

БИОГЕОХИМИЯ НИКЕЛЯ ПРИ ОРОШЕНИИ

кандидат биологических наук, доцент **Т.Н. Крамарева**¹

кандидат биологических наук, доцент **Н.С. Горбунова**²

кандидат биологических наук, доцент **А.И. Громовик**²

кандидат биологических наук, доцент **Е.В. Куликова**³

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Геохимической особенностью района исследования является обогащенность почвообразующих и подстилающих пород Ni и, как следствие, высокое содержание металла в грунтовых водах и поверхностных источниках, вода которых используется для орошения. Регулярное поступление элемента с поливными водами приводит к увеличению валового содержания Ni и его обменных соединений в верхних гумусовых горизонтах изучаемых черноземов выщелоченных. Орошение способствует накоплению Ni в зерне и фитомассе растениеводческой продукции. Показано, что длительное орошение приводит к трансформации органического вещества, изменению pH почвенного раствора и значений гидролитической кислотности.

Ключевые слова: геохимия, биогеохимия, никель, валовое содержание, обменные соединения, орошение, черноземы выщелоченные

NICKEL BIOGEOCHEMISTRY IN IRRIGATION

PhD (Biology), Associate Professor **T.N. Kramareva**¹

PhD (Biology), Associate Professor **N.S. Gorbunova**²

PhD (Biology), Associate Professor **A.I. Gromovik**²

PhD (Biology), Associate Professor **E.V. Kulikova**³

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Voronezh State University", Voronezh, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Geochemical feature of the study area is the enrichment of parent and underlying species with nickel, and, as a consequence, the high metal content in the groundwater and surface sources, the water of which is used for irrigation. Regular supply of the element with irrigation water leads to an increase in the total nickel content and its exchange compounds in the upper humus horizons of the studied leached black soils. Irrigation contributes to the nickel accumulation in grain and phytomass of crop production. It is shown that long-term irrigation leads to the transformation of organic matter, change in the pH of the soil solution and values of hydrolytic acidity.

Keywords: geochemistry, biogeochemistry, nickel, gross content, exchangeable compounds, irrigation, leached chernozem

Введение

Вопросам геохимического и биогеохимического поведения тяжелых металлов (ТМ), в том числе Ni, в почвах уделено достаточно внимания. Так, на заре становления геохимии как науки А.П. Виноградовым были установлены кларки данного элемента в литосфере и в почвах, в том числе и в черноземах [3]. Полученные ранее значения постоянно уточняются и обновляются другими исследователями [9, 18]. Геохимической особенностью Ni является то, что он входит в состав кристаллических решеток силикатов, карбонатов, оксидов, сульфидов, арсенидов. Процесс выветривания сопровождается сорбцией Ni органическим веществом, глинами, оксидами Fe и Mn [9]. Кларки Ni в литосфере и почвах составляют 20 и 29 мг/кг соответственно [18].

В исследуемых лесостепных ландшафтах Ni является малоподвижным элементом, слабо мигрирующим по почвенному профилю. Такая особенность поведения определяется физико-химическим строением ядра атома металла. Атом Ni представлен следующей электронной конфигурацией: $3d^8 4s^2$, заполненность внешней орбитали определяет его малую активность как химического элемента. Но, вместе с тем, Ni активно сорбируется гуминовыми кислотами органического вещества почв черноземного ряда. В сорбционном процессе металлов (в том числе Ni) гумусом участвуют карбоксильные и фенольные группы, которые входят в состав органического вещества. Процесс осуществляется с помощью замещения водородного катиона никелем. В результате образуются хелаты, в молекуле которых Ni расположен в анионной части органического вещества. Определяющую роль в соединении оказывают координационные связи, в последствии Ni утрачивает способность проявлять свои «катионные свойства». В целом такое расположение элемента в молекуле делает металл неактивным. Как поливалентный элемент, Ni взаимодействует с гуминовыми кислотами (которыми богаты почвы черноземного ряда) с образованием комплексных гетерополярных солей [10]. Отмечается и «обратное» взаимодействие: так, по данным Ю.Н. Водяницкого [4], при увеличении содержания Ni в черноземах более чем 40 мг/кг происходит уменьшение содержания гумуса. Другие авторы отмечают накопление Ni в иллювиальном карбо-

натном горизонте черноземов [9]. Но, скорее всего, такое происходит в результате накопления Ni в илистой фракции, обогащенной минералами типа монтмориллонита, а не карбонатами. С точки зрения химической активности и электронной конфигурации атомов металл не способен вступать в обменные реакции с карбонатом кальция, зато интенсивно сорбируется глинистыми минералами.

Ni – достаточно распространенный элемент как земной коры, так и различных компонентов биосферы. Обычно количество Ni в растениях не превышает десятки мг/кг, но существуют растения-эндемики, которые накапливают металл в своих органах и тканях [1]. В литературе нет единого мнения, относить Ni к биоэлементам или токсикантам. Так, по данным ряда авторов [1, 16, 17], относительно низкое содержание Ni вызывает хлорозы и некрозы растительных организмов. Металл участвует в активации целого ряда ферментов. Например, входит в состав уреазы, которая катализирует превращение мочевины в аммиак, тем самым предотвращая ее накопление до токсичных концентраций. Но, в то же время, Ni при избыточных концентрациях является фитотоксичным элементом. При высоком содержании Ni также отмечаются поражения листового аппарата некротического и хлоротического происхождения. Повышенное (до критических уровней) содержание металла диагностируется в морфологических изменениях растений. Так, наблюдается отрицательный геотропизм листьев, поскольку происходит нарушение водного баланса растений. При избыточном содержании Ni в растительных организмах на уровне клеток отмечается сбой митоза и цитокинеза, нарушение в работе ядра и ДНК.

Исследователями получены многочисленные и весьма противоречивые данные по количественному содержанию металла в растительных организмах. Разброс значений составляет от 0,1 [7] до 8,1 мг/кг [15]. Такой широкий диапазон связан с геохимическими особенностями районов исследований. Известно, что растения способны адаптироваться к внешним факторам, накапливая одни элементы и испытывая дефицит в других. Очень часто растительные организмы являются биоиндикаторами окружающей среды и общего геохимического фона.

Все вышесказанное подчеркивает важность цели исследования, но большинство работ посвящено биогеохимическим особенностям поведения Ni в почвах естественных ценозов или вовлеченных в сельскохозяйственное производство, но без применения мелиоративных приемов. А в настоящее время получение высоких урожаев невозможно без регулярных мелиораций, и в первую очередь без орошения, поскольку орошение очень часто выступает лимитирующим фактором почвенного плодородия. Но вместе с тем, орошение способствует трансформации не только почвенных свойств, но и всего почвенного покрова, чаще всего в сторону его деградации [2, 14]. Кроме того, крайне мало освещено в литературе влияние орошения на миграционную способность ТМ, в том числе Ni в почвенном профиле, в ландшафтах и в растительных организмах. Учитывая описанные биогеохимические особенности и характеристики исследуемого элемента, важно регулярно проводить комплексные мониторинговые исследования черноземов, особенно если они интенсивно используются в сельском хозяйстве, подвергаясь мелиоративным мероприятиям, что и послужило целью данного исследования.

Объекты и методы исследования

С целью изучения влияния орошения на особенности накопления и трансформации Ni в почвенном профиле черноземов было исследовано хозяйство ООО «Тербуны-Агро» (Хлевенский район, Липецкая область). На территории хозяйства доминирующим почвенным типом являются черноземы выщелоченные среднemosные мало- и среднегумусные тяжелосуглинистые. Почвообразующей породой послужили покровные карбонатные тяжелые суглинки и глины. Исследовались пахотные угодья (поля с применением орошения и без оросительных мелиораций). В качестве «фоновой» почвы изучались территории залежного участка, расположенного в непосредственной близости от района исследования.

Закладка почвенных разрезов осуществлялась на указанных участках до глубины залегания почвообразующей породы. Почвенные образцы отбирались послойно через каждые 10 см (0-10, 20-30 ... 140-150 см). В почвенных образцах

по общепринятым методикам [13] определялись рН водной суспензии, гидролитическая кислотность H^+ , содержание гумуса. Выбранные показатели определяют био- и геохимические закономерности поведения большинства ТМ, в том числе и Ni. Для определения валового содержания Ni проводили спекание почвы с карбонатом натрия, дальнейшей обработкой HNO_3 (1:1) и H_2O_2 (конц.). Для извлечения обменных соединений металла из почвы образцы обрабатывали ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с рН = 4,8 в соотношении 1:10. Для получения количественного содержания Ni в растениях исследовались зерно и фитомасса кукурузы (*Zea mays* L.). Зерно и фитомасса предварительно озолялись, далее золу растворяли в HNO_3 (1:1). Конечное определение металла в растительных, почвенных образцах и пробах воды, используемой для орошения, проводилось атомно-абсорбционным методом на спектрометре КВАНТ-Z.ЭТА, чувствительность определения 0,01 мкг/л, точность измерения 4 % [11]. Чтобы оценить пригодность воды для орошения, были определены ее ионный состав и общая минерализация. Определялись сульфат-, хлорид-, карбонат-анионы и катионы кальция, магния и натрия. Исходя из их соотношения, присваивался тип минерализации. Вариационно-статистическая обработка проводилась с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Орошение сельскохозяйственных угодий на территории хозяйства осуществляется установками «ФРЕГАТ», поливная вода поступает из местных прудов. Данные по катионно-анионному составу поливной воды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ионный состав поливной воды в мг-экв/л (n = 5),
собственные вычисления авторов

Анионы	HCO_3^-	Cl	SO_4^{2-}
$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	3,1±0,07	0,8±0,01	0,9±0,01
Катионы,	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na⁺
$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	2,6±0,05	1,0±0,01	1,1±0,02

Примечание: n – количество образцов;
 \bar{x} – среднее арифметическое, мг-экв/л; $s_{\bar{x}}$ – ошибка среднего арифметического.

Степень минерализации составляет $0,4 \pm 0,03$ г/л, что позволяет отнести используемую для орошения воду к пресным. Данные табл. 1 свидетельствуют о гидрокарбонатно-кальциевом составе поливной воды. Никель содержится в поливной воде в количестве $0,017 \pm 0,001$ мг/л, что не превышает ПДК = $0,02$ мг/л, принятых для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [6].

Орошение представляет собой наиболее распространённое мелиоративное воздействие, которое в последнее время все чаще используется не только в аридных, но и в гумидных областях. Данный мелиоративный прием является антропогенным вмешательством, поскольку ведет не только к трансформации, но иногда и деградации почвенного покрова. В первую очередь данные изменения отражаются на морфологическом строении почвенного профиля. Происходит увеличение мощности гумусового горизонта (который составляют горизонты А + АВ) в среднем на 15 ± 2 см. Сравнение морфологии проводилось относительно черноземов выщелоченных залежного участка, а также неорошаемой пашни. Морфологический анализ проверялся результатами лабораторно-аналитических исследований. Так, валовое содержание гумуса (рис. 1) в почвах залежи и неорошаемой пашни постепенно уменьшается до глубины 30 см, далее происходит более отчетливое падение. В черноземах выщелоченных при орошении такого градиента падения не отмечается, происходит некоторое «вымывание» и перераспределение органического вещества вниз по почвенному профилю. Границы перехода между гумусовыми и нижележащими горизонтами стали постепенными и размытыми. Перераспределение органического вещества в результате орошения отмечается и в его процентном содержании. Если в черноземах выщелоченных залежи содержание гумуса достигает $7,11 \pm 0,19$ % (почва диагностируется как среднегумусная), то при распашке, в результате усиленной минерализации и безвозвратного выноса питательных элементов с урожаем сельскохозяйственных культур, количество гумуса падает до $5,90 \pm 0,12$ %. Орошение еще сильнее сокращает содержание гумуса ($5,61 \pm 0,15$ %) за счет профильного перераспределения. В итоге

интенсивное сельскохозяйственное использование черноземов выщелоченных в комплексе с оросительными мелиорациями трансформирует почвенный покров – черноземы из среднегумусных становятся малогумусными.

Заметной трансформации в результате сельскохозяйственного использования и орошения подвергаются и значения рН. Так, черноземы выщелоченные залежного участка имеют реакцию среды, близкую к нейтральной, рН составляет $6,8 \pm 0,05$ единиц. В результате распашки, а особенно при орошении, происходит подкисление почвенного раствора до $6,1 \pm 0,03$ и $5,8 \pm 0,03$ единиц соответственно. Данное явление связано с естественными процессами выщелачивания карбонатов (при полупромывном типе водного режима), которые усиливаются орошением. По профилю с глубиной происходит постепенное увеличение рН до щелочных значений (рис. 2) в результате влияния карбонатных почвообразующих пород, на которых образовались исследуемые черноземы выщелоченные. Гидролитическая кислотность зависит от рН почвенного раствора, но характеризует, прежде всего, состояние почвенно-поглощающего комплекса, а именно долю обменного водорода. Обменный водород, входя в почвенно-поглощающий комплекс, делает его менее устойчивым к внешним воздействиям, в том числе и к загрязнению тяжелыми металлами. Так, в неорошаемых черноземах выщелоченных на долю поглощенного H^+ приходится до $1,5 \pm 0,07$ смоль(экв)/кг почвы. Орошение увеличивает количество H^+ до $3,4 \pm 0,09$ смоль(экв)/кг почвы. Следует отметить, что орошение приводит к проникновению обменного H^+ в более глубокие слои почвенного профиля и отмечается даже на глубине 70-80 см.

Никель. В почвообразующих породах, на которых сформировались изучаемые черноземы, относительно литосферы происходит концентрирование элемента ($K_{к Ni} = 1,8$). Данное явление связано с особенностями геохимической провинции Центрально-Черноземного региона, в пределах которой проводились исследования [12]. По нашим данным, валовое содержание Ni в изучаемых покровных суглинках и глинах в среднем равно $35,8 \pm 0,98$ мг/кг. При этом количество обменного Ni

очень низкое – $0,61 \pm 0,05$ мг/кг. Процент подвижности элемента (от валового содержания) низкий и не превышает 2 %. Известно, что Ni в щелочной среде является малоактивным химическим элементом.

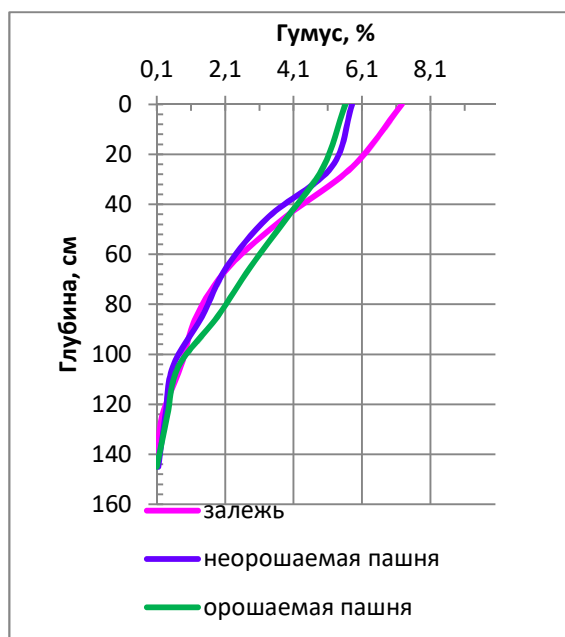


Рис. 1. Профильное распределение гумуса в исследуемых почвах (собственные вычисления авторов)

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о концентрации металла относительно литосферы ($K_k = 1,05$), поскольку содержание Ni в изучаемых почвах больше его кларка, а относительно почвообразующей породы происходит его рассеивание ($K_r = 1,18$). Коэффициент радиальной дифференциации R, представляющий собой отношение содержания химического элемента (Ni) в генетическом горизонте почвы к его содержанию в почвообразующей породе, равен 0,86. Коэффициент латеральной дифференциации L – отношение содержания элемента в почвах подчиненных ландшафтов к автономным – равен 0,98.

Как было отмечено выше, содержание Ni в поливной воде не превышает значения ПДК [6]. Но обращает на себя внимание то, что значения очень приближены к ПДК, поэтому необходимо регулярно следить за состоянием поливных вод и почвенного покрова. Повышенное содержание Ni связано с геохимическими особенностями региона исследования. Природные воды, так же как и породы, несколько обогащены исследуемым элементом.

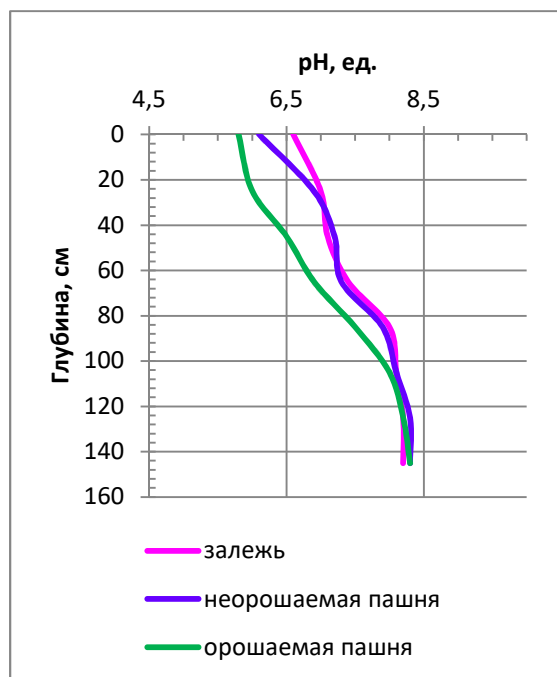


Рис. 2. Динамика pH почвенного раствора с глубиной по профилю исследуемых почв (собственные вычисления авторов)

В исследуемых черноземах выщелоченных максимальное валовое содержание Ni (рис. 3) отмечается в верхнем 0-10 см слое орошаемого участка (в среднем $34,9 \pm 1,01$ мг/кг), меньше его в черноземах залежи ($32,7 \pm 1,05$ мг/кг) и самое низкое содержание отмечено в черноземах пашни ($30 \pm 0,99$ мг/кг). Максимальное валовое содержание металла в верхних горизонтах орошаемых черноземов связано с поступлением элемента с обогащенными Ni оросительными водами. Вниз по профилю происходит постепенное снижение валового содержания Ni. Как отмечалось выше, металл активно сорбируется гумусом, образуя труднорастворимые хелатные соединения и гетерополярные соли.

Далее с различной глубиной (рис. 3) отмечается постепенный рост в валовом содержании элемента к почвообразующей породе, которая обогащена Ni. Такая динамика объясняется влиянием сельскохозяйственного использования почв. Так, орошение перераспределяет и выносит не только границу гумусового горизонта, но и илистую фракцию в более глубокие слои. Никель, в свою очередь, способен сорбироваться илистой фракцией и проникать в более глубокие горизонты почвенного профиля. Профильное распределение валового со-

держания Ni характеризуется двумя пиками накопления: первый отмечается в верхнем гумусовом горизонте за счет образования труднорастворимых комплексных соединений металла с гуминовыми кислотами органического вещества черноземов. Второй максимум наблюдается на границе залегания почвообразующих пород, геохимической особенностью которых является их обогащенность Ni. Ошибка среднего арифметического для валового содержания Ni не превышает $\pm 1,90$, что свидетельствует о достоверности полученных данных. Полученные нами данные по валовому содержанию Ni не превышают ПДК = 100 мг/кг [4, 5], принятых для почв черноземного ряда.

Что касается обменных форм элемента, то они определяются геохимической особенностью Ni, его малоподвижностью в нейтральной и слабощелочной среде [1, 12].

Однако в работах Sposito [19] отмечается, что Ni может находиться в диффузном слое, что определяет его мобильность и способность к миграции. Кроме того, эти формы соединений, как отмечалось, во многом определяются биогенным фактором, сопровождающимся биогенно-аккумулятивным накоплением вещества. Вследствие этого профильное распределение обменного Ni носит аккумулятивный характер.

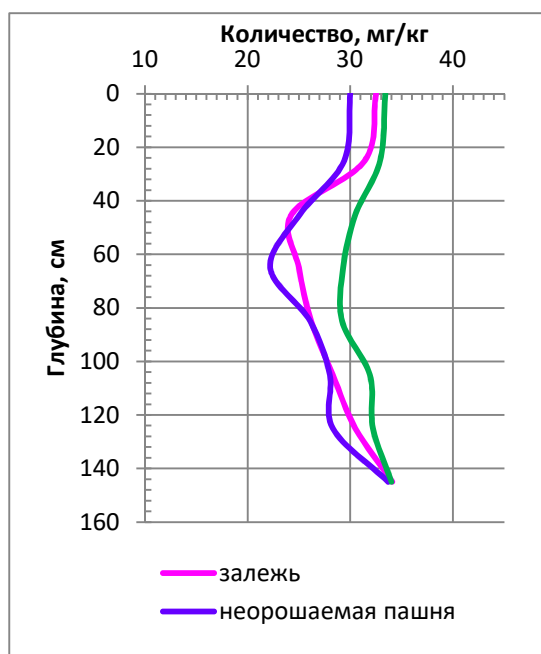


Рис. 3. Профильное распределение валового содержания Ni в исследуемых почвах (собственные вычисления авторов)

Содержание обменных соединений Ni в исследуемых черноземах выщелоченных отмечается в пределах от $1,07 \pm 0,06$ до $1,29 \pm 0,09$ мг/кг (рис. 4). Как и для валового содержания металла, его обменные формы соединений накапливаются в почвах, подверженных оросительным мероприятиям. Несколько меньше обменных соединений никеля отмечается в черноземах залежи и пашни. На рис. 4, изображающем профильное распределение обменной формы Ni, отмечается наибольшее его содержание в верхнем слое (1,3 мг/кг) и постепенное снижение с глубиной. Данное распределение можно объяснить биогенной аккумуляцией элемента. Кроме того, естественная карбонатность почвообразующих пород, их обогащенность илистой фракцией, которая активно сорбирует ТМ, способствует более прочному удержанию элемента в малоподвижном состоянии. Полученные данные свидетельствуют о невысокой степени подвижности Ni в исследуемых черноземах выщелоченных. Процент обменной формы Ni от валового содержания составляет от 1,5 до 3,6 %, а степень подвижности уменьшается с глубиной. Ошибка среднего арифметического для обменной формы Ni не превышает $\pm 0,34$.

Полученные данные свидетельствуют, что валовое содержание Ni и его обменные соединения во всех исследуемых черноземах не превышают ПДК, что говорит об отсутствии загрязнения почв данным элементом. Содержание металла в поливной воде близко к значению ПДК, и регулярный полив такой водой может провоцировать накопление элемента в почвенном покрове. Поэтому следует регулярно проводить мониторинговые исследования по содержанию Ni как в поливной воде, так и в почвенном покрове.

Низкая степень подвижности металла свидетельствует о его слабой миграции по профилю почв и в ландшафте, что снижает возможность вторичного загрязнения местности в результате применения оросительных мелиоративных мероприятий. Количество обменных соединений Ni не превышает ПДК = 4 мг/кг, принятых для черноземных почв [4, 5], что позволяет считать исследуемые черноземы выщелоченные не загрязненными Ni.

Содержание Ni в зерне кукурузы находится в пределах от 2,75 до 4,78 мг/кг и до $10 \pm 0,87$ мг/кг в наземной фитомассе. Для фитомассы наземных растений, в том числе и культурных, характерно увеличение концентрации металлов, что связано с биологическими особенностями растительных организмов. Тем самым растения выполняют барьерную функцию. Наибольшие его количества отмечаются при использовании орошения. С оросительными водами поступает дополнительное количество элемента, который далее поступает в растительные организмы. Орошение усиливает процессы, происходящие и в почвах, и в растительных организмах. Растения активно потребляют элементы минерального питания, необходимые для активного роста. Ni в данном случае также может выступать как необходимый элемент, входя в состав уреазы.

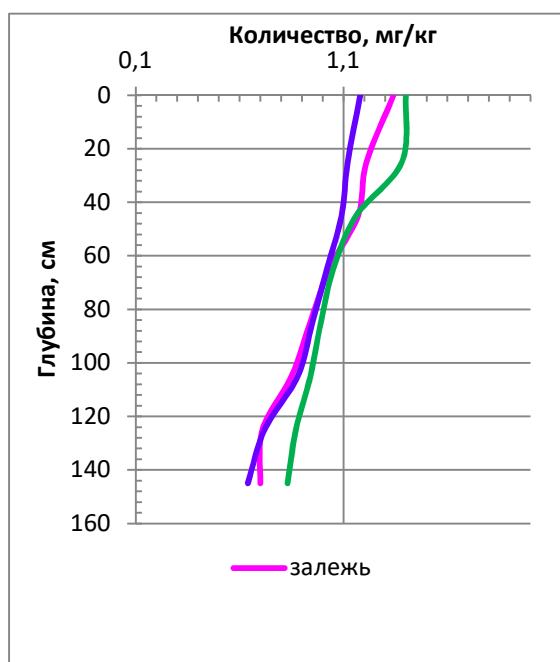


Рис. 4. Профильное распределение подвижных соединений Ni в исследуемых почвах (собственные вычисления авторов)

ПДК Ni в зерне продукции растениеводства составляет 5 мг/кг [7, 8], полученные нами данные не превышают показатель. Но следует очень внимательно следить за качеством продукции, поскольку регулярные поступления с оросительными водами на фоне повышенного геохимического содержания элемента способны приводить к накоплению металла.

Заключение

Исследования по влиянию орошения на трансформацию почвенного профиля и особенностей биогеохимического поведения никеля показали, что со временем происходит трансформация основных почвенных процессов. Длительное орошение приводит к усиленной минерализации и профильному перераспределению органического вещества. Происходит подкисление реакции среды и увеличение доли обменного водорода вследствие процессов декарбонатизации.

В геохимическом отношении исследуемые черноземы выщелоченные характеризуются как концентраторы Ni относительно литосферы, но относительно почвообразующей породы происходит его рассеивание.

За счет постоянного поступления Ni в составе оросительных вод отмечается накопление металла (как валового содержания, так и обменных соединений) в верхних горизонтах орошаемых черноземов.

Профильное распределение валового содержания Ni характеризуется двумя максимумами накопления: в верхнем органогенном горизонте, за счет образования слабо подвижных комплексных соединений металла с органическим веществом, а второй – на границе залегания почвообразующих пород, обогащенных Ni. Для обменного Ni характерно накопление его в верхней части профиля и постепенное снижение с глубиной. Степень подвижности металла невелика.

Количество Ni в зерне кукурузы, возделываемой хозяйством, находится в пределах ПДК. В фитомассе содержание Ni выше в 2 раза по сравнению с зерном, что характерно для большинства наземных растений. Растения, накапливая ТМ в своей фитомассе, выполняют барьерную функцию. Использование орошения усиливает процессы поступления и накопления не только питательных элементов в растения, но и токсикантов, в том числе и никеля.

Валовое содержание Ni и его обменных соединений во всех исследуемых почвах не превышает ПДК, установленных для почв черноземного ряда. С целью предотвращения загрязнения почвенного покрова и сопредельных сред следует про-

водить регулярные мониторинговые биогеохимические исследования по содержанию металла в поливной воде, почвенном покрове орошаемого уча-

стка, а также в сельскохозяйственных растениях, выращиваемых на данной территории.

Библиографический список

1. Никель в растениях / И. В. Андреева, В. В. Говорина, С. Б. Виноградова, Б. А. Ягодин // *Агрохимия*. – 2001. – № 3. – С. 82–94.
2. Особенности агротехники зерновой кукурузы на орошаемых землях нижнего Поволжья / В. В. Бородычев, Н. Н. Дубенок, А. Е. Новиков, Г. В. Коновалова // *Плодородие*. – 2016. – № 1. – С. 35–37.
3. Виноградов, А. П. Геохимия редких и рассеянных химических в почвах / А. П. Виноградов. – Москва : Изд-во АН СССР, 1957. – 238 с.
4. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) / Ю. Н. Водяницкий // *Почвоведение*. – 2013. – № 7. – С. 872–881. – DOI: 10.7868/S0032180X13050171.
5. Водяницкий, Ю. Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах / Ю. Н. Водяницкий // *Почвоведение*. – 2012. – № 3. – С. 368–375.
6. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – Москва, 2003.
7. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с. – ISBN: 5-02-029422-5.
8. Тяжелые металлы в почвах и растениях устья реки Дон и побережья Таганрогского залива / Т. М. Минкина, Ю. А. Федоров, Д. Г. Невидомская [и др.] // *Почвоведение*. – 2017. – № 9. – С. 1074–1089. – DOI: 10.7868/S0032180X17070061.
9. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – Москва : Астрель-2000, 1999. – 768 с.
10. Соколова, Т. А. Низкомолекулярные органические кислоты в почвах: источники, состав, содержание, функции в почвах (обзор) / Т. А. Соколова // *Почвоведение*. – 2020. – № 5. – С. 559–575. – DOI: 10.31857/S0032180X20050159.
11. Спектрометр атомно-абсорбционный КВАНТ–Z.ЭТА. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГКНЖ.0900.000Т0. – Москва, 1995. – 57 с.
12. Шевырев, Л. Т. Эволюция тектонической структуры Воронежской антеклизы и ее эндогенный рудогенез / Л. Т. Шевырев, А. Д. Савко, А. В. Шишов. – Воронеж : ВГУ, 2004. – 191 с.
13. Щеглов, Д. И. Основы химического анализа почв / Д. И. Щеглов, А. И. Громовик, Н. С. Горбунова. – Воронеж, 2019. – 332 с. – ISBN 978-5-9273-2738-6.
14. Щедрин, В. Н. Влияние регулярного и циклического видов орошения на почвенное плодородие и продуктивность чернозема обыкновенного Азовской оросительной системы / В. Н. Щедрин // *Почвоведение*. – 2016. – № 2. – С. 249–256. – DOI 10.7868/S0032180X16020118.
15. Beker, D. E. Chemical monitoring of soil for environmental quality animal and health / D. E. Beker, L. Chesnin // *Advances in Agronomy*. – 1975. – V. 27. – P. 306–366.
16. Dalton, D. A. Nickel as a micronutrient element for plants / D. A. Dalton, S. A. Russel, H. J. Evans // *Bio-Factors*. – 1988. – V. 1. – № 1. – P. 11–16.
17. Eskew, D. Nickel in higher plants. Further evidence for an essential role / D. Eskew, R. M. Welch, W. A. Norvell // *Plant Physiol*. – 1984. – V. 76. – № 3. – P. 691–693.
18. Kabata-Pendias, A. Trace Elements in Soils and Plants / A. Kabata-Pendias. – 4th ed. – Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. – 548 p. – DOI: 10.1201/b10158.
19. Sposito, G. The Chemistry of Soils / G. Sposito. – New York : Oxford University Press, 1989. – 279 p.

References

1. Andreeva I.V., Govorina V.V., Vinogradova S.B., Jagodin B.A. (2001) *Nikel' v rasteniyah* [Nickel in plants]. *Agrokhimiya*, № 3, pp. 82-94 (in Russian).
2. Borodychev V. V., Dubenok N.N., Novikov A.E., Konovalova G.V. (2016) *Osobennosti agrotehniki zernovoj kukuruzy na oroshaemyh zemljah nizhnego Povolzh'ja. Plodorodie*, № 1, pp. 35-37 (in Russian).
3. Vinogradov A.P. *Geohimija redkih i rassejannyh himicheskikh v pochvah*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1957, 238 p. (in Russian).
4. Vodjanickij Ju.N. (2013) *Zagrjaznenie pochv tjazhelymi metallami i metalloidami i ih jekologicheskaja opasnost' (analiticheskij obzor)*. *Pochvovedenie*, № 7, pp. 872-881 (in Russian). DOI: 10.7868/S0032180X13050171.
5. Vodjanickij Ju.N. (2012) *Normativy sodержaniya tjazhelyh metallov i metalloidov v pochvakh*. *Pochvovedenie*, № 3, pp. 368-375 (in Russian).
6. GN 2.1.5.1315-03. *Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) himicheskikh veshhestv v vode vodnyh ob#ektov hozjajstvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovanija*. Moscow, 2003 (in Russian).
7. Il'in V.B. *Tjazhelye metally v sisteme pochva – rastenie*. Novosibirsk: Nauka, 1991, 151 p. (in Russian). ISBN: 5-02-029422-5.
8. Minkina T.M., Fedorov Ju.A., Nevidomskaja D.G. (et al.) (2017) *Tjazhelye metally v pochvah i rastenijah ust'ja reki don i poberezh'ja taganrogskogo zaliva*. *Pochvovedenie*, № 9, pp. 1074-1089 (in Russian). DOI: 10.7868/S0032180X17070061.
9. Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geohimija landshafta*. Moscow: Astreja-2000, 1999, 768 p. (in Russian).
10. Sokolova T.A. (2020) *Nizkomolekuljarnye organicheskie kisloty v pochvah: istochniki, sostav, sodержanie, funkcii v pochvah (obzor)*. *Pochvovedenie*, № 5, pp. 559-575 (in Russian). DOI: 10.31857/S0032180X20050159.
11. *Spektrometr atomno-absorbcionnyj KVANT–Z.JeTA. Tehnicheskoe opisaniye i instrukcija po jekspluatácii*. GKNZh.0900.000T0. Moscow, 1995, 57 p. (in Russian).
12. Shevyrev L.T., Savko A.D., Shishov A.V. *Jevoljucija tektonicheskoy struktury Voronezhskoj anteklizy i ee jendogennyj rudogenez*. Voronezh, 2004, 191 p. (in Russian).
13. Shcheglov D.I., Gromovik A.I., Gorbunova N.S. *Osnovy himicheskogo analiza pochv* [Fundamentals of soil chemical analysis]. Voronezh, 2019, 332 p. (in Russian). ISBN 978-5-9273-2738-6.
14. Shchedrin V.N. (2016) *Vlijaniye reguljarnogo i ciklicheskogo vidov orosheniya na pochvennoe plodorodie i produktivnost' chernozema obyknovenogo Azovskoj orositel'noj sistemy*. *Pochvovedenie*, № 2, pp. 249-256. (in Russian). DOI: 10.7868/S0032180X16020118.
15. Beker D.E., Chesnin L. (1975) Chemical monitoring of soil for environmental quality animal and health. *Advances in Agronomy*, V. 27, pp. 306-366.
16. Dalton D.A., Russel S.A., Evans H.J. (1988) Nickel as a micronutrient element for plants. *Bio-Factors*, V. 1, № 1, pp. 11-16.
17. Eskew D., Welch R.M., Norvell W.A. (1984) Nickel in higher plants. Further evidence for an essential role. *Plant Physiol.*, V. 76, № 3, pp. 691-693.
18. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p. DOI: 10.1201/b10158.
19. Sposito G. *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press, 1989, 279 p.

Сведения об авторах

Крамарева Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tkramarewa@mail.ru.

Горбунова Надежда Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vilian@list.ru.

Громовик Аркадий Игоревич – кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: agrom.ps@mail.ru.

Куликова Елена Владимировна – кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: milenica@mail.ru.

Information about authors

Kramareva Tatyana Nikolaevna – PhD (Biology), Associate Professor, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies", Voronezh, Russian Federation; e-mail: tkramarewa@mail.ru.

Gorbunova Nadezhda Sergeevna – PhD (Biology), Associate Professor, FSBEI HE "Voronezh State University", Voronezh, Russian Federation; e-mail: vilian@list.ru.

Gromovik Arkady Igorevich – PhD (Biology), Associate Professor, FSBEI HE "Voronezh State University", Voronezh, Russian Federation; e-mail: agrom.ps@mail.ru.

Kulikova Elena Vladimirovna – PhD (Biology), Associate Professor, FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I", Voronezh, Russian Federation; e-mail: milenica@mail.ru.