

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 552.57:631.416.4

doi: 10.17223/19988591/44/1

**Т.В. Нечаева, Д.А. Соколов, Н.А. Соколова**

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

### **Оценка поглотительной способности углей различной степени метаморфизации на примере фиксации калия**

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-04-00836\_a.

Приведены результаты лабораторного опыта по изучению калийфиксирующей способности трех видов угля различной степени метаморфизации (антрацит, каменный, бурый) крупнейших месторождений Западной Сибири, а также лессовидного суглинка и гумусового горизонта агрочернозема для сравнительной оценки. Калийные удобрения (в форме  $KCl$ ) вносили однократно в дозах 25 и 50 мг  $K$  на 100 г субстрата (варианты  $K_{25}$  и  $K_{50}$ ). Также предусмотрен вариант без внесения удобрений ( $K_0$ ). Опыт проведен в режиме попеременного увлажнения-высушивания субстратов с удобрениями и отбором проб через 1, 5, 15, 30 и 150 дней. Установлено, что в среднем за 5 месяцев проведения эксперимента субстраты по калийфиксирующей способности выстраиваются в следующий ряд (в процентах): лессовидный суглинок (80) → агрочернозем (38) → антрацит (36) → каменный уголь (30) → бурый уголь (10). При внесении калийных удобрений содержание калия в субстратах увеличивалось в следующих формах: лессовидный суглинок – в необменной, агрочернозем – в обменной, бурый и каменный угли – в обменной и водорастворимой, антрацит – в водорастворимой, подверженной вымыванию. Через 150 дней внесенный с удобрениями калий извлекался из субстратов суммарно в водорастворимой, обменной и необменной формах элемента по-разному: полностью из бурого угля, до 90% из каменного угля и лессовидного суглинка, до 50 и 40% из агрочернозема и антрацита. В период фиксации калия субстратами (за исключением бурого угля) переход катионов  $K^+$  осуществлялся не только в необменную форму (извлекаемую 1 М  $HNO_3$  с кипячением), но и в более прочно связанное состояние.

**Ключевые слова:** антрацит; каменный и бурый угли; калийфиксирующая способность; формы калия; Западная Сибирь.

### **Введение**

Добыча угля в России постоянно растет и в 2017 г. составила 407,8 млн т [1]. Ценность различных видов угля определяется не только энергетическими свойствами, но и возможностью попутного извлечения из углей ряда ред-

ких и рассеянных элементов, добычи угольного метана, а также получения многочисленных важных продуктов технологической переработки (углеродистые материалы, адсорбенты, гуминовые препараты и др.) [2–3]. Но не стоит забывать о том, что значительная часть углей маломощных пластов, а также входящих в состав углевлещающих пород остается в пределах месторождений и складывается в отвалы вместе с отходами добычи [4]. На поверхности таких отвалов в результате процессов почвообразования формируются молодые почвы, свойства которых обусловлены сочетанием разных факторов, в том числе присутствием в них углистых частиц [5–7].

Состав и свойства различных видов угля, в том числе добываемого в Сибири, многосторонне изучены [8–9], однако экологические аспекты влияния углей на процессы почвообразования и восстановления техногенных ландшафтов остаются без должного внимания. Большинство работ направлено на выявление литогенной [10–13] и педогенной [14–16] составляющих в органическом веществе почв техногенных ландшафтов. Вместе с тем одним из основных свойств углей, определяющих их экологические функции, является поглотительная способность [17–19]. Известно, что поглотительная способность естественных почв зависит от минералогического и гранулометрического состава, содержания органического вещества. В техногенных ландшафтах, где вышеперечисленные свойства лимитируют развитие почвообразовательных процессов [20], поглотительная способность молодых почв определяется также присутствием в них углистых частиц [21] и степенью их метаморфизации. Перспективным представляется исследование поглотительной способности различных видов угля посредством оценки их калийфиксирующей способности [22–23], так как, с одной стороны, калий является одним из важнейших биогенных элементов [24–26], с другой – соединения калия наиболее часто используются для получения из углей гуминовых препаратов – веществ, применяемых для увеличения емкости поглощения почв, активизации биохимических почвенных процессов и повышения доступности растениям элементов питания [3, 27].

По литературным данным [24–25], под фиксацией калия понимают переход катионов  $K^+$ , находящихся в почвенном растворе или в обменной форме, в необменную форму, т.е. в более прочно связанное состояние. Калийфиксирующая способность почв может сильно различаться в зависимости от их минералогического и гранулометрического состава, содержания органического вещества, емкости катионного обмена, насыщенности поглощающего комплекса этим элементом, направленности почвообразовательных процессов и других факторов [26, 28–29]. Представляет интерес изучение калийфиксирующей способности различных видов угля для оценки их поглотительной способности, а также распределение вносимого с удобрениями калия по его формам.

Цель работы – оценить калийфиксирующую способность углей различной степени метаморфизации в сравнении с лессовидным суглинком и автоморфными почвами Западной Сибири.

### Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования выбраны образцы трех видов угля крупнейших месторождений Западной Сибири, различающихся по степени метаморфизации:

- антрацит Горловского месторождения одноименного бассейна ( $54^{\circ}34'N$ ,  $83^{\circ}35'E$ );
- каменный уголь Листвянского месторождения Кузнецкого бассейна ( $53^{\circ}39'N$ ,  $86^{\circ}53'E$ );
- бурый уголь Назаровского месторождения Канско-Ачинского бассейна ( $55^{\circ}58'N$ ,  $90^{\circ}23'E$ ).

Для сравнительной оценки калийфиксирующей способности углей на территории рассматриваемых угольных бассейнов также взяты образцы гумусового горизонта и почвообразующей породы агрочернозема глинисто-иллювиального среднегумусированного среднесуглинистого на лессовидном карбонатном суглинке [по 30] (Luvic Chernozem [по 31]) (далее – агрочернозем).

Далее по тексту статьи все изученные образцы обозначены общим термином – «субстраты».

Изучение калийфиксирующей способности субстратов проводили в условиях лабораторного опыта. Пробоподготовка субстратов к опыту включала доведение их до воздушно-сухого состояния и просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм. До постановки опыта из подготовленных субстратов взяты навески для проведения химико-аналитических исследований (табл. 1). Затем навески субстратов по 100 г помещали в стеклянные химические стаканы и однократно добавляли к ним водный раствор калийных удобрений. В качестве удобрений использовали калий хлористый (KCl) в дозах 25 и 50 мг K на 100 г субстрата соответственно (варианты  $K_{25}$  и  $K_{50}$ ). Для этого навески KCl растворяли в 50 мл дистиллированной воды ( $H_2O_{\text{дист}}$ ) и вносили в стаканы с субстратами. Схемой опыта предусмотрен также вариант без внесения удобрений ( $K_0$ ), когда к субстратам приливали только 50 мл  $H_2O_{\text{дист}}$ . Далее субстраты тщательно перемешивали стеклянной палочкой и через 1, 5, 15, 30 и 150 дней после внесения удобрений отбирали навески для проведения химико-аналитических исследований (табл. 2–4, рис. 1). Для более полного проявления способности субстратов к фиксации калия эксперимент после внесения удобрений проводили в режиме попеременного намачивания  $H_2O_{\text{дист}}$  до наименьшей влагоемкости и высушивания при комнатной температуре как процесс, принципиально сходный с тем, которому подвергается верхний почвенный слой в естественных условиях. Повторность опыта 2-кратная, следовательно, объем выборки для каждого субстрата с тремя вариантами ( $K_0$ ,  $K_{25}$  и  $K_{50}$ ) за пять отборов (1, 5, 15, 30 и 150 дней) составил  $n = 30$  ( $2 \times 3 \times 5$ ).

Содержание калия рассчитано на элемент (K) в абсолютно сухих субстратах и определено общепринятыми в почвенно-агрохимических иссле-

дованиях методами [32–34] с использованием следующих экстрагентов: водорастворимый калий ( $K_{\text{вод}}$ ) – при соотношении субстрат : вода, равном 1 : 5, обменный калий ( $K_{\text{обм}}$ ) – 1 М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , необменный калий ( $K_{\text{необм}}$ ) – 1 М  $\text{HNO}_3$  с кипячением. Измерение величины рН водной суспензии ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) субстратов выполнено потенциометрическим методом, стандартная емкость катионного обмена (ЕКО) – по Бобко-Аскинази в модификации ЦИНАО [34].

Содержание обменного калия до закладки опыта (см. табл. 1) и за весь период после внесения удобрений (см. табл. 2–3) рассчитано вместе с водорастворимой формой элемента, так как более сильный экстрагент извлекает и калий, переходящий в относительно слабые вытяжки. В конце эксперимента (150 дней) в субстратах определено содержание калия в трех формах ( $K_{\text{вод}}$ ,  $K_{\text{обм}}$ ,  $K_{\text{необм}}$ ), в данном случае для вычисления конкретной формы элемента использован метод разности. Поэтому расчет обменного калия выполнен с учетом вычета водорастворимой формы, а необменного калия – с учетом вычета водорастворимой и обменной форм элемента (см. табл. 4, рис. 1). Фиксированным считался калий, не переходящий в вытяжку 1 М  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ .

Статистическая обработка экспериментальных данных проведена с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2007 и SNEDECOR V. 5.80 [35]. Результаты исследования представлены в виде среднего арифметического значения ( $M$ ) со стандартной ошибкой ( $m$ ) и стандартным отклонением ( $SD$ ), а также объема выборки ( $n$ ). Анализ различия факторных средних проведен методом дисперсионного анализа с применением критерия Шеффе (самым строгим по сравнению с критериями Стьюдента и Тьюки) и расчетом наименьшей существенной разницы на уровне значимости  $\alpha = 0,01$  ( $\text{HCP}_{01}$ ).

## Результаты исследования и обсуждение

**Характеристика субстратов.** Изначально до постановки лабораторного опыта субстраты различались между собой по ряду изученных свойств (см. табл. 1). Например, бурый уголь имел слабокислую реакцию среды; антрацит, каменный уголь и агрочернозем – близкую к нейтральной; суглинок – щелочную. Бурый уголь по величине ЕКО обладал самой высокой поглотительной способностью, которая может быть типична только для отдельных компонентов почвенной массы (гумусовые вещества, смектитовые минералы и т.д.), и очень низким уровнем насыщенности ЕКО обменным калием. Антрацит и каменный уголь по величине ЕКО имели близкие значения и самую низкую поглотительную способность; суглинок и агрочернозем обладали средней поглотительной способностью, характерной для почв с невысоким содержанием гумуса. Насыщенность ЕКО обменным калием в агрочерноземе соответствовала неустойчивому уровню, в суглинке – оптимальному уровню [25, 36]. Следовательно, можно предположить, что в буром угле большая часть вносимого с удобрениями калия будет переходить в обменную форму, в остальных субстратах – преобладать фиксация калия.

Таблица 1 [Table 1]

**Исходные свойства субстратов до постановки опыта**  
**[Initial properties of substrates before the experiment]**

Свойства [Properties]	Антрацит [Anthracite]	Камен- ный уголь [Coal]	Бурый уголь [Brown coal]	Сугли- нок [Loam]	Агрочер- нозем [Agrocher- nozem]
pH <sub>H2O</sub>	6,4	6,7	5,4	8,1	6,5
*ЕКО, мг-экв/100 г [*CEC, mg-eq/100 g]	3,0	3,9	63,3	30,2	39,8
К обменный (K <sub>обм</sub> ), мг/кг [Exchangeable K (Ex-K), mg/kg]	18	76	27	209	224
Уровень насыщенности ЕКО K <sub>обм</sub> [CEC satura- tion of Ex-K level], %	1,6	5,0	0,1	1,8	1,4

*Примечание.* \* – емкость катионного обмена.

[Note. \* - Cation exchange capacity].

Таблица 2 [Table 2]

**Результаты лабораторного опыта по изучению**  
**калийфиксирующей способности субстратов**

**[Results of the laboratory experiment for studying the potassium fixation capacity of substrates]**

Вариант [Variant]	Содержание K <sub>обм</sub> (мг/кг) после внесения удобрений (дни) [Content of Ex-K (mg/kg) after fertilization (days)]						**Фиксация калия [**Fixed potassium]	
	1	5	15	30	150	1–150*	мг/кг [mg/kg]	%
Антрацит [Anthracite]								
K <sub>0</sub>	22	39	19	12	14	21	–	–
K <sub>25</sub>	263	227	217	130	65	181	91	36
K <sub>50</sub>	442	401	397	367	122	346	175	35
Каменный уголь [Coal]								
K <sub>0</sub>	87	82	72	59	66	73	–	–
K <sub>25</sub>	267	274	234	218	215	242	81	33
K <sub>50</sub>	460	406	413	481	420	436	137	27
Бурый уголь [Brown coal]								
K <sub>0</sub>	31	46	39	26	27	34	–	–
K <sub>25</sub>	284	274	249	260	233	260	24	10
K <sub>50</sub>	458	453	475	532	494	483	51	10
Суглинок [Loam]								
K <sub>0</sub>	205	181	168	180	190	185	–	–
K <sub>25</sub>	242	238	232	207	203	224	210	84
K <sub>50</sub>	358	326	339	268	229	304	381	76
Агрочернозем [Agrochernozem]								
K <sub>0</sub>	204	192	168	180	190	187	–	–
K <sub>25</sub>	396	357	342	390	243	345	91	37
K <sub>50</sub>	526	527	492	601	319	493	194	39

*Примечание.* \* – в среднем за время проведения эксперимента. \*\* – фиксация калия рассчитана в среднем за 5 месяцев эксперимента относительно варианта K<sub>0</sub> в абсолютных величинах и в процентах от внесенной дозы удобрений.

[Note. \* - On average during the experiment. \*\* - Potassium fixation was calculated, on average, for 5 months of the experiment relative to K<sub>0</sub> variant in absolute values and as a percentage of the applied dose of fertilizers].

**Калийфиксирующая способность субстратов.** В проведенном опыте фиксированным считался калий, первоначально добавленный в субстраты в виде водного раствора соли (KCl) и далее перешедший в форму, не поддающуюся извлечению 1 М раствором ацетата аммония ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ). Фиксацию калия (см. табл. 2) рассчитывали относительно варианта без внесения удобрений ( $K_0$ ) как в абсолютных величинах (мг/кг), так и в процентах от внесенной дозы удобрений (процент фиксации).

Независимо от дозы удобрений вносимый калий не фиксировался субстратами полностью (см. табл. 2). В среднем за 150 дней эксперимента самой высокой калийфиксирующей способностью обладал суглинок, самой низкой – бурый уголь. Такие же закономерности получены нами и ранее по результатам за 30 дней проведения эксперимента [37]. В каменном угле и антраците фиксация калия значительно выше по сравнению с бурым углем, в то же время они имели довольно близкие значения по данному параметру к агрочернозему. При повышении дозы удобрений ( $K_{50}$ ) абсолютная величина фиксируемого калия в субстратах значительно увеличивалась (в 1,7–2,1 раза), однако процент фиксации элемента оставался примерно на уровне дозы  $K_{25}$  или несколько снижался. В суглинке большая часть внесенного с удобрениями калия зафиксирована в первый день наблюдений – 70–85%, к концу опыта она увеличилась до 95%. В агрочерноземе в течение первых 15 дней опыта после внесения удобрений фиксация калия составила 30–35%, через месяц она резко снизилась до 16%, а в последний отбор (150 дней) увеличилась до 75–80%. Подобная закономерность по усилению фиксации калия почвами при их длительном компостировании отмечалась и ранее [25, 28–29], что связано, по-видимому, с качественными изменениями, произошедшими с минеральной основой при многократном периодическом намачивании и высушивании почв (агрегация коллоидов и т.п.).

Если сравнить величины калийфиксирующей способности изученных субстратов с автоморфными почвами на лессовидных суглинках в условиях Западной Сибири, то в исследованиях В.П. Серединой [26] серые лесные почвы фиксировали 32–35% внесенного калия, черноземы выщелоченные – до 47%, дерново-подзолистые – до 26%. В опытах В.Н. Якименко [25, 28] фиксация калия в серых и темно-серых лесных почвах составила 53–67%, в черноземах выщелоченных и дерново-подзолистых почвах – 33–46%, и при самых высоких дозах калийных удобрений процент фиксации снижался. Следовательно, угли более высокой степени метаморфизации (каменный и антрацит) не уступают по калийфиксирующей способности наиболее распространенным и используемым в земледелии автоморфным почвам.

Результаты дисперсионного анализа (см. табл. 3) показали, что содержание обменного калия во всех субстратах, с одной стороны, повышается с увеличением дозы калийных удобрений (в 2,5 и 4,1 раза соответственно в вариантах  $K_{25}$  и  $K_{50}$ ), с другой стороны, снижается с увеличением продолжительности опыта (в 1,4 раза через 150 дней). В антраците содержание обменного калия существенно ниже по сравнению с другими субстратами.

Таблица 3 [Table 3]

**Результаты дисперсионного анализа факторных средних  
по содержанию обменного калия в субстратах**  
[Results of the factorial analysis of variance for exchangeable potassium content in substrates]

Вариант [Variant]	n	M	SD	m	Наименьшая су- щест. разница [Least significant difference]	
		K <sub>обм</sub> , мг/кг [Ex-K, mg/kg]			Различия статистиче- ски значимы [Statistically significant]	HCP <sub>01</sub> [LSD <sub>01</sub> ]
Субстрат [Substrate]						
Антрацит [Anthracite]	30	182	157	286	Контроль [Control]	
Каменный уголь [Coal]	30	250	153	279	Да [Yes]	14,4
Бурый уголь [Brown coal]	30	259	188	342	Да [Yes]	
Суглинок [Loam]	30	238	60	110	Да [Yes]	
Агрочерно- зем [Agro- chernozem]	30	342	143	261	Да [Yes]	
Доза удобрений [Fertilizer dose]						
K <sub>0</sub>	50	100	74	10	Контроль [Control]	
K <sub>25</sub>	50	250	71	10	Да [Yes]	9,2
K <sub>50</sub>	50	412	106	15	Да [Yes]	
Период после внесения удобрений, дни [Period after fertilization, days]						
1	30	283	156	28	Контроль [Control]	
5	30	268	144	26	Да [Yes]	14,4
15	30	257	149	27	Да [Yes]	
30	30	261	178	32	Да [Yes]	
150	30	202	134	24	Да [Yes]	

*Примечание.* n – объем выборки, M – среднее арифметическое значение, SD и m – стандартное отклонение и стандартная ошибка среднего арифметического значения.

[Note. n - Sample size, M - Arithmetic mean value, SD and m - Standard Deviation and Standard error of mean].

Долевое участие факторов по их влиянию на содержание обменного калия в субстратах выстраивается в следующий ряд (в %): доза удобрений (69,6) → субстрат (11,2) → период после внесения удобрений (3,2). Если учитывать взаимодействие факторов, то наибольшее долевое участие оказали доза удобрений и субстрат – 8,5%, в остальных случаях – менее 3%.

**Формы калия в субстратах.** Представляет интерес рассмотрение содержания и распределения калия по его формам в субстратах через 150 дней после внесения калийных удобрений (см. табл. 4).



Таблица 4 [Table 4]

**Распределение калия по его формам через 150 дней после внесения удобрений**  
**[Distribution of potassium forms 150 days after fertilization]**

Вариант [Variant]	Содержание форм калия, мг/кг [Content of potassium forms, mg/kg]					
	Водорастворимая ( $K_{\text{вод}}$ ) [Water-soluble (Ws-K)]		Обменная ( $K_{\text{обм}}$ ) [Exchangeable (Ex-K)]		Необменная ( $K_{\text{необм}}$ ) [Non-exchangeable (Nex-K)]	
	Всего [Total]	*Дополни- тельно [*Additionally]	Всего [Total]	*Дополни- тельно [*Additionally]	Всего [Total]	*Дополни- тельно [*Additionally]
<b>Антрацит [Anthracite]</b>						
$K_0$	8	—	6	—	92	—
$K_{25}$	76	68 (27%)	10	4 (4%)	125	34 (14%)
$K_{50}$	127	119 (24%)	5	0	171	79 (16%)
<b>Каменный уголь [Coal]</b>						
$K_0$	31	—	35	—	110	—
$K_{25}$	78	47 (19%)	137	102 (41%)	193	83 (33%)
$K_{50}$	170	138 (18%)	250	215 (43%)	180	70 (14%)
<b>Бурый уголь [Brown coal]</b>						
$K_0$	10	—	17	—	46	—
$K_{25}$	99	89 (35%)	134	117 (47%)	91	44 (18%)
$K_{50}$	220	210 (42%)	256	239 (48%)	98	51 (10%)
<b>Суглинок [Loam]</b>						
$K_0$	7	—	183	—	899	—
$K_{25}$	9	2 (1%)	194	11 (4%)	1119	220 (88%)
$K_{50}$	14	7 (1%)	214	31 (6%)	1155	256 (51%)
<b>Агрочернозем [Agrochernozem]</b>						
$K_0$	13	—	177	—	1626	—
$K_{25}$	21	7 (3%)	222	45 (18%)	1626	0
$K_{50}$	31	18 (4%)	288	111 (22%)	1771	145 (29%)

*Примечание.* \* — в скобках указано в процентах от внесенной дозы удобрений.

[Note. \* - In brackets, the amount is indicated as a percentage of the applied fertilizer].

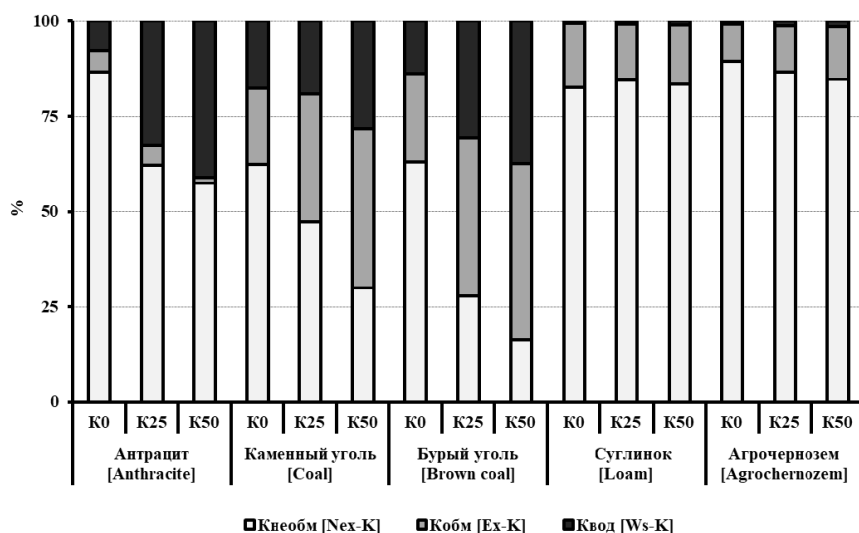
Внесенный с удобрениями калий частично или полностью извлекался тремя используемыми экстрагентами ( $H_2O$ , 1 М  $CH_3COONH_4$ , 1 М  $HNO_3$ ) и накапливался в определенных пропорциях между водорастворимой, обменной и необменной формами, что, вероятно, зависит от содержания природных носителей той или иной формы калия в субстратах и степени их насыщенности данным элементом. Например, в буром угле внесенный калий полностью извлекался тремя экстрагентами, в каменном угле — основная его часть (около 85–90%), в антраците — менее половины (около 40%).

При внесении калийных удобрений в буром и каменном углях увеличивалось, прежде всего, содержание калия в обменной и водорастворимой формах; в антраците — в водорастворимой форме, подверженной вымыванию. В каменном угле и антраците переход катионов калия в период фиксации осуществлялся не только в извлекаемую 1 М  $HNO_3$  необменную форму, но и в более прочно связанное состояние. В антраците фиксация калия значительно выше в сравнении с другими видами угля. В агрочерноземе внесенный калий накапливался преимущественно в обменной форме, что согласуется с



неустойчивым уровнем насыщенности ЕКО обменным калием (см. табл. 1, 4), а фиксация калия преобладала на более высокоселективных к нему позициях, по сравнению с необменной формой (извлекаемой 1 М  $\text{HNO}_3$ ). В суглинке, характеризующемся повышенной насыщенностью поглощающего комплекса обменным калием, максимальное накопление внесенного калия отмечено в необменной форме (извлекаемой 1 М  $\text{HNO}_3$ ), однако при повышении дозы удобрений усиливалась фиксация калия в более прочно связанное состояние. Из всех субстратов наибольшая фиксация калия установлена в суглинке, что обусловлено, вероятно, присутствием глинистых минералов, обладающих высокой калийфиксирующей способностью [25–26, 38].

Если условно принять содержание водорастворимого, обменного и необменного калия в субстратах в общей сумме за сто процентов, то значительная доля приходится на необменную форму (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Соотношение между формами калия в субстратах через 150 дней после внесения удобрений

[Fig. 1. The ratio between potassium forms in substrates 150 days after fertilization. The sum of potassium forms is considered as 100%]

С уменьшением степени метаморфизации углей (антрацит → каменный → бурый) доля необменного калия снижается при значительном увеличении доли как обменной, так и водорастворимой форм элемента. Так, в варианте без внесения удобрений ( $K_0$ ) соотношение между  $K_{\text{вод}} - K_{\text{обм}} - K_{\text{необм}}$  в антраците составило 7–6–83%, в каменном и буром углях – 17–20–63 и 14–23–63% соответственно. В агрокерноземе и суглинке после внесения удобрений (варианты  $K_{25}$  и  $K_{50}$ ) соотношение между формами калия осталось таким же, как и в варианте без удобрений ( $K_0$ ), тогда как в антраците

значительно увеличилась доля водорастворимого калия в удобренных вариантах, в каменном и буром углях – обменного и водорастворимого калия. Следовательно, можно предположить, что в агрочерноземе и суглинке, в отличие от трех видов угля, соотношение между формами калия находится на определенном стабильном уровне, сформировавшемся в процессе их эволюции. При нарушении данного равновесия, в результате внесения калийных удобрений, превращение форм калия протекает в направлении восстановления первоначальных пропорций между ними, что также отмечено и в других исследованиях [24–26, 28–29, 38–39].

Таким образом, как показал опыт по фиксации калия, угли различной степени метаморфизации способны к депонированию биогенных элементов и, обладая поглотительной способностью, оказывают влияние на питательный режим и свойства молодых почв отвалов угольных месторождений, тем самым определяя скорость восстановления техногенных ландшафтов. Так, калийфиксирующая способность бурого угля, несмотря на высокую емкость катионного обмена, почти в три раза ниже таковой каменного угля и антрацита. По всей видимости, обменные позиции поглощающего комплекса бурого угля заняты другими элементами, предположительно кальцием и / или магнием. Влияние углей высокой степени метаморфизации на процессы функционирования молодых почв осуществляется благодаря тому, что до семи и более процентов мелкозема составляют тонкодисперсные частицы угля [10, 14]. К тому же в отвал как каменный уголь, так и антрацит попадают вместе с крупнообломочными породами, обладающими незначительной поглотительной способностью. Бурый уголь отсыпается вместе с суглинистыми и глинистыми породами [14], что минимизирует его участие в обменных процессах, протекающих в молодых почвах техногенных ландшафтов.

Полученные результаты демонстрируют пригодность различных видов угля к обменным процессам, протекающим в почвах. Их использование позволит более детально оценивать почвенно-экологическое состояние и перспективы восстановления техногенных ландшафтов и тем самым корректировать задачи и обоснованно определять направленность рекультивационных мероприятий.

## Выводы

1. В среднем за 5 месяцев проведения эксперимента изученные субстраты по калийфиксирующей способности выстраиваются в следующий ряд по убыванию: лессовидный суглинок → агрочернозем → антрацит → каменный уголь → бурый уголь. Фиксация калия в антраците и каменном угле составила 36 и 30%, что приближает их к агрочернозему (38%) и другим автоморфным почвам на лессовидных суглинках в условиях Западной Сибири. Самой низкой калийфиксирующей способностью характеризовался бурый уголь (10%), высокой – лессовидный суглинок (80%).

2. Независимо от дозы удобрений ( $K_{25}$  или  $K_{50}$ , что соответствует 25 и 50 мг К на 100 г субстрата) внесенный калий не фиксировался субстратами полностью. При дозе  $K_{50}$  абсолютная величина фиксируемого калия в субстратах значительно увеличивалась, однако процент фиксации элемента оставался на уровне дозы  $K_{25}$  или несколько снижался. В период фиксации калия субстратами (за исключением бурого угля) переход катионов  $K^+$  осуществлялся не только в необменную форму (извлекаемую 1 М  $HNO_3$  с кипячением), но и в более прочно связанное состояние.

3. Через 5 месяцев эксперимента внесенный с удобрениями калий извлекался из субстратов суммарно в водорастворимой, обменной и необменной формах элемента по-разному: полностью из бурого угля, до 90% из каменного угля и лессовидного суглинка, до 50 и 40% из агрочернозема и антрацита. При внесении калийных удобрений увеличивалось содержание калия в субстратах преимущественно в следующих формах: лессовидный суглинок – в необменной; агрочернозем – в обменной; бурый и каменный угли – в обменной и водорастворимой; антрацит – в водорастворимой, подверженной вымыванию.

### Литература

1. Нефтяная отрасль: итоги 2017 года и краткосрочные перспективы / Выпуск подготовлен авторским коллективом под руководством Л. Григорьева // Энергетический бюллетень. 2018. № 56. 28 с.
2. Голицын М.В., Вялов В.И., Богомолов А.Х., Пронина Н.В., Макарова Е.Ю., Митронов Д.В., Кузеванова Е.В., Макаров Д.В. Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. 2015. Т. 61, № 2. С. 41–53.
3. Khaibullin M.M., Kirillova G.B., Yusupova G.M., Kagirow E.S., Ismagilov R.Z., Rachimov R.R., Sergeev V.S., Khaziev F.H., Gaifullin R.R., Bagautdinov F.Y. Influence of percentage fertilizer systems on change of agrochemical properties of the arable layer of leach Chernozem and on the crops productivity of crop rotation // Journal of Engineering and Applied Science. 2018. Vol. 13. PP. 6527–6532. doi: 10.3923/jeasci.2018.6527.6532
4. Androkhonov V.A., Sokolov D.A. Fractional composition of redox systems in the soils of coal mine dump // Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45, № 4. PP. 399–403. doi: [10.1134/S1064229312020032](https://doi.org/10.1134/S1064229312020032)
5. Zharikova E.A., Kostenkov N.M. Physicochemical properties and potassium state of the soils developed on dump rocks of coal mines // Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47, № 1. PP. 26–34. doi: [10.7868/S0032180X14010146](https://doi.org/10.7868/S0032180X14010146)
6. Середина В.П., Алексеева Т.П., Сысоева Л.Н., Трунова Н.М., Бурмистрова Т.И. Исследование процессов формирования органического вещества в нарушенных при угледобыче почвах // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 1 (17). С. 18–31.
7. Verma M.K., Pandey P., Mukhopadhyay R., Dwaivedi R., Karmakar N.C., Bajaj V.K. Chemical characterization of selected overburdens of Singrauli coalfields // Ecology, Environment and Conservation. 2016. Vol. 22. PP. S207–S211.
8. Угольная база России. Т. III: Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (южная часть) / гл. ред. В.Ф. Череповский. М. : ООО «Геоинформцентр», 2002. 488 с.
9. Угольная база России. Т. II: Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского

- края и Республики Алтай) / гл. ред. В.Ф. Череповский. М. : ООО «Геоинформцентр», 2003. 604 с.
10. Ussiri D.A.N., Jacinthe P.A., Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils // *Geoderma*. 2014. № 214–215. PP. 155–167. doi: [10.1016/j.geoderma.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.015)
  11. Maharaj S., Barton C.D., Karatkanasis T.A.D., Rowe H.D., Rimmer S.M. Distinguishing “new” from “old” organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development // *Soil Science*. 2007. № 172. PP. 292–301. doi: [10.1097/SS.0b013e31803146e8](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31803146e8)
  12. Rumpel C., Knicker H., Kogel-Knabner I., Skjemstad J.O., Huttli R.F. Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils // *Geoderma*. 1998. № 86. PP. 123–142. doi: [10.1016/S0016-7061\(98\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00036-6)
  13. Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelinas Y., Kuhlbusch T.A.J. Comparative analysis of black carbon in soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. № 15. PP. 163–167. doi: [10.1029/2000GB001284](https://doi.org/10.1029/2000GB001284)
  14. Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лим А.Г., Гуркова Е.А., Нечаева Т.В., Мерзляков О.Э. Сравнительная оценка методов определения педогенного органического углерода в углесодержащих почвах // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2017. № 39. С. 29–43. doi: [10.17223/19988591/39/2](https://doi.org/10.17223/19988591/39/2)
  15. Brodowski S., Amelung W., Haumaier L., Abetz C., Zech W. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy // *Geoderma*. 2005. № 128. PP. 116–129. doi: [10.1016/j.geoderma.2004.12.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.019)
  16. Skjemstad J.O., Janik L.J., Head M.J., McClure S.G. High-energy ultraviolet photooxidation: a novel technique for studying physically protected organic-matter in clay-sized and silt-sized aggregates // *Journal of Soil Science*. 1993. № 44. PP. 485–499. doi: [10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x)
  17. Bota K.B., Abotsi G.M.K., Sims L.L. Electrokinetic and Adsorptive Properties of a Lignite in Aqueous Solutions of Catalytic Salts // *Energy and Fuels*. 1994. Is. 4, vol. 8. PP. 937–942. doi: [10.1021/ef00046a018](https://doi.org/10.1021/ef00046a018)
  18. Cornelissen G., Gustafsson Ö. Importance of unburned coal carbon, black carbon, and amorphous organic carbon to phenanthrene sorption in sediments // *Environmental Science and Technology*. 2005. Is. 3, vol. 39. PP. 764–769. doi: [10.1021/es049320z](https://doi.org/10.1021/es049320z)
  19. Wang R., Ma Q., Ye X., Li C., Zhao Z. Preparing coal slurry from coking wastewater to achieve resource utilization: Slurrying mechanism of coking wastewater–coal slurry // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 650. PP. 1678–1687. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.09.329](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.329)
  20. Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko S.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48, № 1. PP. 95–105. doi: [10.1134/S1064229315010159](https://doi.org/10.1134/S1064229315010159)
  21. Otremba K. Effect of addition of brown coal on the structure of soils developing from post-mining grounds of Konin brown coal mine // *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2012. Is. 14. PP. 695–707.
  22. Godfried M.K., Kofi A., Bota B., Saha G. Effects of coal surface charge on the adsorption and gasification activities of calcium and potassium // *Fuel Science and Technology International*. 1993. Is. 2, vol. 11. PP. 327–348. doi: [10.1080/08843759308916071](https://doi.org/10.1080/08843759308916071)
  23. Yoon T.H., Benzerara K., Ahn S., Luthy R.G., Tyliszczak T., Brown Jr. G.E. Nanometer-scale chemical heterogeneities of black carbon materials and their impacts on PCB sorption properties: Soft X-ray spectromicroscopy study // *Environmental Science and Technology*. 2006. Is. 19, vol. 40. PP. 5923–5929. doi: [10.1021/es060173+](https://doi.org/10.1021/es060173+)
  24. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М. : Ледум, 2000. 185 с.
  25. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.

26. Середина В.П. Калий и почвообразование. Томск : Изд-во ТГУ, 2012. 354 с.
27. Yakimenko O.S., Terekhova V.A. Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes // Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 44, № 11. PP. 1222–1230. doi: [10.1134/S1064229311090183](https://doi.org/10.1134/S1064229311090183)
28. Якименко В.Н. Фиксация и десорбция калия некоторыми автоморфными почвами // Агрохимия. 1995. № 2. С. 12–18.
29. Пивоварова Е.Г. Влияние калийных удобрений на содержание форм калия в почве и урожайность сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1993. № 2. С. 44–49.
30. Полевой определитель почв России / под ред. Н.Б. Хитрова. М. : Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
31. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome : FAO, 2014. 181 p.
32. Агрохимические методы исследования почв / под ред. А.В. Соколова. 5-е изд., доп. и перераб. М. : Наука, 1975. 656 с.
33. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of soil analysis: Mineralogical, organic and inorganic methods. Berlin : Springer, 2006. 993 p.
34. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
35. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. 2-е изд. Новосибирск : ГУП РПО СО РАСХН, 2012. 282 с.
36. Якименко В.Н., Нечаева Т.В. Действие и последствие калийных удобрений в Западной Сибири // Вестник Международного института питания растений. 2016. № 2. С. 9–13. doi: <http://eeca-ru.ipni.net/article/EECARU-2340>
37. Нечаева Т.В., Соколов Д.А. Оценка К-фиксирующей способности различных видов углей // Материалы международной научной конференции «Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления». Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2016. С. 173–179.
38. Середина В.П. Геохимические особенности поведения калия в почвах // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2007. № 1. С. 106–118.
39. Павлов К.В., Егоров В.С., Пулин А.В. Характеристика фиксации калия дерново-подзолистой почвой // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2003. № 3. С. 49–51.

*Поступила в редакцию 21.05.2018 г.; повторно 17.11.2018 г.;  
принята 05.12.2018 г.; опубликована 27.12.2018 г.*

**Авторский коллектив:**

**Нечаева Таисия Владимировна** – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории агрохимии, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2).  
E-mail: [nechaeva@issa-siberia.ru](mailto:nechaeva@issa-siberia.ru)

**Соколов Денис Александрович** – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории рекультивации почв, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2).  
E-mail: [sokolovdenis@issa-siberia.ru](mailto:sokolovdenis@issa-siberia.ru)

**Соколова Наталья Александровна** – вед. инженер лаборатории географии и генезиса почв, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2).  
E-mail: [nsokolova@issa-siberia.ru](mailto:nsokolova@issa-siberia.ru)

**For citation:** Nechaeva TV, Sokolov DA, Sokolova NA. Estimation of absorption capacity of coals metamorphosed to a different extent using the example of potassium fixation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology. 2018;44:6-23. doi: 10.17223/19988591/44/1 In Russian, English Summary

**Nechaeva Taisia V, Sokolov Denis A, Sokolova Natalia A**

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

### **Estimation of absorption capacity of coals metamorphosed to a different extent using the example of potassium fixation**

The composition and properties of different coal types, in particular mined in Siberia, are thoroughly studied, but the ecological impact of coals on soil formation process and restoration of technogenic landscapes still lacks sufficient attention. At the same time, one of the main properties of coal, determining its ecological functions, is absorption capacity. The aim of the research was to estimate potassium fixation capacity of coals metamorphosed to a different extent in comparison with loess loam and automorphous soils.

We selected three types of coal from West Siberia major fields: anthracite from Gorlovsky field of the Gorlovsky coal basin (54°34'N, 83°35'E), coal from Listvyansky field of the Kuznetsky coal basin (53°39'N, 86°53'E) and brown coal from Nazarovo field of the Kansk-Achinsky basin (55°58'N, 90°23'E). For a comparative assessment of potassium fixation capacity of coals, we took the following samples: loess carbonated loam (hereinafter, loam) as the prevailing soil-forming rock and humus horizon of Luvic Chernozems (hereinafter, agrochernozem) as automorphous soil on the territory of the studied coal basins. Below in the text, as well as in the tables and figure, the samples of three coal types (anthracite, coal and brown coal), loam and agrochernozem are designated as “substrates”. We examined potassium fixation in the laboratory with substrate composting during 150 days in the presence of potassium fertilizers alternating humidification and desiccation. We added 100 g of air-dry substrates sifted through a sieve with 1 mm hole diameter to water solution of potassium fertilizers (KCl) at a dose of 25 and 50 mg of K/100 g (variants  $K_{25}$  and  $K_{50}$ , respectively). The experiment also included a variant without fertilization ( $K_0$ ). After fertilization, the substrates were thoroughly mixed and 1, 5, 15, 30 and 150 days later samples were picked for chemical analysis. The experiment was conducted in 2 replicates, thus, the sample size for each substrate was  $n = 30$ . Potassium forms were extracted by the following ways: water-soluble potassium (Ws-K) in the ratio of substrate: water 1:5, exchangeable potassium (Ex-K) by 1M  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , and non-exchangeable potassium (Nex-K) by 1M  $\text{HNO}_3$  with boiling. The exchangeable potassium content before the experiment (See Table 1) and during the period after fertilization (See Tables 2 and 3) was calculated with the water-soluble form of the element. At the end of the experiment (150 days), we determined the content of three forms of potassium (Ws-K, ExK and NexK) in the substrates using the difference method (See Table 4 and Fig. 1). Potassium, not extracted by 1M  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , was considered fixed. Potassium fixation was calculated in relation to the variant without fertilization ( $K_0$ ) both in absolute values (mg/kg) and as a percentage of the applied dose of fertilizers (fixation percentage).

Potassium fixation capacity of anthracite and coal averaged 36% and 30%, respectively in the experiment, which brings them closer to agrochernozem (38%); brown coal was characterized by low potassium fixation (10%), and for loess loam

it was high (80%) (See Table 2). Regardless of fertilizer dosage, the applied potassium was never fully fixed by substrates. When potassium fertilizer dosage increased, the absolute value of fixed potassium in substrates significantly rose, but the percentage of the element fixation was at about the same level or even decreased. During potassium fixation by substrates (except brown coal), potassium cations transited not only into non-exchangeable form (extracted by 1M  $\text{HNO}_3$ ), but also into a more tightly bound state. Potassium was accumulated in substrates in the following forms: loess loam - non-exchangeable, agrochernozem - exchangeable, coal and brown coal - exchangeable and water-soluble, anthracite - water-soluble (See Table 4 and Fig. 1). After long-term substrate composting, potassium applied with fertilizers was extracted in water-soluble, exchangeable and non-exchangeable forms differently: 100% from brown coal, up to 90% from coal and loam, and around 50% and 40% from agrochernozem and anthracite, respectively. Thus, coals metamorphosed to a different extent are able to deposit biogenic elements and affect the nutrient regime and properties of young soils of coal-mine dumps, and, thereby, are able to determine the rate of restoration of technogenic landscapes. We can assume that more metamorphosed coals (anthracite, coal) will have a greater effect on the functioning of young soils of technogenic landscapes. The fact that coal and anthracite get to dumps with coarse-fragmented rocks having low adsorption capacity enhances this effect. Brown coal comes mainly with loess loam, which minimizes its participation in exchange processes in young soils of technogenic landscapes. Using the results of this experiment will allow a more detailed estimation of the soil-ecological condition and prospects for restoring technogenic landscapes, and, thus, correcting the purposes and reasonably designating the directions of restoration activities.

*The paper contains 1 Figure, 4 Tables and 39 References.*

**Key words:** coal, anthracite, brown coal, potassium fixation capacity, potassium forms, West Siberia.

**Funding:** This research was supported by the RFBR in the framework of the research project No 18-04-00836\_a.

### References

1. *Neftyanaya otrasl': itogi 2017 goda i kratkosrochnye perspektivy* [The Oil Industry: The results of 2017 and short term prospects]. Release prepared by the team of authors. Grigoriev L, editor. *Energeticheskiy byulleten' = Energy Bulletins*. 2018;56:1-28. In Russian
2. Golitsyn MV, Vyalov VI, Bogomolov AKh, Pronina NV, Makarova EY, Mitronov DV, Kuzevanova EV, Makarov DV. Prospects of technological use of coals in Russia. *Georesursy = Georesources*. 2015;61(2):41-53. doi: [10.18599/grs.61.2.4](https://doi.org/10.18599/grs.61.2.4) In Russian
3. Khaibullin MM, Kirillova GB, Yusupova GM, Kagirow ES, Ismagilov RZ, Rachimov RR, Sergeev VS, Khaziev FH, Gaifullin RR, Bagautdinov FY. Influence of percentage fertilizer systems on change of agrochemical properties of the arable layer of leach Chernozem and on the crops productivity of crop rotation. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2018;13:6527-6532. doi: [10.3923/jeasci.2018.6527.6532](https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.6527.6532)
4. Androkhonov VA, Sokolov DA. Fractional composition of redox systems in the soils of coal mine dump. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(4):399-403. doi: [10.1134/S1064229312020032](https://doi.org/10.1134/S1064229312020032)
5. Zharikova EA, Kostenkov NM. Physicochemical properties and potassium state of the soils developed on dump rocks of coal mines. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(1):26-34. doi: [10.1134/S1064229314010141](https://doi.org/10.1134/S1064229314010141)
6. Seredina VP, Alekseeva TP, Sysoeva LN, Trunova NM, Burmistrova TI. Organic matter formation processes research in lands damaged after mining operation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2012;1(17):18-31. In Russian



7. Verma MK, Pandey P, Mukhopadhyay R, Dwaivedi R, Karmakar NC, Bajaj VK. Chemical characterization of selected overburdens of Singrauli coalfields. *Ecology, Environment and Conservation*. 2016;22:S207-S211.
8. *Ugol'naya baza Rossii. Tom III. Ugol'nye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri (yuzhnaya chast')* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia (Southern part)]. Cherepovskiy VF, editor. Moscow: OOO "Geoinformcentr" Publ.; 2002. 488 p. In Russian
9. *Ugol'naya baza Rossii. Tom II. Ugol'nye basseyny i mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri (Kuznetskiy, Gorlovskiy, Zapadno-Sibirskiy basseyny; mestorozhdeniya Altayskogo kraya i Respubliki Altay)* [Coal base of Russia. Vol. II. Coal basins and deposits of West Siberia (Kuznetsky, Gorlovsky, West-Siberian basins; the deposits of Altai krai and the Republic of Altai)]. Cherepovskiy VF, editor. Moscow: OOO "Geoinformcentr" Publ.; 2003. 604 p. In Russian
10. Ussiri DAN, Jacinthe PA, Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review. *Geoderma*. 2014;214-215:155-167. doi: [10.1016/j.geoderma.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.015)
11. Maharaj S, Barton CD, Karatkanasis TAD, Rowe HD, Rimmer SM. Distinguishing "new" from "old" organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development. *Soil Science*. 2007;172:292-301. doi: [10.1097/SS.0b013e31803146e8](https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31803146e8)
12. Rumpel C, Knicker H, Kogel-Knabner I, Skjemstad JO, Huttli RF. Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. *Geoderma*. 1998;86:123-142. doi: [10.1016/S0016-7061\(98\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00036-6)
13. Schmidt MWI, Skjemstad JO, Czimczik CI, Glaser B, Prentice KM, Gelinas Y, Kuhlbusch TAJ. Comparative analysis of black carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*. 2001;15:163-167. doi: [10.1029/2000GB001284](https://doi.org/10.1029/2000GB001284)
14. Sokolov DA, Kulizhskiy SP, Lim AG, Gurova EA, Nechaeva TV, Merzlyakov OE. Comparative evaluation of methods for determination of pedogenic organic carbon in coal-bearing soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;39:29-43. doi: [10.17223/19988591/39/2](https://doi.org/10.17223/19988591/39/2) In Russian, English Summary
15. Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Abetz C, Zech W. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Geoderma*. 2005;128:116-129. doi: [10.1016/j.geoderma.2004.12.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.019)
16. Skjemstad JO, Janik LJ, Head MJ, McClure SG. High-energy ultraviolet photooxidation: a novel technique for studying physically protected organic-matter in clay-sized and silt-sized aggregates. *Journal of Soil Science*. 1993;44:485-499. doi: [10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00471.x)
17. Bota KB, Abotsi GMK, Sims LL. Electrokinetic and adsorptive properties of a lignite in aqueous solutions of catalytic salts. *Energy and Fuels*. 1994;4(8):937-942. doi: [10.1021/ef00046a018](https://doi.org/10.1021/ef00046a018)
18. Cornelissen G, Gustafsson Ö. Importance of unburned coal carbon, black carbon, and amorphous organic carbon to phenanthrene sorption in sediments. *Environmental Science and Technology*. 2005;39(3):764-769. doi: [10.1021/es049320z](https://doi.org/10.1021/es049320z)
19. Wang R, Ma Q, Ye X, Li C, Zhao Z. Preparing coal slurry from coking wastewater to achieve resource utilization: Slurrying mechanism of coking wastewater-coal slurry. *Science of the Total Environment*. 2019;650:1678-1687. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.09.329](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.329)
20. Sokolov DA, Androkhonov VA, Kulizhskii SP, Loiko SV, Domozhakova EA. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(1):95-105. doi: [10.1134/S1064229315010159](https://doi.org/10.1134/S1064229315010159)

21. Otremba K. Effect of addition of brown coal on the structure of soils developing from post-mining grounds of Konin brown coal mine. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2012;14:695-707.
22. Godfried MK, Kofi A, Bota B, Saha G. Effects of coal surface charge on the adsorption and gasification activities of calcium and potassium. *Fuel Science and Technology International*. 1993;2(11):327-348. doi: [10.1080/08843759308916071](https://doi.org/10.1080/08843759308916071)
23. Yoon TH, Benzerara K, Ahn S, Luthy RG, Tylliszczak T, Brown JrGE. Nanometer-scale chemical heterogeneities of black carbon materials and their impacts on PCB sorption properties: Soft X-ray spectromicroscopy study. *Environmental Science and Technology*. 2006;19(40):5923-5929. doi: [10.1021/es060173+](https://doi.org/10.1021/es060173+)
24. Prokoshev VV, Deryugin I.P. Kaliy i kaliynye udobreniya [Potassium and potassium fertilizers]. Moscow: Ledum Publ.; 2000. 185 p. In Russian
25. Yakimenko VN. Kaliy v agrotsenozakh Zapadnoy Sibiri [Potassium in agrocenoses of Western Siberia]. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS; 2003. 231 p. In Russian
26. Seredina VP. Kaliy i pochvoobrazovanie: Uchebnoe posobie [Potassium and soil formation: Textbook]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2012. 354 p. In Russian
27. Yakimenko OS, Terekhova VA. Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(11):1222-1230. doi: [10.1134/S1064229311090183](https://doi.org/10.1134/S1064229311090183)
28. Yakimenko VN. Fiksatsiya i desorbtziya kaliya nekotorymi avtomorfnyimi pochvami [Potassium fixation and desorption by some automorphic soils]. *Agrokhiimiya = Agricultural Chemistry*. 1995;2:12-18. In Russian
29. Pivovarova EG. Vliyanie kaliynykh udobreniy na sodержanie form kaliya v pochve i urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Influence of potassium fertilizers on the content of potassium forms in soil and crop yields]. *Agrokhiimiya = Agricultural Chemistry*. 1993;2:44-49. In Russian
30. *Polevoy opredelitel' pochv Rossii* [Field determinant of soils in Russia]. Khitrov NB, editor. Moscow: Publishing House of the Dokuchaev Soil Science Institute; 2008. 182 p. In Russian
31. *IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources* 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO; 2015. 192 p.
32. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* [Agrochemical soil research methods]. 5th ed. Sokolov AV, editor. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 656 p. In Russian
33. Pansu M, Gautheyrou J. Handbook of soil analysis: Mineralogical, organic and inorganic methods. Berlin: Springer Publ.; 2006. 993 p.
34. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Vorob'eva LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian
35. Sorokin OD. Prikladnaya statistika na komp'yutere [Applied statistics on the computer]. 2nd ed. Novosibirsk: Publishing House of the GUP RPO SO RASHN; 2012. 282 p. In Russian
36. Yakimenko VN, Nechaeva TV. Deystvie i posledeystvie kaliynykh udobreniy v Zapadnoy Sibiri [Action and aftereffects of potash fertilizers in Western Siberia]. *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta pitaniya rasteniy*. 2016;2:9-13. In Russian
37. Nechaeva TV, Sokolov DA. Otsenka K-fiksiruyushchey sposobnosti razlichnykh vidov ugley [Estimation of potassium-fixation ability of different coal sorts]. In: *Prirodno-tekhnogennyye komplekсы: sovremennoe sostoyanie i perspektivy vosstanovleniya* Materials mezhhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Natural and technogenic complexes: modern state and prospects of restoration]. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS; 2016. pp. 173-179. In Russian
38. Seredina VP. Geochemical features of the potassium conduct in the soil. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2007;1:106-118. In Russian

39. Pavlov KV, Egorov VS, Pulin AV. Kharakteristika fiksatsii kaliya derno-podzolistoy pochvoy [The evaluation of potassium fixation by soddy-podzolic soil]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* = *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2003;3:49-51. In Russian

*Received 21 May 2018; Revised 17 November 2018;  
Accepted 05 December 2018; Published 27 December 2018*

**Author info:**

**Nechaeva Taisia V**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Agrochemistry, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2 Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation.

E-mail: [nechaeva@issa-siberia.ru](mailto:nechaeva@issa-siberia.ru)

**Sokolov Denis A**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2 Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation.

E-mail: [sokolovdenis@issa-siberia.ru](mailto:sokolovdenis@issa-siberia.ru)

**Sokolova Natalia A**, Engineer, Laboratory of Soil Geography and Genesis, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2 Akademika Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation.

E-mail: [nsokolova@issa-siberia.ru](mailto:nsokolova@issa-siberia.ru)