха, а зависимость вытеснения калия из почв от изменения условий десорбции (AC , At° , At , DU) является характеристическим показателем, указывающим на степень неоднородности связей калия с твердой фазой почв. Показатель позволяет прогнозировать изменение содержания подвижного калия в почве в сезонной динамике. Чем выше $AQ/ДС$ при равной величине Q , тем выше плодородие почв.

3. Способность почв к восстановлению концентрации подвижных форм калия при их отчуждении с урожаем является дополнительным показателем, характеризующим состояние калия в почвах. Он позволяет оценить возможную продолжительность выращивания растений без внесения калийных удобрений, без уменьшения содержания калия в почве ниже допустимого уровня. Чем выше этот показатель, тем выше плодородие почв. Он выше в почвах более тяжелого гранулометрического состава, более гумусированных, с большей долей в ми-

нералогическом составе слюд и гидрослюд, более удобренных калием.

4. Буферная емкость почв в отношении калия объясняет отсутствие увеличения содержания в почве водорастворимых и подвижных форм калия в почве при внесении калийных удобрений. Буферная емкость к калию выше у почв более тяжелого гранулометрического состава, для растертых образцов, при определении в полевых условиях.

5. Содержание и состояние калия в почвах в значительной степени определяется протеканием почвообразовательных процессов. Дерновый процесс почвообразования способствует увеличению содержания подвижных форм калия в верхнем горизонте и степень его проявления должна учитываться при расчете баланса калия. Дерновый процесс почвообразования, приводящий к увеличению содержания подвижных форм калия в пахотном слое, усиливается при внесении азотных и фосфорных удобрений, при создании условий для глубокого проникновения корневых систем выращиваемых культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. — 2. Горшкова Е.И., Массуд Абдулла Расул. Потенциальная буферная способность почв по отношению к калию почв зонального генетического ряда // Агрохимия, 1984. № 10. С. 86—92. — 3. Драган Ю.В. и др. К вопросу прогнозирования потребности калия на основе калийного потенциала и показателя активности ионов калия в почвах // Агрохимия, 1962. № 3. С. 16-21. — 4. Капунникова Н.А., Ковриго В.П., Дзюин Г.П. Изучение динамики калийных потенциалов почвенных растворов // Почвоведение, 1981. № 11. С. 61-76. — 5. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. — 6. Кобзаренко В.И. Ресурсы фосфора и калия темно-серых лесных и дерново-подзолистых почв и возможности их мобилизации. Автореф. докт. дисс. М.: МСХА, 1998. — 7. Карпиница Т.В. Моде-

лирование режима калия в системе почва - растение. Автореф. докт. дисс. Курск, 2000. — 8. *Медведева О.Н.* Определение калийного потенциала и потенциала буферной способности почв / В кн. *Агрохимические методы исследования почв*. М.: Наука, 1975. С. 219-227. — 9. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: МГУ, 1988. — 10. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. М., 2000. — 11. *Пуховский А.В.* Многоэлементные экстрагенты и методы в агрохимическом обследовании: концепции, принципы и перспективы. М.: ЦИНАО, 2003. — 12. *Савич В.И., Будагова А.А.* Применение фактора мобильности для оценки обеспеченности почв калием // Докл. ТСХА. 1971. Вып. 162. С. 116-121. — 13. *Савич В.И.* Влияние температуры на подвижность калия в почве // Докл. ТСХА, 1969. Вып. 154. С. 17-92. — 14. *Савич В.И., Будагова А.А.* К вопросу о калийном потенциале почв // Докл. ТСХА, 1971. Вып. 169. С. 135-137. — 15. *Савич В.И.* Сорбция фосфат-ионов некоторыми почвами Магаданской обл. // Докл. ТСХА, 1968. Вып. 115. С. 109-115. — 16. *Савич В.И., Трубицина Е.В.* К вопросу о суспензионном эффекте // Докл. ТСХА, 1979. Вып. 253. С. 66-70. — 17. *Савич В.И., Трубицина Е.В., Докучаев В.С.* Оценка состояния системы почва - растение по содержанию и соотношению положительно и отрицательно заряженных соединений // Почвоведение, 1990. № 9. С. 61-73. — 18. *Савич В.И., Савич Л.В., Вишняков Ю.А.* Оценка предельно допустимых концентраций свинца по активности фотосинтеза // Докл. АН России, 1993. Общая биология. Т. 333. № 2. С. 121-123. — 19. *Савич В.И., Санчес П., Банников В.Н. и др.* Оценка способности почв к поддержанию концентрации ионов в почвенном растворе при их отчуждении с урожаем // Агрохимия, 2002. № 16. С. 5—10. — 20. *Савич В.И., Сычев В.Г., Шишов Л.Л. и др.* Экспрессные методы оценки обеспеченности почв элементами питания и уровня загрязнения токсикантами. М.: ЦИНАО, 2004. — 21. *Савич В.И., Шишов Л.Л., Американин Х.А. и др.* Агрономическая оценка и методы определения агрохимических и физико-химических свойств почв. Астана, 2004. — 22. *Толстова Л.Н.* Калий в почвах основных регионов Узбекистана. Автореф. докт. дисс. М.: МГУ, 1990. — 23. *Шатилов И.С., Замараев А.Г., Духанян Ю.А. и др.* Энергомассообмен в звене полевого севооборота. Ч. 1. Оптимальные параметры системы почва-растение на дерново-подзолистых почвах с целью получения высоких устойчивых урожаев полевых культур. М.: Агроконсалт, 2004. — 24. *Якименко В.Н.* Фиксация и десорбция калия некоторыми автоморфными почвами // Агрохимия, 1995. № 2. С. 12-18. — 25. *Veldkamp W.J., Traore A.N., N'Diaye H.K.* / Assistance an laboratoire des sols, Inst. Royal des Tropiques, Amsterdam, Pays Bas, 1991.

Статья поступила
21 февраля 2006 г.

SUMMARY

The expediency of calcium state evaluation in soil has been substantiated by the following factors-capacity, intensity, kinetics, buffer soil properties toward calcium, soil ability to retain calcium concentration in soil in spite of its decrease caused by harvesting. Perspective of calcium state in soil evaluation was clearly shown up. Natural phenomena of optimum change of calcium content level in soil depending on both soil properties and environment have been brought forward.