

Д.А. Иванов, ✉
М.В. Рублюк,
О.В. Карасева

Почвенный институт им. В.В. Докучаева,
Москва, Россия

✉ 2016vniimz-noo@list.ru

Поступила в редакцию:
10.04.2023

Одобрена после рецензирования:
02.06.2023

Принята к публикации:
20.06.2023

Dmitriy A. Ivanov, ✉
Maria V. Rublyuk,
Olga V. Karaseva

Federal Research Centre V.V. Dokuchaev
Soil Science Institute, Moscow, Russia

✉ 2016vniimz-noo@list.ru

Received by the editorial office:
10.04.2023

Accepted in revised:
02.06.2023

Accepted for publication:
20.06.2023

Некоторые особенности миграции калия в агроландшафте

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Рассматривается проблема влияния способов использования земель на потерю почвами калия — одного из основных элементов в триаде питания растений.

Методы. Исследования проводились в 1996–2020 гг. на основе мониторинга содержания калия в почвах агрополигона Губино ВНИИМЗ, расположенного в пределах конечно-моренного холма. Мониторинг осуществлялся на агроэкологической трансекте — производственном массиве, пересекающем основные ландшафтные позиции холма и состоящем из 10 параллельных полей, каждое из которых имеет индивидуальную историю. Определение калия проводилось в каждом поле в 30 точках опробования, расположенных в 40 м друг от друга, что позволило оценить влияние на него природных и антропогенных условий. Рассчитывались коэффициенты корреляции и регрессионные модели зависимости потерь калия от совокупности антропогенных факторов в различных микроландшафтах.

Результаты. Установлено, что характер миграции калия зависит от времени, особенностей природных условий поля и истории его использования. В режиме экстенсивного выращивания культур его содержание в почвах существенно снижается. В пределах агроландшафта влияние на пространственную динамику потерь оказывает пестрота природных условий, тогда как характер истории полей сказывается на миграционных потоках только в отдельных его частях. Особенности агроландшафта, интенсифицирующие потери калия, — легкий гранулометрический состав и господство элювиальных процессов. В транзитных и аккумулятивных геокомплексах потери калия ниже. На основе полученных закономерностей возможна разработка мероприятий по адаптивному размещению угодий и посевов, позволяющая минимизировать потери калия.

Ключевые слова: агроландшафт, обменный калий, история полей, мониторинг, статистический анализ

Для цитирования: Иванов Д.А., Рублюк М.В., Карасева О.В. Некоторые особенности миграции калия в агроландшафте. *Аграрная наука*. 2023; 372(7): 74–79. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-74-79>

© Иванов Д.А., Рублюк М.В., Карасева О.В.

Some Features of Potassium Migration in the Agro-Landscape

ABSTRACT

Relevance. The problem of the influence of land use methods on the loss of potassium by soils, one of the main elements in the triad of plant nutrition, is considered.

Methods. The studies were carried out in 1996–2020 on the basis of monitoring the potassium content in the soils of the Gubino VNIIMZ agro-polygon located within the limits of a finite moraine hill. The monitoring was carried out on an agro-ecological transect — an industrial array that crosses the main landscape positions of the hill and consists of 10 parallel fields, each of which has an individual history. Potassium was determined in each field at 30 sampling points located 40 m apart, which made it possible to assess the impact of natural and anthropogenic conditions on it. Correlation coefficients and regression models of the dependence of potassium losses on the totality of anthropogenic factors in various microlandscapes were calculated.

Results. It is established that the nature of potassium migration depends on time, the characteristics of the natural conditions of the field and the history of its use. In the mode of extensive cultivation of crops, its content in soils is significantly reduced. Within the agricultural landscape, the spatial dynamics of losses is influenced by the diversity of natural conditions, while the nature of the history of fields affects migration flows only in certain parts of it. The features of the agricultural landscape that intensify potassium losses are a light granulometric composition and the dominance of eluvial processes. In transit and accumulative geocomplexes, potassium losses are lower. Based on the regularities obtained, it is possible to develop measures for the adaptive placement of land and crops, which makes it possible to minimize the loss of potassium.

Key words: agrolandscape, exchangeable potassium, history of fields, monitoring, statistical analysis

For citation: Ivanov D.A., Rublyuk M.V., Karaseva O.V. Some features of potassium migration in the agro-landscape. *Agrarian science*. 2023; 372(7): 74–79 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-372-7-74-79>

© Ivanov D.A., Rublyuk M.V., Karaseva O.V.

Введение/Introduction

Калий принадлежит к числу элементов, необходимых человеку, животным, растениям и микроорганизмам. В растительных организмах калий оказывает влияние на такие процессы, как поглощение питательных веществ и воды, синтез углеводов и белков, фотосинтез. Оптимальное питание сельскохозяйственных культур калием положительно влияет на их здоровье, предупреждает или снижает поражение грибковыми и бактериальными заболеваниями, растения лучше удерживают воду, легче переносят кратковременные засухи. При этом в их тканях происходит интенсивное накопление углеводов, способствующее повышению качества урожая: увеличивается содержание крахмала в картофеле, прочность волокна льна. Одновременно повышается и устойчивость культур к слабым заморозкам. Когда содержание калия в растениях уменьшается в три-пять раз (по сравнению с нормальным), проявляются внешние признаки калийного голодания — сначала в пожелтении, а затем и в побурении краев листьев, что приводит к потере урожая и снижению качества продукции. Востребованность этого элемента у растений и микроорганизмов оказывает существенное влияние на его миграцию в ландшафте. В земной коре калий содержится в существенных количествах (больших, чем фосфор и азот вместе взятые). Кларк (доля от массы литосферы) калия такой же, как у натрия — 2,5%, но он значительно биофильнее, а потому дефицитнее. В золе многих растений содержание калия более 10%, им богаты картофель, подсолнечник, лен, клевер, тимopheевка, гречиха, зернобобовые. Вынос калия с нетоварной частью урожая обычно больше, чем с товарной. Наиболее богаты по содержанию элемента тяжелые по гранулометрическому составу черноземы, темно- и светло-каштановые почвы. В глинистых и суглинистых почвах содержание общего калия колеблется в пределах 2–3% от массы почвы, в песчаных и супесчаных почвах его содержится меньше. Минимальными его количествами (0,03–0,15%) отличаются торфяные почвы [1, 2].

Различные сельскохозяйственные культуры поглощают неодинаковое количество калия, но, как правило, значительно больше, чем фосфора, и несколько меньше, чем азота. Калий своим присутствием в почвенном растворе способствует активизации механизма синергизма при поглощении ряда ионов, как и антагонизма отдельных катионов. В присутствии калия скорость поглощения растениями кальция и магния уменьшается в два раза [3].

Калий прежде всего входит в состав минералов, находящихся в тонкодисперсном состоянии, как правило, в виде глин. Большая часть содержащегося в почвах калия приходится на нерастворимые и малоусвояемые растениями соединения. По мнению В.Н. Якименко, разделение форм калия на калий водорастворимый (почвенного раствора) и калий почвенно-поглощающего комплекса довольно условное, так как между двумя этими фазами происходит непрерывное взаимодействие [4]. Связанный с гумусом калий органической части почвы (в силу очень небольших величин) имеет в основном теоретическое значение [5]. Значительную роль в мобилизации калия играют микроорганизмы [6].

По мере увеличения подвижности калия происходит усиление его механической подвижности в связи с эрозией почвы. По средним многолетним данным, с выносным мелкоземом ежегодно теряется 68,5 кг/га обменного калия. На подвижность и интенсивность поглощения его различных форм существенное влияние

оказывает влажность почвы. Резкий дефицит этого элемента в большинстве агроландшафтов вызвал необходимость применения калийных удобрений. Отмечено, что даже чернозем без внесения калийных удобрений характеризуется низкой обеспеченностью этим элементом. Огромные количества калия стали извлекаться из недр и рассеиваться в виде удобрений, мигрируя на сотни и тысячи километров. Однако, в отличие от азота и фосфора, калий сосредоточивается, как правило, в нетоварной части урожая, что способствует возврату его в почву с навозом и отходами растениеводческой продукции [7].

По своей химической природе калий является активным водным мигрантом, однако интенсивное поглощение живым веществом способствует концентрации его на биогеохимических барьерах, что является одним из механизмов его удержания в зоне гипергенеза.

В настоящее время интенсивно развивается ландшафтная геохимия, позволяющая изучить и оптимизировать потоки калия в биосфере [8–10]. Ландшафтная агрохимия, как наука, делает первые шаги, однако на ее основе в будущем могут быть разработаны мероприятия по экологической и экономической оптимизации применения калия в растениеводстве [11–13].

Важнейшими вопросами ландшафтной агрохимии являются выявление миграционных путей элементов питания растений в сельскохозяйственных ландшафтах и нахождение методов управления процессами их трансформации агротехническими и адаптационными приемами для оптимизации продукционного процесса культур и повышения экологической устойчивости агрогеосистем. Немалый интерес представляет проблема выявления характера влияния способов использования природных комплексов на потери калия из пахотного горизонта почв [14, 15].

Цель работы — описание влияния природных и агротехнологических особенностей в различных частях агроландшафта конечно-моренной гряды на характер миграционных потоков калия.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Основным методом исследования миграционных потоков калия в агроландшафте был долговременный (1996–2020 гг.) мониторинг его содержания в пахотных горизонтах почв объекта исследований (агрополигона Губино ВНИИМЗ), расположенного в 4 км к востоку от Твери (Россия). Агрополигон Губино размещен в пределах конечно-моренного холма московского возраста с относительной высотой 15 м. Холм состоит из следующих геоморфологических элементов: двух междолинных депрессий (северной и южной), двух пологих склонов (северного — крутизной два-три градуса и южного — крутизной три-пять градусов) и плоской слабодренированной вершины. Почвообразующие породы на агрополигоне — двучленные отложения разной мощности. Южная часть полигона (депрессия, склон и южная часть вершины) сложена мощными и среднесильными двучленами, образованными поверхностным горизонтом песчаных и супесчаных флювиогляциальных отложений толщиной 1–1,5 м, подстилаемых легко- и среднесуглинистой завалуненной карбонатной мореной. В северной части полигона господствуют маломощные двучлены, в которых глубина залегания морены ≈ 0,6 м. В междолинной депрессии на севере полигона морена местами выходит на поверхность. Почвенный покров агрополигона — пестрый, представлен вариацией-

мозаикой дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв. Почвы на мощных двучленах, как правило, характеризуются более легким (песчано-супесчаным) гранулометрическим составом, чем в местах с близким к поверхности залеганием морены, где они супесчано-легкосуглинистые.

Ландшафтное картирование урочища конечно-моренной гряды, в пределах которого расположен агрополигон Губино, показало наличие в нем подурочищ нескольких типов: а) транзитно-аккумулятивных (Т-А) местоположений в пределах межхолмных депрессий, где наряду с процессами транзита химических элементов наблюдается их частичная аккумуляция из грунтовых и намывных вод; б) транзитов (Т) в пределах центральных частей склонов, характеризующихся энергичным латеральным перемещением веществ с поверхностным и внутрипочвенным стоком; в) элювиально-транзитных (Э-Т) подурочищ верхних частей склонов, в которых на фоне латерального тока веществ наблюдается их вертикальное перемещение вниз по почвенному профилю; г) элювиально-аккумулятивного (Э-А) природного комплекса плоской вершины, в условиях которого происходит не только интенсивное вымывание питательных веществ из пахотных горизонтов в иллювиальные слои и далее в грунтовые воды, но и их локальное накопление в микропонижениях.

Следует отметить, что несмотря на типологическую близость геохимического статуса микроландшафтов, каждый из них весьма индивидуален. Так, межхолмные депрессии различаются по гранулометрическому составу почв и близостью к местному базису эрозии, транзиты на разных склонах различаются степенью проявления эрозионных процессов вследствие дифференциации по физическим параметрам почв и крутизне и т. д. Всё это определяет особенности миграции калия в каждом из выделов.

В 1996 году на площади 52 га был проведен уравнительный посев ячменя (*Hordeum*) сорта Гонор, в пределах которого был выполнен первый тур агрохимического обследования почв по сетке 40 x 40 м. В 1997 году на участке уравнительного посева был проложен физико-географический профиль-трансекта — узкий, длинный севооборотный массив, пересекающий все основные микроландшафтные позиции конечно-моренного холма. Вначале трансекта состояла из 7 продольных параллельных полос (со временем их количество возросло до 10), каждая из которых соответствовала конкретной культуре плодосменного севооборота. Ширина полосы — 7,2 м, длина — 1300 м. В пределах полосы все антропогенные воздействия были одинаковыми и единовременными, вследствие чего пространственная вариативность урожайности культур в наибольшей степени отражала влияние на нее природных факторов. Исследования проводились в режиме экстенсивного земледелия — удобрения при выращивании растений, кроме подкормки зерновых в дозе 100 кг/га аммиачной селитры (30 кг д. в. азота), не применялись.

За четверть века каждое поле вследствие экономических, технологических и научно-исследовательских причин приобрело индивидуальные черты по степени специализации и антропогенного воздействия. На основе этого возникла возможность изучить влияние антропогенных и природных условий на динамику потерь

Таблица 1. Производственные характеристики полей в пределах трансекты

Table 1. Production characteristics of fields within transects

№ поля	Количество лет под угодьем/культурой													
	пашня	залежь	луг	севооборот*	травы 1 г. п.	травы 2 г. п.	травы 3 г. п.	картофель	озимые	Яровые + травы	яровые	лен	Промежуточные	Однолетние травы
1	3	19	4	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	15	0	11	26	5	4	2	0	2	5	3	0	3	2
3	17	0	9	26	4	3	2	0	3	4	7	1	2	0
4	15	0	11	26	4	4	3	0	2	5	4	1	1	1
5	15	0	11	26	4	4	3	0	1	4	4	2	1	1
6	16	0	10	26	4	3	3	2	1	4	5	2	2	0
7	17	0	9	26	3	3	3	1	2	3	7	2	1	0
8	14	0	12	26	4	4	4	0	1	4	5	1	2	0
9	9	17	0	9	0	0	0	0	1	0	1	0	4	1
10	7	16	3	10	1	1	1	0	1	2	1	0	3	0

Примечание: * в севооборот включен уравнительный посев 1996 года

элементов питания растений при экстенсивном выращивании культур.

Изучение состояния почв (обменный калий по ГОСТ Р 54650-2011)¹ проводилось в 30 точках опробования, регулярно расположенных по каждому полю на расстоянии 40 м друг от друга. На полях постоянно проводилось агрохимическое обследование почв, что позволяет судить о процессе трансформации их плодородия.

В работе использованы показатели потерь калия, определенные как разница между значениями его содержания в почвах в 1996 г. и 2020-м.

Статистическая обработка данных мониторинга осуществлялась с помощью пакетов программ STATGRAPHICS Centurion XVI.II. (Statgraphics Technologies, Inc., США), 2019 и Excel-2019 (Microsoft, США). Степень влияния ландшафтных факторов на потери калия числилась на основе метода Н.А. Плохинского² путем деления частной факториальной суммы квадратов на общую. Статистический анализ предусматривал расчет среднего значения признака ($\bar{X}$) и его стандартной ошибки (S_x). Значимость различий была установлена на уровне $p < 0,05$. STATGRAPHICS.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Изучение истории полей на трансекте показало, что за четверть века они приобрели индивидуальные черты (табл. 1).

Поля в пределах трансекты существенно различаются по степени и характеру антропогенного воздействия. Так, поля 1, 9 и 10, включенные в трансекту позднее, находились гораздо меньше в состоянии севооборота, чем остальные, зато гораздо больше под залежью. Существенны различия между полями и по характеру чередования культур. Эти обстоятельства позволяют изучить влияние антропогенных особенностей эксплуатации полей в различных ландшафтных условиях на характер потерь калия из пахотных горизонтов почв.

В ходе агрохимического мониторинга определены уровни потерь калия из пахотных горизонтов за время наблюдения (табл. 2).

¹ ГОСТ Р 54650-2011 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.

² Плохинский Н.А. Биометрия. М.: изд-во МГУ. 1970; 342.

Таблица 2. Пространственная динамика потерь калия (мг / 100 г почвы) в пределах полей на трансекте с 1996 по 2020 г.

Table 2. Spatial dynamics of potassium losses (mg / 100 g of soil) within the fields on the transect from 1996 to 2020

№ поля	Подурочища							Среднее
	Т-Аю	Тю	Э-Тю	Э-А	Э-Тс	Тс	Т-Ас	
1	0,00	4,60	28,05	14,21	0,00	3,74	0,00	6,00
2	15,86	13,59	45,24	44,88	0,00	14,81	7,25	14,00
3	10,07	10,35	39,67	26,55	1,03	7,79	2,15	11,80
4	8,73	11,32	28,45	16,16	0,00	7,39	2,20	9,13
5	8,53	9,91	25,81	16,02	0,00	6,35	2,50	8,70
6	13,22	14,02	38,00	25,66	3,25	10,57	5,26	13,70
7	9,67	11,94	32,78	21,47	0,98	9,70	3,58	11,40
8	13,59	14,64	44,45	35,97	0,00	15,34	7,66	16,70
9	2,44	4,56	26,11	11,99	0,60	6,91	3,50	8,40
10	5,75	12,6	42,72	35,61	0,00	3,76	0,00	8,30
Среднее	8,79	10,75	35,13	24,85	0,57	8,64	3,41	10,81

Т-А — транзитно-аккумулятивные; Т — транзитные; Э-Т — элювиально-транзитные; Э-А — элювиально-аккумулятивные; малыми буквами обозначена экспозиция склона (с — северная, ю — южная)

Из таблицы 2 видно, что средние потери калия за 25 лет эксплуатации массива составили ≈ 11 мг / 100 г почвы, вследствие чего обеспеченность почв калием снизилась на несколько категорий — с повышенной (средняя по трансекте ≈ 20 мг / 100 г почвы) до слабой (≈ 9 мг / 100 г почвы). В пространстве агроландшафта значения потерь колеблются в широких пределах. Общей тенденцией является снижение потерь вниз по склонам холма. Максимальные потери зафиксированы на верхней части южного склона, что объясняется сравнительно легким гранулометрическим составом почв, в результате чего калий слабо удерживается их поглощающим комплексом, а также значительной выраженностью элювиальных процессов, вымывающих этот элемент в грунтовые воды. Гранулометрический состав вершины холма несколько тяжелее, что наряду с локальной аккумуляцией питательных веществ способствует некоторому уменьшению потерь калия. Минимальные потери калия наблюдаются в верхней части северного склона, относительно тяжелые почвы которого развиваются на маломощных двучленах, что снижает интенсивность элювиальных процессов.

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа влияния антропогенных условий на потери калия в разных микроландшафтах

Table 3. Results of correlation analysis of the influence of anthropogenic conditions on potassium losses in different microlandscapes

Угодья/культуры	Подурочища							Агроландшафт
	Т-Аю	Тю	Э-Тю	Э-А	Э-Тс	Тс	Т-Ас	
	Коэффициенты корреляции							
Пашня	0,81	0,63	0,22	0,22	0,37	0,61	0,55	0,66
Залежь	-0,86	-0,71	-0,28	-0,3	-0,26	-0,66	-0,59	-0,7
Луг	0,82	0,71	0,31	0,35	0,1	0,64	0,55	0,66
Севооборот	0,87	0,73	0,3	0,32	0,27	0,66	0,6	0,71
Травы 1 г. п.	0,88	0,72	0,4	0,44	0,16	0,67	0,58	0,68
Травы 2 г. п.	0,86	0,75	0,32	0,38	0,04	0,65	0,58	0,66
Травы 3 г. п.	0,78	0,79	0,29	0,28	0,19	0,62	0,56	0,7
Картофель	0,32	0,35	0,07	-0,03	0,92	0,2	0,24	0,32
Озимые	0,51	0,36	0,29	0,26	0,09	0,3	0,18	0,36
Яровые + травы	0,85	0,77	0,41	0,46	0,08	0,58	0,47	0,6
Яровые	0,66	0,56	0,24	0,15	0,41	0,48	0,39	0,61
Лен	0,41	0,4	-0,17	-0,22	0,52	0,19	0,19	0,31
Промежуточные	0,2	0,1	0,38	0,4	0,07	0,23	0,33	0,25
Однолетние травы	0,24	-0,03	-0,1	0,14	-0,36	0,28	0,33	0,01

Примечание: достоверны коэффициенты $\geq [0,62]$

В целом по агроландшафту разница потерь калия между полями не столь велика. Минимальные потери отмечены нами в полях № 1, 9, 10 и 5, максимальные — в полях № 8, 6, 2, 3 и 7. На основе результатов дисперсионного анализа можно сказать, что достоверное влияние на миграцию калия в агроландшафте оказывают только условия подурочищ ($HCP_{0,05} = 5,27$ мг / 100 г), они определяют около 81% пространственной вариабельности потерь.

Влияние особенностей полей на характер потерь калия, как в целом по агроландшафту, так и по подурочищам, определяли с помощью корреляционного анализа (табл. 3).

Анализ таблицы 3 показывает, что в целом по агроландшафту достоверное влияние на динамику потерь калия оказывает характер землеустройства. Наличие залежей позволяет существенно сократить потери этого элемента. Увеличение количества пахотных и сенокосных угодий способствует истощению почв. Культивирование многолетних трав разного возраста приводит к снижению запасов калия в почве.

В пределах различных подурочищ антропогенное влияние на миграцию калия существенно различается. Наиболее заметно оно в межхолмной депрессии на юге агрополигона — здесь на снижение запасов калия влияют, кроме перечисленных причин, также и возделываемые яровые зерновые культуры, особенно с подсевом многолетних трав. Транзит южного склона по характеру миграции калия существенно не отличается от депрессии, однако ее интенсивность здесь несколько слабее и чистые посеы яровых уже не оказывают негативного воздействия. Описанные явления объясняются, на наш взгляд, легким гранулометрическим составом почв, способствующим слабому удержанию калия поглощающим комплексом и сильно выраженными транзитными процессами, усиленными близостью к местному базису эрозии, приводящими к обеднению почв калием. Изменение характера антропогенного воздействия на эти ландшафты позволяет управлять миграционными потоками калия.

Особенности сельскохозяйственного использования вершины холма и верхних частей склонов, как правило, не сказываются на характере миграции калия (кроме

значительного его отчуждения с урожаем картофеля в верхней части северного склона), что можно объяснить господством элювиальных процессов, на фоне которых антропогенное влияние не столь заметно.

Снижение напряженности вертикального промывания почв и усиление транзитных процессов в пределах северного склона приводят к тому, что на характер потерь калия заметно влияют залежи и луга, степень вовлеченности территории в севооборот и доля в структуре посевных клеверотимфеочных травостоев. В межхолмной депрессии на севере агрополигона влияние антропогенных факторов на особенности формирования потерь калия недостаточно, что можно объяснить затуханием транзитных процессов и аккумуляцией калия из намывных вод.

Более полную картину влияния антропогенного фактора на миграцию калия в различных ландшафтных условиях дает регрессионный анализ, позволяющий определить совокупное воздействие нескольких предикторов на изучаемое явление. Все предикторы, указанные в таблице 1, невозможно рассмотреть в одной модели, так как их количество не должно превышать число дат (в данном случае количество полей).

В работе рассчитаны два вида моделей — модели влияния характера организации угодий на потери калия и модели влияния культур на миграцию этого элемента.

В целом по агроландшафту 50% пространственной вариативности потерь калия определяется долей севооборота в пространстве. Зависимость прямо пропорциональная. То же самое можно сказать и о транзите северного склона, где доля севооборотов в ландшафте определяет 43,6% изменчивости потерь. Регрессионный анализ позволил выявить элементы землеустройства, препятствующие потерям калия, — это залежи. В нижней и средней частях склона южной экспозиции они определяют от 74,1 до 50,3% пространственной вариативности потерь этого элемента.

Результаты второй модели представлены на рисунке 1. В целом по агроландшафту конечно-моренного холма увеличение потерь калия из пахотных горизонтов почв происходит при расширении посевов клеверотимофеечных трав 2 г. п., картофеля, яровых зерновых и промежуточных культур. Лен и в какой-то степени яровые с подсевом трав способствуют снижению потерь этого элемента. Старые клеверотимофеечные травостои являются важной причиной деградации калийного состояния почв в нижних и средних частях южного склона холма.

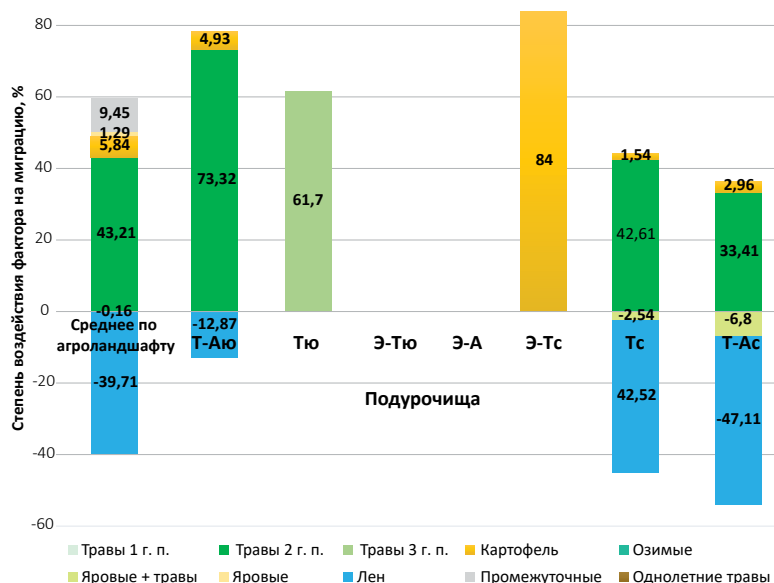
В южной депрессии отрицательную роль играет также и картофель, однако расширение посевов льна способно уменьшить потери калия в этом месте. На верхних гипсометрических отметках агроландшафта не обнаружено антропогенных факторов, влияющих на миграцию калия, кроме поглощения этого элемента картофелем в верхней части северного склона. В средней и нижней частях северного склона сложился набор культур, влияющих на миграцию калия — травы 2 г. п. и картофель способствуют потерям калия, а лен и посевы яровых с травами замедляют эти процессы.

Выводы/Conclusion

В ходе исследований установлено, что характер миграции калия в агроландшафте зависит от времени, особенностей природных условий поля и его истории. Выявлено, что в режиме экстенсивного выращивания

Рис. 1. Влияние культур на потери калия в почвах агроландшафта конечно-моренной гряды и различных его частей

Fig. 1. Influence of crops on the loss of potassium in the soils of the agrolandscape of the terminal moraine ridge and its various parts



культур при изъятии прямых и побочных продуктов растениеводства содержание калия в почвах существенно снижается — поле может перейти из разряда повышенной обеспеченности калием в разряд слабой обеспеченности. Следовательно, внесение калийных удобрений — необходимое агротехническое мероприятие для поддержания плодородия почв.

В пределах всего агроландшафта (урочища) достоверное влияние на пространственную динамику потерь калия оказывает пестрота почвенно-ландшафтных условий, тогда как характер истории полей сказывается на миграционных потоках только в пределах подурочищ.

К особенностям агроландшафта, интенсифицирующих потери калия почвами, относятся легкий гранулометрический состав и господство элювиальных процессов, а в геокомплексах с преобладанием транзитных и аккумулятивных процессов потери калия заметны ниже. Так, на вершине холма и в верхних частях склонов ежегодные потери калия составили 0,78 мг / 100 г почвы, а на средних и нижних — только 0,3 мг / 100 г почвы (на юге агрополигона — 0,38 мг / 100 г почвы, на севере — 0,23 мг / 100 г почвы).

Особенности истории полей заметным образом сказываются на миграционных потоках калия только в транзитных и транзитно-аккумулятивных ландшафтах, где их можно регулировать подбором культур и размещением залежей поперек склона. В элювиальных местоположениях (вершина и верхние части склонов) уменьшение потерь калия может быть осуществлено только с помощью земельных мелиораций на основе глинования и известкования почв и применения цеолитов.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Материалы подготовлены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федерального исследовательского центра «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (ВНИИМЗ) (№ 0439-2022-0017).

FUNDING:

The materials were prepared with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the State assignment of the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands — branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute" (VNIIMZ) (No. 0439-2022-0017).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукин С.В., Васенев И.И., Цыгункин А.С. Агроэкологическая оценка многолетней динамики содержания обменного калия в черноземах западной части ЦЧО. *Достижения науки и техники АПК*. 2010; (8): 42–46. <https://elibrary.ru/mupijp>
2. Козлова О.Н., Соколова Т.А., Носов В.В., Балдина В.В. О содержании калия в различных вытяжках из черноземов и дерново-подзолистых почв разного гранулометрического и минералогического состава. *Агрохимия*. 2003; (10): 13–21. <https://elibrary.ru/ontket>
3. Середина В.П. Калий и почвообразование. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет. 2012; 354. ISBN 978-5-7511-2119-8 <https://elibrary.ru/fjcpqn>
4. Якименко В.Н. Формы калия в почве и методы их определения. *Почвы и окружающая среда*. 2018; 1(1): 25–31. <https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.5>
5. Якименко В.Н., Бойко В.С. Диагностика калийного состояния почв лесостепи западной Сибири. *Почвы и окружающая среда*. 2019; 2(2): 74. <https://doi.org/10.31251/pos.v2i2.74>
6. Rawat J., Sanwal P., Saxena J. Potassium and Its Role in Sustainable Agriculture. Meena V., Maurya B., Verma J., Meena R. (eds.). Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. New Delhi: Springer. 2016; 235–253. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_17
7. Осипова Д.Н., Иванова С.Е., Соколова Т.А. Калийное состояние и минералогический состав илистой фракции обыкновенных черноземов при внесении разных доз калийных удобрений. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2016; (2): 11–17. <https://elibrary.ru/vpelun>
8. Смыкович Л.И., Оношко М.П. Геохимия распространенности калия и натрия в барьерной геосистеме. *Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География*. 2015; (3): 59–63. <https://elibrary.ru/vdjxsf>
9. Оношко М.П., Глаз А.С., Смыкович Л.И., Моисеенко В.Ф. Геохимическая оценка покровных отложений в районе размещения Белорусской АЭС. *Литасфера*. 2018; (1): 105–120. <https://elibrary.ru/vacgti>
10. Нечаева Т.В., Гопп Н.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В. Калийное состояние почв склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири. *Земледелие*. 2019; (1): 10–14. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10103>
11. Кодочилова Н.А., Комиссарова В.С. Закономерности изменения калийного состояния светло-серых лесных почв на фоне длительного применения средств химизации. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019; (1): 45–51. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2019-1-45-51>
12. Барановский И.Н., Ковалев Н.Г., Иванов Д.А., Рублюк М.В. Баланс элементов питания в разных фациях конечно-моренного холма при выращивании картофеля. *Агрохимия*. 2006; (4): 51–56. <https://elibrary.ru/htnхon>
13. Полоус В.С., Степанов С.П., Прокопова Л.О., Осауленко С.Н. Возможности стабилизации биологической активности почвы при использовании органических, минеральных удобрений, микроорганизмов и ресурсосберегающих обработок. *Успехи современного естествознания*. 2023; (1): 13–19. <https://doi.org/10.17513/use.37978>
14. Бойко В.С., Якименко В.Н., Тимохин А.Ю. Изменение калийного состояния почв лесостепи Западной Сибири при длительном сельскохозяйственном использовании. *Экология и промышленность России*. 2019; 23(11): 66–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-66-71>
15. Goulding K. et al. Outputs: Potassium Losses from Agricultural Systems. Murrell T.S., Mikkelsen R.L., Sulewski G., Norton R., Thompson M.L. (eds.). Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops. Cham: Springer. 2021; 75–97. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_3

ОБ АВТОРАХ:

Дмитрий Анатольевич Иванов,
доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий отделом мониторинга состояния и использования осушаемых земель, Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, Москва, 119017, Россия
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>

Мария Владимировна Рублюк,
кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела мониторинга состояния и использования осушаемых земель, Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, Москва, 119017, Россия
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5319-2614>

Ольга Васильевна Карасева,
кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела мониторинга состояния и использования осушаемых земель, Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, Москва, 119017, Россия
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8377-6386>

REFERENCES

1. Lukin S.V., Vasenev I.I., Cigutkin A.S. Agroecological evaluation of exchangeable potassium long-term dynamics in chernozems at the Western part of Central Chernozemic region of Russia. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2010; (8): 42–46 (In Russian). <https://elibrary.ru/mupijp>
2. Kozlova O.N., Sokolova T.A., Nosov V.V., Baldina V.V. The content of potassium in different extracts from chernozems and soddy-podzolic soils with different particle-size and mineralogical compositions. *Agricultural Chemistry*. 2003; (10): 13–21 (In Russian). <https://elibrary.ru/ontket>
3. Seredina V.P. Potassium and soil formation. Tomsk: Tomsk State University. 2012; 354 (In Russian). ISBN 978-5-7511-2119-8 <https://elibrary.ru/fjcpqn>
4. Yakimenko V.N. Potassium forms in soil and methods of determination. *The Journal of Soils and Environment*. 2018; 1(1): 25–31 (In Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v1i1.5>
5. Yakimenko V.N., Boyko V.S. Diagnostics of soil potassium status in the forest-steppe of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2019; 2(2): 74 (In Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v2i2.74>
6. Rawat J., Sanwal P., Saxena J. Potassium and Its Role in Sustainable Agriculture. Meena V., Maurya B., Verma J., Meena R. (eds.). Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. New Delhi: Springer. 2016; 235–253. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_17
7. Osipova D.N., Ivanova S.E., Sokolova T.A. Potassium status and clay mineralogy in chernozems treated with various doses of potassium fertilizers. *Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2016; (2): 11–17 (In Russian). <https://elibrary.ru/vpelun>
8. Smykovich L.I., Onoshko M.P. Geochemistry prevalence of potassium and sodium in barrier geosystem. *Vestnik BGU. Seriya 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2015; (3): 59–63 (In Russian). <https://elibrary.ru/vdjxsf>
9. Onoshko M., Glas A., Smykovich L., Moiseenko V. Geochemical estimation of cover deposits for the territory in the area of location of the Belarusian Nuclear Power Plant. *Litasfera*. 2018; (1): 105–120 (In Russian). <https://elibrary.ru/vacgti>
10. Nechaeva T.V., Gopp N.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V. Potassium status of the slope agricultural landscape in the South-East of Western Siberia. *Zemledelie*. 2019; (1): 10–14 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10103>
11. Kodochilova N.A., Komissarova V.S. Principles of potassium state change of light gray forest soil in case of long term application of chemicals. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2019; (1): 45–51 (In Russian). <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2019-1-45-51>
12. Baranovsky I.N., Kovalev N.G., Ivanov D.A., Rublyuk M.V. Balance of nutrients in different facies of a morainic hill under potato growing. *Agricultural Chemistry*. 2006; (4): 51–56 (In Russian). <https://elibrary.ru/htnхon>
13. Polous V.S., Stepanov S.P., Prokopova L.O., Osaulenko S.N. The possibilities of stabilizing the biological activity of the soil with the use of organic, mineral fertilizers, microorganisms and resource-saving treatments. *Advances in current natural sciences*. 2023; (1): 13–19. <https://doi.org/10.17513/use.37978>
14. Boiko V.S., Yakimenko V.N., Timokhin A.Yu. The change in potassium status of soils of forest-steppe of Western Siberia in long-term agricultural use. *Ecology and Industry of Russia*. 2019; 23(11): 66–71 (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-66-71>
15. Goulding K. et al. Outputs: Potassium Losses from Agricultural Systems. Murrell T.S., Mikkelsen R.L., Sulewski G., Norton R., Thompson M.L. (eds.). Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops. Cham: Springer. 2021; 75–97. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_3

ABOUT THE AUTHORS:

Dmitry Anatolyevich Ivanov,
Doctor of Agricultural Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Department for Monitoring the Condition and Use of Drained Lands, Federal Research Center «V.V. Dokuchaev Soil Institute», 7 building 2 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russia
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>

Maria Vladimirovna Rublyuk,
Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher of the Department for Monitoring the Condition and Use of Drained Lands, Federal Research Center «V.V. Dokuchaev Soil Institute», 7 building 2 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russia
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5319-2614>

Olga Vasilievna Karaseva,
Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher of the Department for Monitoring the Condition and Use of Drained Lands, Federal Research Center «V.V. Dokuchaev Soil Institute», 7 building 2 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russia
2016vniimz-noo@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8377-6386>