

ЗАСОЛЕНИЕ КАК ФАКТОР ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ БАРАБИНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

А.Д. Иовчева¹, П.П. Кречетов², И.Н. Семенов³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв*

¹ *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, аспирант*

¹ *Техник; e-mail: y_nastia@mail.ru*

² *Доцент, канд. биол. наук; e-mail: krechetov@mail.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru*

Для оценки влияния степени засоления и химизма легкорастворимых солей на дифференциацию тяжелых металлов в почвах Барабинской лесостепи изучено внутрипрофильное распределение подвижных форм, экстрагируемых NH_4Ac и 1н HNO_3 , и общего содержания Co , Ni , Cu , Zn , Pb в сопряженных черноземах, солонцах темных квазиглеевых и квазиглееватых, гумусово-квазиглеевых почвах разной степени засоления и солончаках, сформировавшихся в пределах двух ключевых участков (Барабушка и Чаны). Полученная по результатам анализа водной вытяжки сумма токсичных солей изменялась от $<0,1\%$ в незасоленных черноземах квазиглееватых до 3% (очень сильное засоление) в верхних горизонтах солончаков. В отдельных разрезах черноземов (квазиглееватых) отмечаются признаки солонцеватости и присутствие соды. Засоление хлоридами, сульфатами и нитратами натрия гумусовых и органо-генных горизонтов гумусово-квазиглеевых солончаковых почв и солончаков способствует увеличению подвижности Co , Ni , Cu , Pb и их выносу из поверхностных горизонтов радиальными и латеральными потоками. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных разной степени гидроморфности и гумусово-квазиглеевых почв способствует аккумуляции тяжелых металлов на щелочно-сорбционном барьере в солонцовых и карбонатных горизонтах. Распределение подвижных форм Zn в исследуемых почвах определяется в первую очередь его биогенной аккумуляцией в поверхностных горизонтах.

Ключевые слова: почвы галогенного ряда, семиаридные ландшафты, потенциально токсичные элементы, катена, подвижные формы, геохимические барьеры, фракционирование

ВВЕДЕНИЕ

В Западной Сибири изменение климата ведет к смещению природных зон и появлению галогенных ландшафтов на более северных территориях. Отмечаются рост минерализации и трансформация состава почвенных растворов и для незасоленных почв [Структура..., 1974; Анопченко, Якутин, 2012; Bischoff et al., 2018]. Традиционно считается, что в нейтральных и щелочных почвах лесостепи тяжелые металлы (ТМ) слабо подвижны [Ильин, Сысо, 2001; Semenov, Kogoleva, 2019]. Однако рост концентрации солей и изменение соотношения основных ионов в почвенном растворе может как уменьшать, так и увеличивать подвижность ТМ за счет ионообменных процессов и образования комплексов с компонентами почвенного раствора [Воробьева, Рудакова, 1981; Acosta et al., 2011; Минкина и др., 2014; Краснопорова и др., 2017]. Исследование влияния засоления почв на миграционную способность Co , Cu , Ni , Pb , Zn как потенциально токсичных элементов актуально не только в природных (семи) аридных ландшафтах, затронутых техногенезом, но и в городах, где используются противоголо-

ледные реагенты на основе легкорастворимых солей [Никифорова и др., 2016].

Цель данной работы – выявить влияние степени засоления и химизма легкорастворимых солей на дифференциацию подвижных форм ТМ в почвах Барабинской лесостепи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны замкнутые водосборные бассейны малых озер ($<10 \text{ км}^2$), расположенные в южной части Барабинской лесостепи, характеризующиеся условно-естественной луговой растительностью пойм. Лесные сообщества, встречающиеся в колочных западинах междуречий, в настоящем исследовании не рассматривались.

Наличие засоленных неогеновых глин, подстилающих почвообразующие породы различного генезиса, и как следствие повышенная минерализация (более 1 г/л) грунтовых вод, залегающих близко к поверхности, а также плоский рельеф и тяжелый гранулометрический состав обеспечивают формирование в Барабинской лесостепи почв засоленного ряда: солончаков, солонцов и солодей

[Структура..., 1974; Елизарова и др., 2005]. Объекты изучения – почвы катен двух ключевых участков: Барабушка (Б) – в 11 км к западу от г. Барабинска, и Чаны (Ч) – в 5 км к северо-востоку от поселка Чаны, в пределах Карачинского стационара Института почвоведения и агрохимии СО РАН (рис. 1), с типичными для южной части лесостепи Барабы сопряжениями ландшафтов [Структура..., 1974]. Для междуречий характерна лугово-разнотравная степная растительность; в подчиненных позициях развиты луговые сообщества галогидроморфного ряда по берегам озер и низинные болота. В почвенном покрове территории преобладают солонцы луговые (квизиглеевые) в комплексе с лугово-черноземными почвами, часто подверженными солонцеватости и засолению [Структура..., 1974; Ильин, Сысо, 2001].

В пределах катен от междуречья через пологие (до 5 – 8°) склоны до побережья озер (Б – Круглое; Ч – Ембакуль) закладывали серию из трех параллельных почвенно-геохимических профилей на расстоянии 60–150 м друг от друга (фактически тройная повторность, так как почвы и растительность не отличаются в одном элементарном ландшафте, изученном на разных трансектах). В пределах участка Барабушка диагностировано следующее сопряжение почв (рис. 1). Черноземы квазиглееватые (система горизонтов и их усредненная глубина: $AU_{0-45} - BC_{Ath}$, $dc_{46-105} - C_{sa>105}$) вскрыты в элювиально-аккумулятивной (ЭА) позиции междуречья под разнотравно-злаковой растительностью с преобладанием вейника наземного (*Calamagrostis epigæjos*) и типчака (*Festuca valesiaca*)

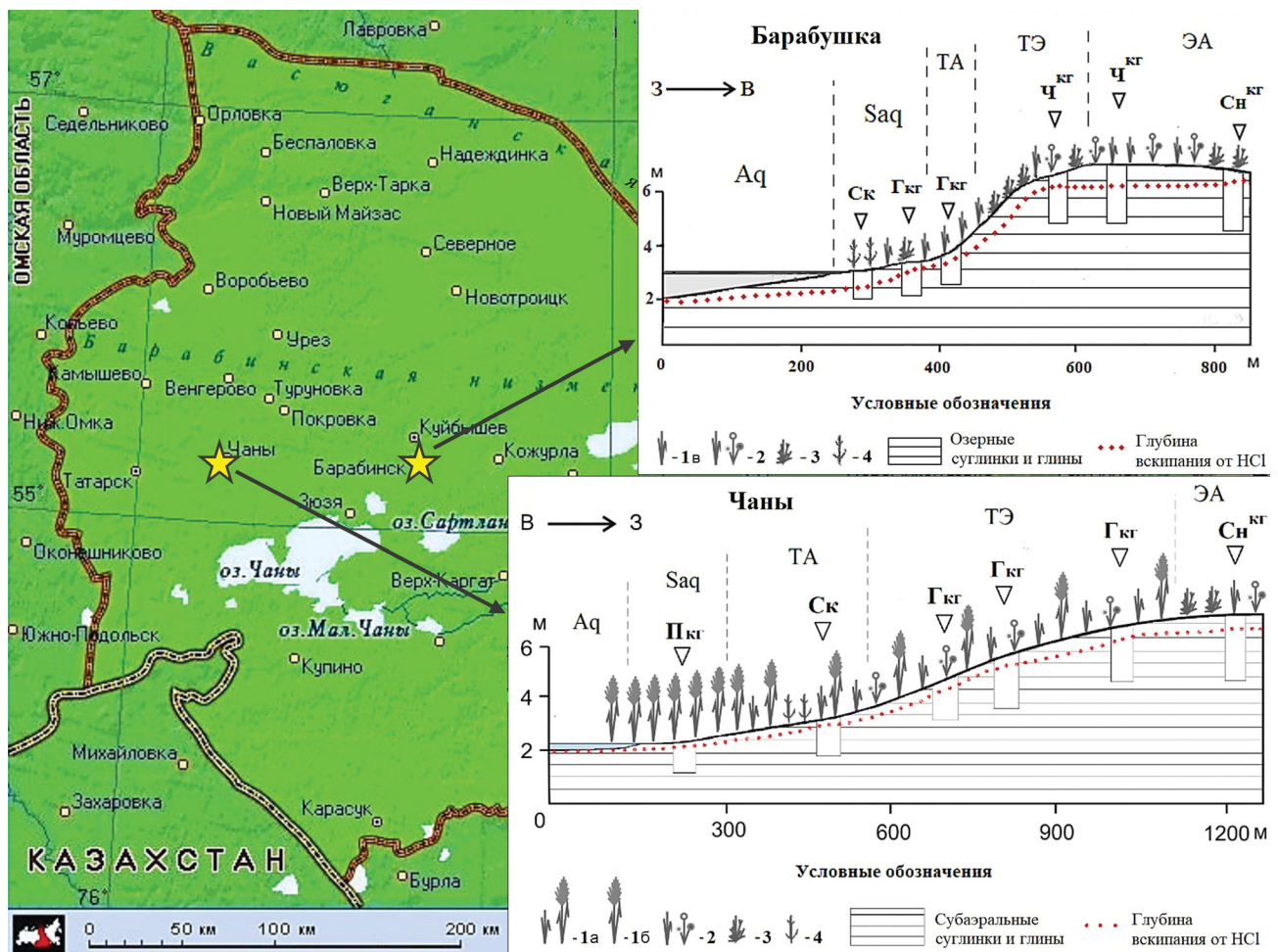


Рис. 1. Территория исследования.

Почвы: Гкг – гумусово-квизиглеевая; Пкг – перегнойно-квизиглеевая; Ск – солончак; Сн^{кг} – солонец темный квизиглеев(ат)ый; Ч^{кг} – чернозем квизиглееватый. Растительные сообщества: 1 – злаковые: а – с преобладанием мятлика (*Poa angustifolia*) и тростника (*Phragmites communis*); б – тростниковые (*Phragmites communis*); в – смешанные; 2 – разнотравно-злаковые сообщества; галофитные сообщества с преобладанием: 3 – полыни; 4 – солероса

Fig. 1. Study area.

Soils: Гкг and Пкг – Calcic Oxygleyic Mollic Gleysols; Ск – Calcic Mollic Gleyic Solonchaks; Сн^{кг} – Salic Mollic Gleyic Solonetz; Ч^{кг} – Gleyic Chernozems. Vegetation: 1 – grass communities: а – with predominance of *Phragmites communis* and *Poa angustifolia*; б – with predominance of *Phragmites communis*; в – motley-grasses community; 2 – motley herbs-grasses community; halophytic communities with predominance of: 3 – *Artemisia* spp.; 4 – *Salicornia herbacea*

и в трансэлювиальной (ТЭ) позиции склона под разнотравно-злаковым лугом с преобладанием коостреца безостого (*Bromus inermis*), тимopheевки степной (*Phleum phleoides*) и мышиного горошка (*Vicia cracca*). Также в ЭА позиции диагностирован солонец темный квазиглеевый солончаковатый ($SEL_{0-4} - ASN_{5-43} - BC_{Ath,s_{44-76}} - BC_{A(s)_{77-130}} - Q_{s_{>130}}$) под галофитной растительностью с преобладанием полыни (*Artemisia* spp.). В трансаккумулятивной позиции (ТА) нижней выположенной части склона под вейниковым сообществом (*C. epigejos*), а также в супераквальной позиции (Saq) поймы озера под злаковым сообществом с преобладанием овсяницы (*Festuca pseudovina*) вскрыты гумусово-квазиглеевые солончаковые почвы ($HAUs_{0-30} - HQ_{31-50} - Q_{>50}$). Также в Saq позиции, в 10 см над урезом воды под солеросом (*Salicornia herbacea*), диагностирован солончак вторичный ($Ts_{0-14} - TH_{15-40} - Q_{>40}$). Засоление почв озерной поймы стало проявляться в последние годы в связи с подъемом уровня грунтовых вод, характерного для Барабы [Структура..., 1974], так как во время предшествующих исследований 2013 г. [Лаверов и др., 2016] засоление не отмечалось, а вода озера была пресной. В пределах междуречья участка Чаны под суходольным лугом с участием овсяницы (*Festuca pseudovina*), полыни (*Artemisia* spp.) и солонечника двцветкового (*Galatella biflora*) диагностированы чернозем квазиглееватый солонцеватый ($AU_{0-24} - BC_{Ath_{25-60}} - Q_{>60}$) и солонец темный солончаковатый квазиглееватый ($SEL_{0-3} - ASN_{4-34} - ASN_{Ca,s_{35-57}} - BC_{Ath_{58-95}} - Q_{>95}$). В пределах ТЭ ландшафта полого склона под злаковыми сообществами с преобладанием тростника (*Phragmites communis*), вейника (*Calamagrostis epigijos*), тимopheевки (*Phleum phleoides*) и мятлика (*Poa angustifolia*) вскрыты гумусово-квазиглеевые почвы ($Ts_{0-5} - HAUs_{6-19} - Q_{hi,s_{20-45}} - Q_{ox_{46-68}} - Q_{>68}$) различной степени и химизма засоления. В ТА позиции нижней выположенной части склона под злаковой преимущественно тростниково-мятливой (*P. communis*, *P. angustifolia*) ассоциацией с участием галофитов (*Plantago cornuti*, *Salicornia herbacea*) сформировался солончак вторичный ($Ts_{0-2} - HAUs_{3-10} - Hqs_{11-18} - Q_{hi,s_{19-30}} - Q_{s_{>30}}$; засоление накладывается на профиль сформировавшейся ранее гумусово-квазиглеевой почвы). В Saq позиции низкой поймы вскрыта перегнойно-квазиглеевая солончаковая почва ($Hs_{0-13} - Q_{hi,s_{>13}}$) под тростниковой ассоциацией (*P. communis*).

Обе исследованные катены относятся к монолитным, несмотря на небольшую вариабельность гранулометрического состава (от тяжелых суглинков к глинам) отложений: Барабушка – озерных, Чаны – субазральных (см. рис. 1). Их геохимическая контрастность средняя: переход от степно-

го к луговому типу биологического круговорота в пределах катены. По типу сопряжения обе катены относятся к полным, так как включают в себя автономный ландшафт междуречья, супераквальный ландшафт поймы и субаквальный ландшафт озера. Литологическая однородность, близкое залегание грунтовых вод и периодически промывной водный режим почв междуречья обеспечивают поступление веществ из автономных ландшафтов в подчиненные, поэтому исследуемое сопряжение допустимо считать совершенным. Класс элементарных ландшафтов автономных позиций – кальциево-содовый, подчиненных – соленосный глеевый по [Перельман, 1966]. Сходство катен разных участков проявляется в том, что они представляют собой типичные для Барабы сопряжения элементарных ландшафтов (ЭЛ) [Структура..., 1974; Ильин, Сысо, 2001]. Различия участков, помимо литологии, проявляются в вариабельности параметров засоления и степени гидроморфности ЭЛ и, как следствие, состава фитоценозов.

Параллельные профили, заложенные в рамках каждой катены, в основном, идентичны друг другу. На двух участках заложено 13 разрезов, пробурено 18 скважин до почвообразующих пород, на трех точках осуществлено поверхностное опробование. Суммарно получен 161 образец. Почвы отбирали по генетическим горизонтам. На участках опробованы грунтовые воды (8 проб).

Химический анализ образцов почв проведен в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ. Определены величина pH в почвенной суспензии (соотношение почва : дистиллированная вода 1 : 2,5) потенциметрически в динамических условиях (прибор «Эксперт-pH», Россия), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии на приборе Analysette-22 MicroTec plus (Fritsch, Германия), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – по методу И.В. Тюрина с титриметрическим окончанием. В водной вытяжке (соотношение почва : дистиллированная вода 1 : 5) исследованы электропроводность (ЕС) – электрохимическим методом (кондуктометр SevenEasy S30, Mettler Toledo, США), катионно-анионный состав – методом ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием (хроматограф «Стайер-М», Россия) и щелочность – кислотно-основным титрованием с H_2SO_4 . Тип засоления почв определялся по содержанию (в смоль(экв)/кг) и соотношению токсичных эквивалент-ионов, а степень засоления – исходя из их суммы ($S_{токс}$), рассчитанной арбитражным методом, и типа засоления [Научные основы предотвращения..., 2013].

Формы Co, Ni, Cu, Zn, Pb извлекали по методике параллельного экстрагирования [Минкина и др.,

2008]: подвижные ($F1$) – ацетатно-аммонийным буфером ($pH = 4,8$; соотношение почва : раствор 1:5 и 1:10 для карбонатных проб); специфически сорбированные ($F2$) – по разнице между содержанием элементов в $1n HNO_3$ и $F1$. Содержание ТМ в вытяжках определено атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой методом на приборе iCAP-6500 (Thermo Scientific, США) в ИПТМ РАН. Общее содержание ТМ в исследуемых почвах для сравнения с региональным фоном и санитарными нормативами определяли рентген-флуоресцентным методом на анализаторе Axios (PANalytical, Нидерланды) с использованием стандартных образцов российских почв в ИГЕМ РАН. В поверхностных и грунтовых водах определяли pH , ЕС и катионно-анионный состав методами, описанными выше, а также окислительно-восстановительный потенциал – потенциометрически (Hanna HI 98120, Германия).

Для оценки характера распределения металлов в профиле почв использован коэффициент радиальной дифференциации (R) – отношение содержания элемента в генетическом горизонте почвы к его содержанию в почвообразующей породе. Накопление считалось значимым при $R \geq 1,5$, вынос – при $R < 0,5$. Статистическая обработка данных произведена в пакетах Excel 2010 и STATISTICA 10. Достоверность связи между содержанием $F1$ ТМ и свойствами почв определяли согласно коэффициенту корреляции Спирмена, значение которого считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные почвы – глинистые и тяжело-суглинистые (табл. 1). Черноземы квазиглееватые участка Барабушка не засолены ($S_{\text{токс}} \leq 0,07\%$). Выявленное сульфатно-содовое засоление для солонцов темных квазиглееватых и квазиглеевых и черноземов солонцеватых, а также хлоридное и сульфатное натриевое – для гумусово-квазиглеевых, перегнойно-квазиглеевых почв и солончаков, коррелирует с преимущественно хлоридным и сульфатным натриевым (при участии Са и Mg) составом грунтовых вод и типично для лесостепи Барабы по [Структура..., 1974; Ильин, Сысо, 2001]. На участке Чаны в засолении большинства описанных гумусово-квазиглеевых почв выражено участие соды. В поверхностных горизонтах (Т, НАУ) солончаков и гумусово-квазиглеевых почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия, повышено содержание нитратов ($\geq 0,01\%$ – нижнего порога нитратного засоления). Засоление почв варьирует от слабого в переходных к породе горизонтах ($S_{\text{токс}} \approx 0,1\%$) до очень сильного ($S_{\text{токс}} \approx 0,6–3\%$ в зависимости от типа химизма) в верхних (Т, НАУ) горизонтах со-

лончаков и ASN – солонцов (см. табл. 1). pH почв колеблется от нейтрального в органических до щелочного в карбонатных и засоленных содой горизонтах. $C_{\text{орг}} > 2,7\%$ в поверхностных горизонтах почв обоих участков. В гумусово-квазиглеевых почвах $C_{\text{орг}}$ составляет в среднем 4–7%; в солончаках может достигать 22% в горизонте НАУ.

Общее содержание Co, Cu, Ni и Zn в почвах участков, в основном, не превышает кларки литосферы [Григорьев, 2009] и региональный фон [Ильин, Сысо, 2001]. Превышение по Pb регионального фона, кларка (на обоих участках) и нормативов (Чаны) не связано с техногенным влиянием [Ильин, Сысо, 2001; Semenov, Koroleva, 2020], так как характерно лишь для содержащих соду и сульфаты почв, и приурочено, преимущественно, к глубинным горизонтам.

В почвах междуречий и склонов внутрипрофильное распределение ТМ в основном равномерное. Для гидроморфных почв выявлено накопление Cu, Pb и Zn в поверхностных горизонтах, что обусловлено, вероятно, их сорбцией органическим веществом. При морфологическом описании разрезов пойменных почв обоих участков отмечен запах сероводорода. По диаграммам условий осаждения солей Co, Ni, Cu, Zn, Pb в наблюдаемых кислотно-основных ($pH > 6,5$) и окислительно-восстановительных условиях ($Eh = 100–200$ мВ) грунтовых вод, содержащих к тому же значимые концентрации карбонат-ионов, выпадение сульфидов ТМ маловероятно [Brookins, 1988].

Внутрипрофильное распределение подвижных форм ТМ ($F1$) различно для исследованных участков и дифференцируется в зависимости от типа почвы (рис. 2). Для черноземов квазиглееватых, в том числе солонцеватых, характерно близкое к равномерному распределение $F1$ Ni и регрессивное – Co, Cu, Pb ($R_{Ni} = 0,6–1,2$ и $R_{Co, Cu, Pb} < 0,5$ в гумусовых горизонтах). В черноземах для $F1$ Zn нет четкой закономерности распределения (R изменяется от 0,3 для Барабушки до 6 в Чанах). Для солонцов темных с сульфатно-содовым засолением и гумусово-квазиглеевых почв с участием соды при смешанном типе химизма характерна аккумуляция некоторых ТМ ($R_{Ni} = 1,6–2,4$, $R_{Cu} = 1,6–1,9$, $R_{Pb} = 1,6–3,0$) в горизонтах ASN и BCA, а также НАУ в Чанах. Для гумусово- и перегнойно-квазиглеевых почв и солончаков с Na_2SO_4 , NaCl и смешанным Na-Cl- SO_4 засолением, в том числе с участием нитратов, характерно сильное обеднение поверхностных гумусовых и органогенных горизонтов подвижными Ni и Co ($R_{Ni} < 0,2$), умеренное – Cu и Pb ($R_{Cu, Pb} \approx 0,3–0,4$) и обогащение Zn ($R_{Zn} > 7$). Увеличение содержания $F1$ Co, Ni, Cu, Pb в средней части профиля большинства почв совпадает с верхней границей горизонтов BCA, Q и обусловлено осаждением ТМ на карбонатном геохимическом барьере.

Таблица 1

Физико-химические характеристики исследованных почв Барабы

Горизонт	n	C _{орг} , %	Физ. глина, %	pH	ЕС, дСм/м	S _{токс} , ‰	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Щ* _{общ}
							смоль(экв)/кг					
Б: Солонец темный квазиглеевый солончаковый (сульфатно-содовый тип засоления)												
SEL	2	$\frac{3,6 \pm 0,8}{3,0-4,2}$	$\frac{51 \pm 14}{41-61}$	$\frac{7,8 \pm 0,4}{7,5-8,1}$	<1	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,1-0,2}$	$\frac{1,8 \pm 0,8}{1,2-2,4}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,1}$	$\frac{0,5 \pm 0,1}{0,4-0,6}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,1}$	$\frac{0,7 \pm 0,5}{0,3-1,0}$	$\frac{1,3 \pm 0,2}{1,2-1,5}$
ASN	1	3,2	49	8,3	<1	0,1	1,5	0,2	0,5	0,0	0,3	1,5
ASNs	1	1,0	80	9,8	1	0,6	7,4	0,2	0,6	0,0	3,2	5,5
BCAth,s	1	0,5	83	10,1	2	0,6	7,5	0,1	0,3	0,1	3,3	4,3
BCAth,s	1	–	78	10,2	1	0,4	4,8	0,1	0,4	0,1	1,4	3,7
BCAs	1	0,2	84	9,7	1	0,3	2,7	0,1	0,1	0,0	0,2	3,5
Qs	1	0,1	66	9,9	1	0,2	1,9	0,1	0,2	0,0	0,1	2,7
Б: Чернозем квазиглееватый												
AU	4	$\frac{2,5 \pm 0,3}{2,0-2,8}$	$\frac{58 \pm 6}{50-63}$	$\frac{6,7 \pm 0,2}{6,5-6,9}$	<1	<0,1	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,0-0,1}$	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,1-0,2}$	$\frac{0,4 \pm 0,2}{0,3-0,8}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{0,2 \pm 0,3}{0,0-0,6}$	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,4}$
AU	2	$\frac{1,5 \pm 0,8}{0,9-2,1}$	$\frac{59 \pm 18}{47-72}$	$\frac{7,2 \pm 0,6}{6,8-7,6}$	<1	<0,1	$\frac{<0,1}{0,0-0,1}$	$\frac{0,2 \pm 0,2}{0,1-0,4}$	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,2-0,3}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{<0,1}{0,0-0,1}$	$\frac{0,3 \pm 0,2}{0,1-0,4}$
BCAth	2	$\frac{0,6 \pm 0,3}{0,4-0,8}$	$\frac{75 \pm 2}{73-77}$	$\frac{8,5 \pm 0,4}{8,2-8,7}$	<1	<0,1	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,1}$	$\frac{0,5 \pm 0,6}{0,1-1,0}$	$\frac{0,6 \pm 0,0}{0,6-0,6}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{0,6 \pm 0,1}{0,5-0,7}$
BCAdc	2	$\frac{0,3 \pm 0,0}{0,3-0,3}$	$\frac{77 \pm 5}{74-81}$	$\frac{9,0 \pm 0,1}{8,9-9,0}$	<1	<0,1	$\frac{0,6 \pm 0,1}{0,5-0,7}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,1}$	$\frac{0,4 \pm 0,0}{0,4-0,4}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,0-0,2}$	$\frac{0,7 \pm 0,0}{0,7-0,8}$
Q	4	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,2-0,4}$	$\frac{81 \pm 5}{73-84}$	$\frac{8,6 \pm 0,2}{8,4-8,8}$	<1	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,0-0,1}$	$\frac{1,1 \pm 0,7}{0,2-1,8}$	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,3}$	$\frac{0,6 \pm 0,2}{0,3-0,8}$	$\frac{0,4 \pm 0,4}{0,0-0,7}$	$\frac{0,3 \pm 0,3}{0,0-0,8}$	$\frac{0,7 \pm 0,1}{0,5-0,8}$
Б: Гумусово-квазиглеевая солончаковая почва (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)												
HAUs	4	$\frac{7,1 \pm 5,2}{0,9-12,4}$	$\frac{26 \pm 12}{16-39}$	$\frac{8,2 \pm 0,2}{8,0-8,4}$	$\frac{7 \pm 2}{4-9}$	$\frac{0,9 \pm 0,4}{0,3-1,2}$	$\frac{14,9 \pm 7,9}{3,7-22,0}$	$\frac{6,9 \pm 4,0}{1,8-11,4}$	$\frac{4,3 \pm 2,0}{2,3-7,2}$	$\frac{3,2 \pm 1,6}{1,0-4,8}$	$\frac{10,7 \pm 3,7}{5,3-13,5}$	$\frac{1,4 \pm 0,5}{0,8-1,9}$
HAUs	2	$\frac{3,0 \pm 0,8}{2,4-3,5}$	$\frac{39 \pm 27}{20-57}$	$\frac{8,4 \pm 0,0}{8,4-8,4}$	$\frac{5 \pm 1}{4-6}$	$\frac{0,3 \pm 0,2}{0,1-0,5}$	$\frac{4,4 \pm 4,2}{1,4-7,4}$	$\frac{2,2 \pm 2,1}{0,7-3,6}$	$\frac{1,9 \pm 0,1}{1,8-2,0}$	$\frac{1,3 \pm 1,2}{0,4-2,2}$	$\frac{4,0 \pm 1,7}{2,8-5,2}$	$\frac{0,7 \pm 0,1}{0,6-0,8}$
HQ	2	$\frac{0,8 \pm 0,3}{0,5-1,0}$	$\frac{66 \pm 11}{58-74}$	$\frac{8,5 \pm 0,1}{8,4-8,5}$	$\frac{4 \pm 1}{3-4}$	$\frac{0,3 \pm 0,0}{0,3-0,3}$	$\frac{3,5 \pm 0,1}{3,4-3,5}$	$\frac{1,2 \pm 0,4}{1,0-1,5}$	$\frac{1,4 \pm 0,3}{1,2-1,6}$	$\frac{1,1 \pm 0,5}{0,7-1,4}$	$\frac{3,7 \pm 1,0}{3,0-4,4}$	$\frac{0,6 \pm 0,1}{0,6-0,7}$
Q	4	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,2-0,3}$	$\frac{70 \pm 21}{51-88}$	$\frac{8,6 \pm 0,2}{8,4-8,9}$	$\frac{2 \pm 1}{1-3}$	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,1-0,2}$	$\frac{1,9 \pm 0,9}{1,1-3,0}$	$\frac{0,5 \pm 0,4}{0,2-0,9}$	$\frac{0,6 \pm 0,3}{0,3-0,9}$	$\frac{0,9 \pm 0,4}{0,4-1,4}$	$\frac{1,3 \pm 0,6}{0,9-2,1}$	$\frac{0,7 \pm 0,1}{0,7-0,9}$
Б: Солончак вторичный (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)												
Ts	3	$\frac{20,9 \pm 2,2}{18,4-22,2}$	$\frac{12 \pm 2}{10-13}$	$\frac{6,7 \pm 0,2}{6,4-6,8}$	$\frac{10 \pm 4}{6-14}$	$\frac{2,5 \pm 1,5}{1,3-4,2}$	$\frac{34,8 \pm 15,7}{21,7-52,2}$	$\frac{8,5 \pm 3,6}{4,9-12,1}$	$\frac{5,2 \pm 1,1}{4,0-6,3}$	$\frac{16,6 \pm 11,8}{4,7-28,2}$	$\frac{23,5 \pm 20,1}{1,9-41,7}$	$\frac{0,9 \pm 0,1}{0,8-1,0}$
TH	1	12,0	12	6,5	3,3	0,5	8,3	4,5	5,2	2,2	8,3	0,4
TH	1	3,4	14	6,5	2,0	0,2	4,1	3,5	7,6	1,4	8,0	0,5
Q	3	$\frac{0,8 \pm 0,4}{0,6-1,2}$	$\frac{62 \pm 21}{38-77}$	$\frac{7,5 \pm 0,5}{7,0-7,9}$	$\frac{2 \pm 1}{1-3}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,1}$	$\frac{1,3 \pm 0,3}{1,0-1,7}$	$\frac{1,2 \pm 0,1}{1,2-1,4}$	$\frac{4,7 \pm 0,3}{4,4-4,9}$	$\frac{0,8 \pm 0,3}{0,4-1,0}$	$\frac{4,6 \pm 0,2}{4,4-4,9}$	$\frac{0,5 \pm 0,1}{0,4-0,6}$
Ч: Солонец темный квазиглееватый солончаковатый (содово-сульфатный тип засоления)												
SEL	1	3,1	47	7	<1	0,1	1,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,7
ASN	1	–	66	7,6	<1	0,1	0,9	0,2	0,7	0,4	0,3	1,2
ASNca,s	1	0,7	71	8,7	2	0,6	7,8	0,2	0,7	0,7	8,4	1,5
BCAth	1	0,4	68	9,3	2	0,3	5,2	0,2	1,7	0,3	4,3	1,8
Q	1	0,2	83	9,3	1	0,2	2,6	0,1	0,2	0,1	1,0	1,8

Продолжение таблицы 1

Горизонт	n	C _{орг} , %	Физ. глина, %	pH	ЕС, дСм/м	S _{токс} , %	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Щ* _{общ}
							смоль(экв)/кг					
Ч: Чернозем квазиглееватый солонцеватый												
AU	3	$\frac{3,4 \pm 0,5}{2,8-3,8}$	$\frac{44 \pm 6}{38-50}$	$\frac{7,1 \pm 0,2}{7,0-7,4}$	<1	<0,1	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,3}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,1-0,2}$	$\frac{0,4 \pm 0,1}{0,3-0,5}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,0-0,1}$	$\frac{0,1 \pm 0,0}{0,0-0,1}$	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,2-0,4}$
BCAth	3	$\frac{0,5 \pm 0,1}{0,5-0,6}$	69,3 (n = 1)	$\frac{8,8 \pm 0,7}{8,3-9,6}$	<1	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,0-0,2}$	$\frac{0,9 \pm 0,6}{0,5-1,6}$	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,3}$	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,2-0,5}$	$\frac{0,0 \pm 0,0}{0,0-0,0}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{1,5 \pm 1,5}{0,5-3,2}$
Q	3	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,2-0,4}$	$\frac{62 \pm 11}{54-75}$	$\frac{9,2 \pm 0,2}{9,0-9,4}$	<1	$\frac{0,1 \pm 0,1}{0,0-0,1}$	$\frac{0,8 \pm 0,5}{0,4-1,4}$	$\frac{0,2 \pm 0,0}{0,2-0,2}$	$\frac{0,4 \pm 0,1}{0,3-0,4}$	$\frac{<0,1}{-}$	$\frac{<0,1}{0,0-0,1}$	$\frac{1,4 \pm 0,7}{0,9-2,2}$
Ч: Гумусово-квазиглеевая солончаковая почва (смешанный тип засоления с участием соды)												
Ts	1	14,9	—	8,5	4	0,9	16,0	0,8	2,7	4,8	7,1	4,2
HAUs	4-6	$\frac{9,8 \pm 1,9}{7,6-12,3}$	$\frac{39 \pm 7}{33-48}$	$\frac{8,3 \pm 0,3}{7,8-8,7}$	$\frac{4 \pm 2}{2-6}$	$\frac{1,0 \pm 0,5}{0,3-1,6}$	$\frac{15,0 \pm 6,3}{5,8-22,4}$	$\frac{1,9 \pm 1,4}{0,5-4,2}$	$\frac{1,9 \pm 0,5}{1,5-2,5}$	$\frac{7,3 \pm 5,5}{1,3-14,9}$	$\frac{8,5 \pm 4,1}{1,9-12,0}$	$\frac{1,8 \pm 0,7}{1,3-2,9}$
Qhi,s	7-8	$\frac{1,1 \pm 0,6}{0,5-2,2}$	$\frac{74 \pm 6}{65-81}$	$\frac{8,9 \pm 0,2}{8,7-9,2}$	$\frac{1 \pm 1}{0-2}$	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,4}$	$\frac{3,2 \pm 1,1}{1,6-4,5}$	$\frac{0,3 \pm 0,1}{0,2-0,5}$	$\frac{0,7 \pm 0,2}{0,4-1,1}$	$\frac{1,2 \pm 1,3}{0,2-3,6}$	$\frac{1,4 \pm 1,2}{0,3-3,1}$	$\frac{1,8 \pm 0,9}{0,5-3,4}$
Qox	6-8	$\frac{0,4 \pm 0,1}{0,2-0,6}$	$\frac{76 \pm 10}{58-85}$	$\frac{8,8 \pm 0,1}{8,6-8,9}$	$\frac{1 \pm 1}{0-2}$	$\frac{0,2 \pm 0,1}{0,1-0,4}$	$\frac{2,7 \pm 1,7}{0,8-5,3}$	$\frac{0,2 \pm 0,2}{0,0-0,5}$	$\frac{0,4 \pm 0,3}{0,1-1,0}$	$\frac{1,3 \pm 1,6}{0,1-4,1}$	$\frac{1,6 \pm 1,3}{0,2-2,9}$	$\frac{1,2 \pm 0,2}{1,0-1,4}$
Q	2	$\frac{0,3 \pm 0,1}{9,8 \pm 1,9}$	$\frac{62 \pm 7}{57-67}$	$\frac{8,9 \pm 0,0}{8,9-8,9}$	<1	0,1 (n = 1)	1,3 (n = 1)	0,1 (n = 1)	0,3 (n = 1)	0,1 (n = 1)	0,3 (n = 1)	1,6 (n = 1)
Ч: Солончак вторичный (сульфатно-хлоридный натриевый тип засоления)												
Ts	1	13,4	—	7,4	13	3,0	45,0	24,4	10,9	28,2	24,1	1,2
HAUs	2	19,6 (n = 1)	$\frac{31 \pm 19}{18-45}$	$\frac{7,3 \pm 0,1}{7,2-7,3}$	$\frac{12 \pm 4}{10-15}$	$\frac{2,2 \pm 0,4}{1,9-2,5}$	$\frac{44,0 \pm 5,6}{40,0-47,9}$	$\frac{9,4 \pm 2,2}{7,9-10,9}$	$\frac{4,0 \pm 0,4}{3,7-4,2}$	$\frac{16,3 \pm 12,7}{7,3-25,4}$	$\frac{12,8 \pm 1,9}{11,5-14,2}$	$\frac{1,1 \pm 0,3}{0,9-1,3}$
Hqs	1	1,3	53,6	8,1	5	0,6	8,1	0,9	0,6	7,9	3,3	0,7
Qhi,s	2	$\frac{1,2 \pm 0,3}{0,3-1,4}$	$\frac{75 \pm 2}{73-77}$	$\frac{8,5 \pm 0,1}{0,1-8,5}$	$\frac{5}{4-5}$	$\frac{0,6 \pm 0,3}{0,4-0,8}$	$\frac{9,7 \pm 0,3}{9,5-9,9}$	$\frac{1,2 \pm 0,5}{0,9-1,6}$	$\frac{1,3 \pm 0,9}{0,7-1,9}$	$\frac{6,1 \pm 5,1}{2,5-9,7}$	$\frac{3,8 \pm 2,0}{2,4-5,3}$	$\frac{0,8 \pm 0,1}{0,7-0,9}$
Qs	3	$\frac{0,4 \pm 0,1}{0,5-0,4}$	$\frac{76 \pm 3}{73-79}$	$\frac{8,6 \pm 0,1}{8,6-8,5}$	$\frac{3 \pm 2}{1-5}$	$\frac{0,5 \pm 0,1}{0,4-0,5}$	$\frac{6,8 \pm 1,0}{6,1-8,0}$	$\frac{0,7 \pm 0,1}{0,7-0,8}$	$\frac{1,0 \pm 0,5}{0,6-1,5}$	$\frac{4,7 \pm 2,1}{2,3-6,2}$	$\frac{2,9 \pm 0,9}{1,9-3,7}$	$\frac{0,8 \pm 0,1}{0,7-0,9}$
Ч: Перегнойно-квазиглеевая почва (хлоридно-сульфатный натриевый тип засоления)												
Hs	3	$\frac{11,0 \pm 8,4}{1,9-18,5}$	$\frac{32 \pm 6}{25-37}$	$\frac{7,6 \pm 0,2}{7,4-7,7}$	$\frac{6 \pm 1}{5-7}$	$\frac{1,5 \pm 1,5}{0,5-3,3}$	$\frac{16,8 \pm 7,3}{10,9-25,0}$	$\frac{4,6 \pm 3,9}{1,5-9,0}$	$\frac{2,5 \pm 2,2}{0,7-4,9}$	$\frac{9,9 \pm 9,7}{3,5-21,1}$	$\frac{16,9 \pm 22,5}{2,1-42,7}$	$\frac{1,1 \pm 0,3}{0,8-1,3}$
Qhi,s	3	$\frac{1,1 \pm 0,5}{0,6-1,7}$	$\frac{59 \pm 13}{45-71}$	$\frac{8,2 \pm 0,3}{8,0-8,5}$	$\frac{3 \pm 2}{1-5}$	$\frac{0,4 \pm 0,1}{0,3-0,4}$	$\frac{6,6 \pm 2,0}{4,7-8,7}$	$\frac{0,9 \pm 0,3}{0,6-1,2}$	$\frac{0,8 \pm 0,4}{0,6-1,3}$	$\frac{3,3 \pm 2,0}{2,0-5,6}$	$\frac{2,1 \pm 0,9}{1,1-2,7}$	$\frac{0,6 \pm 0,3}{0,4-1,0}$

Примечания. 1. Форма записи результатов $\frac{M \pm \sigma}{\min - \max}$ (при $n \geq 2$), где M – среднее арифметическое; σ – стандартное отклонение; n – число проб. Прочерк – отсутствие данных. 2. * – здесь и далее: Щ_{общ} – общая щелочность (HCO₃⁻ + CO₃²⁻).

Низкое содержание FI Co, Cu, Ni и Pb в поверхностных солончаковых горизонтах гидроморфных почв с сульфатно- и хлоридно-натриевым засолением обусловлено вытеснением ТМ из почвенного поглощающего комплекса преобладающими в растворе катионами, например Na, и последующим выносом с радиальными (вглубь профиля) и латеральными (в донные осадки) по-

токами, так как при увеличении ионной силы почвенного раствора за счет роста минерализации ионы фонового электролита начинают конкурировать с ТМ за сорбционные места [Воробьева, Рудакова, 1981; Acosta et al., 2011]. Возможность латеральной миграции ТМ в почвах пойм обусловлена их расположением в периодически затопляемой зоне.

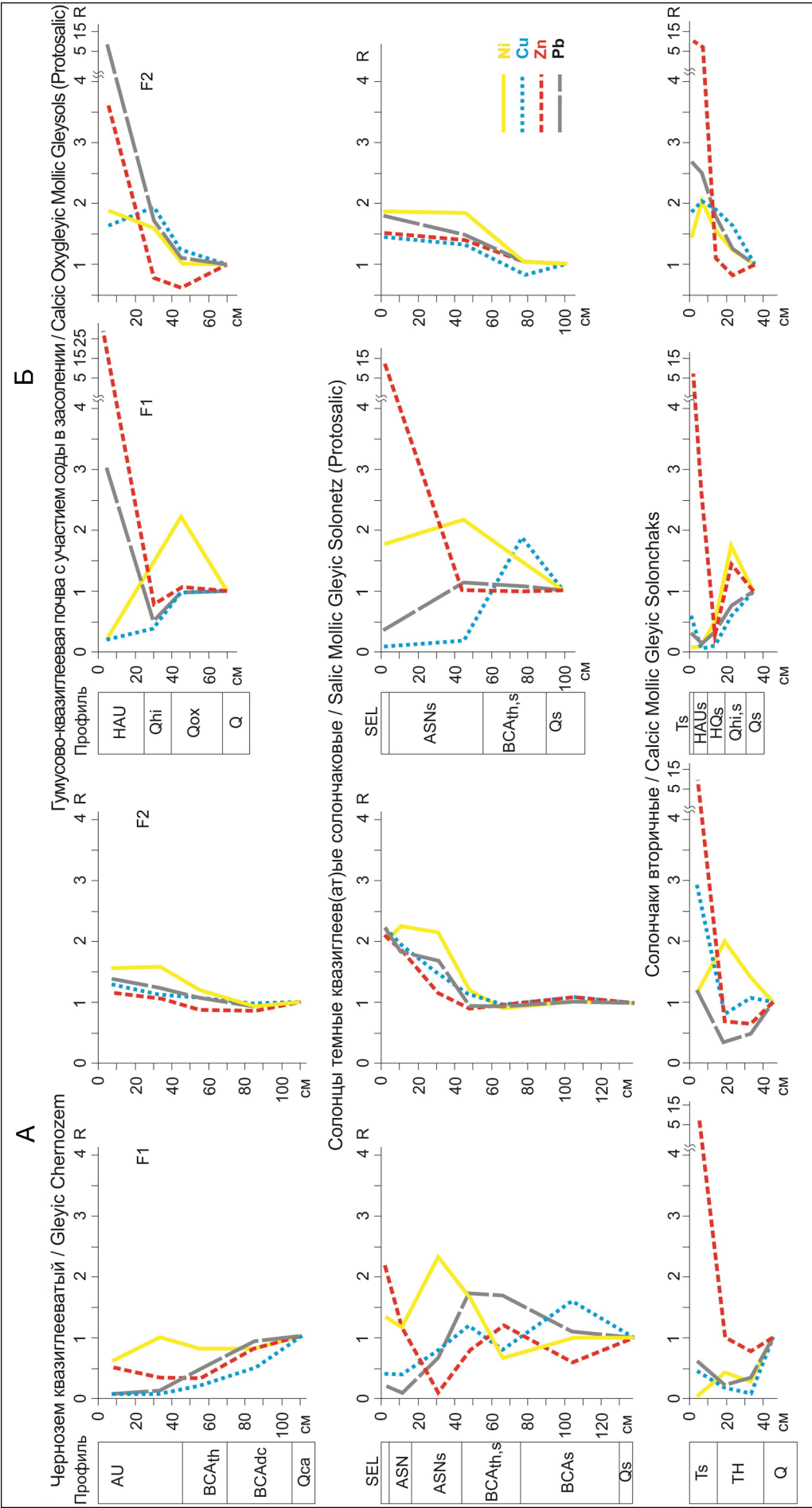


Рис. 2. Распределение (согласно значению R) F1 и F2 форм Ni, Cu, Zn, Pb в почвах участков: А – Барабушка; Б – Чаны

Fig. 2. R-value based distribution of F1 and F2 fractions of Ni, Cu, Zn, Pb in the soils of: А – Barabushka site; Б – Chany site

Таблица 2

Корреляционные зависимости между содержанием подвижных форм ТМ и свойствами почв

Участок и выборка	Показатель	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
Барабушка. Общая выборка почв (<i>n</i> = 58)	pH	0,01	0,19	0,51	-0,21	0,54
	Na ⁺	0,40	-0,12	0,27	0,38	0,25
	Mg ²⁺	0,68	0,16	0,18	0,45	0,22
	Ca ²⁺	0,66	0,14	0,11	0,43	0,19
	Cl ⁻	0,66	0,11	0,25	0,53	0,30
	NO ₃ ⁻	-0,03	-0,38	-0,19	0,30	-0,17
	SO ₄ ²⁻	0,66	0,14	0,18	0,50	0,27
	Щ _{общ}	0,09	-0,23	0,33	0,19	0,27
	Физ. глина	-0,13	0,32	0,49	-0,39	0,45
	C _{орг}	-0,01	-0,41	-0,67	0,21	-0,60
Барабушка. Выборка почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия (<i>n</i> = 20)	EC	-0,62	-0,80	-0,30	0,45	-0,52
	pH	0,68	0,56	0,16	-0,28	0,61
	Na ⁺	-0,61	-0,86	-0,19	0,45	-0,58
	Mg ²⁺	-0,79	-0,89	-0,25	0,37	-0,74
	Ca ²⁺	-0,59	-0,61	-0,20	0,22	-0,54
	Cl ⁻	-0,63	-0,77	-0,09	0,43	-0,58
	NO ₃ ⁻	-0,41	-0,60	-0,22	0,30	-0,33
	SO ₄ ²⁻	-0,71	-0,73	-0,29	0,25	-0,68
	Щ _{общ}	-0,27	-0,59	0,14	0,45	-0,11
	Физ. глина	0,58	0,78	0,29	-0,54	0,70
	C _{орг}	-0,82	-0,83	-0,47	0,33	-0,82
Чаны. Общая выборка почв (<i>n</i> = 60)	pH	-0,01	0,39	0,43	-0,58	0,34
	Na ⁺	0,38	-0,19	-0,20	0,47	0,11
	Mg ²⁺	0,37	-0,24	-0,23	0,55	0,05
	Ca ²⁺	0,30	-0,30	-0,20	0,52	0,03
	Cl ⁻	0,55	-0,00	-0,07	0,42	0,18
	NO ₃ ⁻	-0,00	-0,39	-0,24	0,37	-0,21
	SO ₄ ²⁻	0,39	-0,15	-0,10	0,42	0,16
	Щ _{общ}	-0,07	-0,11	0,06	-0,19	0,19
	Физ. глина	0,26	0,65	0,60	-0,48	0,52
	C _{орг}	0,01	-0,50	-0,64	0,61	-0,39
Чаны. Выборка почв, засоленных хлоридами и сульфатами натрия (<i>n</i> = 30)	EC	-0,40	-0,64	-0,50	0,70	-0,33
	pH	0,46	0,74	0,54	-0,68	0,48
	Na ⁺	-0,54	-0,74	-0,57	0,67	-0,53
	Mg ²⁺	-0,49	-0,75	-0,52	0,74	-0,49
	Ca ²⁺	0,35	0,57	0,43	-0,57	0,35
	Cl ⁻	-0,34	-0,50	-0,25	0,49	-0,40
	NO ₃ ⁻	-0,38	-0,41	-0,22	0,32	-0,41
	SO ₄ ²⁻	-0,33	-0,56	-0,31	0,57	-0,29
	Щ _{общ}	-0,27	-0,28	-0,22	-0,00	-0,22
	Физ. глина	0,45	0,68	0,64	-0,34	0,62
	C _{орг}	-0,70	-0,75	-0,82	0,48	-0,72

Примечание. Полуужирным шрифтом выделены отрицательные коэффициенты корреляции, полуужирным курсивным шрифтом – положительные, значимые при $p < 0,05$.

Наиболее выраженное обеднение засоленных почв (солончаки и гумусово-квизиглеевые) по сравнению с незасоленными (черноземы квизиглееватые) наблюдается для биофильных Ni и Co, что позволяет предположить их частичное накопление в фитоярусе, а также вынос с атмосферными осадками в глубь профиля в зимне-весенний период. Уменьшение сорбции Ni почвами и Co гидроксидами Mn при увеличении ионной силы раствора зафиксировано [Bowman et al., 1981; Краснопорова и др., 2017]. Для Cu и Pb разница между обеднением органических горизонтов засоленных и незасоленных почв выражена слабее. Однако в [Acosta et al., 2011] экспериментально установлено положительное влияние NaCl и Na₂SO₄ на десорбцию этих ТМ.

В исследованных типах почв наблюдается поверхностно-аккумулятивное, реже равномерное, распределение специфически сорбированных (*F2*) Co, Ni, Cu, Zn, Pb (см. рис. 2), что обусловлено преобладанием специфической сорбции ТМ над неспецифической в том случае, когда сорбентом выступает гумусовое вещество. Такое распределение не противоречит возможности уменьшения содержания *F1* ТМ в засоленных горизонтах гидроморфных почв за счет выноса, так как переход подвижных соединений ТМ в труднорастворимые формы (сульфиды, гидроксиды) маловероятен при актуальных pH, *Eh* и наличии карбонатов [Brookins, 1988]. Кроме того, в горизонтах Т и НАУ гидроморфных засоленных почв не наблюдается достоверного увеличения контрастности накопления *F2* ТМ (кроме Zn) по сравнению с АУ черноземов, что происходило бы в случае перехода *F1* ТМ в труднорастворимые формы.

В почвах с сульфатно-хлоридно-натриевым засолением значима обратная связь между содержанием солей (хлориды и сульфаты натрия и пр.), электропроводностью и содержанием подвижных форм Co, Cu, Ni, Pb (табл. 2). При этом в общих выборках почв (отдельно по участкам) обнаружены достоверные прямые связи между содержанием карбонатов и ТМ. Для участка Чаны также обнаружена достоверная прямая связь между C_{орг} и *F1* Zn. Таким образом, сильное засоление поверхностных горизонтов

гумусово-(перегнойно-)квизиглеевых почв и солончаков Барабы сульфатами и хлоридами натрия, а также нитратами может приводить к обеднению $F1$ Co, Cu, Ni, Pb. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных и гумусово-квизиглеевых почв, присутствие карбонатов в почвах способствуют закреплению ТМ в средней части профиля на комплексном щелочно-сорбционном барьере. Аккумуляция $F1$ Zn в поверхностных горизонтах, по-видимому, связана с его биогенным накоплением и сорбцией органическим веществом почв, но не зависит от типа засоления.

ВЫВОДЫ

В черноземах квизиглееватых распределение большинства подвижных форм ТМ регрессивное. Засоленные поверхностные горизонты гумусово-квизиглеевых солончаковых почв и солончаков обеднены $F1$ большинства ТМ (наиболее ярко – Ni). Для Zn выражена аккумуляция в поверхностных горизонтах засоленных почв и черноземов квизиглее-

ватых солонцеватых. В солонцах темных и других почвах с присутствием соды накапливаются $F1$ Ni, Cu, Pb в средней части профиля.

В пределах исследуемых участков выявлено засоление сульфатами, хлоридами и нитратами натрия перегнойно- и гумусово-квизиглеевых почв (с участием соды на участке «Чаны») и солончаков, засоление содой совместно с Na_2SO_4 – солонцов темных и чернозема солонцеватого разной степени гидроморфности. Черноземы квизиглееватые участка «Барабушка» не засолены.

Засоление Na_2SO_4 , NaCl и NaNO_3 поверхностных горизонтов гумусово-квизиглеевых почв и солончаков приводит к выносу из них подвижных Co, Ni, Cu, Pb. Сульфатно-содовое засоление солонцов темных и присутствие соды в гумусово-квизиглеевых почвах вызывает аккумуляцию подвижных Ni, Cu, Pb в средней части профиля. Распределение подвижного Zn обусловлено его биогенным накоплением и специфической сорбцией органическим веществом AU, HAU и T горизонтов почв.

Благодарности. Авторы благодарны Л.В. Добрыдневой, П.Р. Енчилик, М.Т. Казинскому, Е.Д. Николаеву и А.И. Якушеву, а также группе В.К. Карандашева за выполнение химико-аналитических работ. Полевые исследования выполнены в рамках проекта РНФ № 17-77-20072, интерпретация результатов – в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анопоченко Л.Ю., Якутин М.В. Аридизация климата юга Западной Сибири и засоление почв // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 207–211.
- Воробьева Л.А., Рудакова Т.А. О возможности прогноза состояния некоторых химических элементов в природных водных растворах по диаграммам растворимости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 1981. № 4. С. 3–12.
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Елизарова Т.Н., Дитц Л.Ю., Сысо А.И., Смоленцев Б.А., Чичулин А.В., Зыбина Т.В. Современные и реликтовые свойства почв лесостепных ландшафтов Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2005. № 5. С. 871–883.
- Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
- Красноперова А.П., Ефимова Н.В., Юхно Г.Д., Софроню Д.С. Влияние ионной силы и кислотности раствора на сорбционную способность $\text{MnO}(\text{OH})$ к радионуклидам ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{60}Co // Вестн. Новгородского гос. ун-та. 2017. № 5(103). С. 2–25.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Мирошников А.Ю., Асадулин Э.Э., Семенов И.Н. Оценка плотности глобальных выпадений цезия-137 по данным его содержания в закрытых геохимических аренах юга Западной
- Сибири // ДАН. 2016. Т. 468. № 3. С. 328–331. DOI: 10.7868/S0869565216150202.
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Комбинированный прием фракционирования соединений металлов в почвах // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1324–1333.
- Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Байэр Т.В., Сушкова С.Н., Кушнерова А.В. Влияние сопутствующего аниона на баланс катионов в системе «почва – раствор» (на примере чернозема обыкновенного) // Почвоведение. 2014. № 8. С. 932–940. DOI: 10.7868/S0032180X14080103.
- Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии / под ред. А.Л. Иванова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Рос. сельхозакадемии, 2013. Т. 1. 756 с.
- Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологические последствия применения противогололедных реагентов для почв Восточного округа Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 40–49.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.
- Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы: монография / под ред. Р.В. Ковалева. Новосибирск: Наука, 1974. Т. 1. 309 с.

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils, *Chemosphere*, 2011, vol. 85, no. 8, p. 1318–1324, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.046.
- Bischoff N., Mikutta R., Shibistova O., Dohrmann R., Herdtle D., Gerhard L., Fritzsche F., Puzanov A., Silanteva M., Grebennikova A., Guggenberger G. Organic matter dynamics along a salinity gradient in Siberian steppe soils, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 13–29, DOI: 10.5194/bg-15-13-2018.
- Bowman R.S., Essington M.E., O'Connor G.A. Soil sorption of nickel: influence of solution composition, *Soil Science Soc. American Journal*, 1981, no. 45, p. 860–865, DOI: 10.2136/sssaj1981.03615995004500050007x.
- Brookins D.G. *Eh – pH diagrams for geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1988, 176 p.
- Semenkov I.N., Koroleva T.V. The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia, *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 106, p. 1–6, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.010.
- Semenkov I.N., Koroleva T.V. Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards, *Geoderma regional*, 2020, vol. 21, p. e00283, DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00283.

Поступила в редакцию 27.02.2020

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 22.11.2021

SALINITY AS A FACTOR CONTROLLING THE DISTRIBUTION OF HEAVY METAL MOBILE FRACTIONS IN SOILS OF THE BARABA FOREST-STEPPE

A.D. Iovcheva¹, P.P. Krechetov², I.N. Semenov³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, the Russian Academy of Sciences,
Pushchino, Ph.D. student

¹ Technician; e-mail: y_nastia@mail.ru

² Associate Professor; Ph.D. in Biology; e-mail: krechetov@mail.ru

³ Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

To assess the influence of salinity and chemical composition of readily soluble salts on the partitioning of heavy metals in soils of the Baraba forest-steppe, the vertical distribution of Co, Ni, Cu, Zn and Pb mobile fractions extracted by acetate-ammonium buffer and 1N HNO₃ and the total Co, Ni, Cu, Zn and Pb content were studied in associated Salic Mollic Gleyic Solonetz, Gleyic Chernozems, Calcic Oxygleyic Mollic Gleysols (Protosalic) with different salinity and Calcic Mollic Gleyic Solonchaks within two key sites. The amount of toxic salts varied from <0.1% (no salinization) in Gleyic Chernozems to 3% (very strong salinization) in Solonchak topsoils. Some Gleyic Chernozems show the signs of alkalinization. Salinization of A and O horizons of Gleysols and Solonchaks by Na₂SO₄, NaCl and NaNO₃ increases the mobility of Co, Ni, Cu and Pb and supports their removal from topsoil horizons by radial and lateral flows. Mixed Na₂SO₄ and NaHCO₃ salinization of Solonetz and Gleysols leads to heavy metals accumulation on the alkaline-sorption barrier in Bn and Bk horizons. The distribution of Zn mobile fractions in the investigated soils is primarily determined by its biogenic accumulation due to the sorption and precipitation mechanisms.

Keywords: salt effected soils, forest-steppe, potentially toxic elements, catena, geochemical barriers

Acknowledgements. The authors are grateful to L.V. Dobrydneva, P.R. Enchilik, M.T. Kazinskiy, E.D. Nikolaev, A.I. Yakushev and V.K. Karandashev's group for the chemical-analytical operations. Field investigations were financially supported by the Russian Science Foundation (project No 17-77-20072); the results were interpreted under the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University "Future Planet and Global Environmental Change".

REFERENCES

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils, *Chemosphere*, 2011, vol. 85, no. 8, p. 1318–1324, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.046.
- Anopchenko L.Yu., Yakutin M.V. Aridizatsiya klimata yuga Zapadnoi Sibiri i zasolenie pochv [Increase in dryness of a climate in the south of Western Siberia and increase of salinity in soils], *Interesko GEO-Sibir'*, 2012, vol. 2, no. 3, p. 207–211. (In Russian)
- Bischoff N., Mikutta R., Shibistova O., Dohrmann R., Herdtle D., Gerhard L., Fritzsche F., Puzanov A., Silanteva M., Grebennikova A., Guggenberger G. Organic matter dynamics along a salinity gradient in Siberian steppe soils, *Biogeosciences*, 2018, vol. 15, no. 1, p. 13–29, DOI: 10.5194/bg-15-13-2018.

- Bowman R.S., Essington M.E., O'Connor G.A. Soil sorption of nickel: influence of solution composition, *Soil Science Soc. American Journal*, 1981, no. 45, p. 860–865, DOI: 10.2136/sssaj1981.03615995004500050007x.
- Brookins D.G. *Eh – pH diagrams for geochemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 1988, 176 p.
- Elizarova T.N., Dittz L.Yu., Syso A.I., Smolentsev B.A., Chichulin A.V., Zybina T.V. Sovremennye i reliktovyie svoistva pochv lesostepnykh landshtafrov Zapadnoi Sibiri [Modern and relict properties of soils of forest-steppe landscapes of West Siberia], *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, no. 5, p. 871–883. (In Russian)
- Grigor'ev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust], Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009, 382 p. (In Russian)
- Il'in V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoi oblasti* [Trace nutrients and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region], Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2001, 229 p. (In Russian)
- Krasnopoyrova A.P., Efimova N.V., Yukhno G.D., Sofronov D.S. Vliyanie ionnoi sily i kislotnosti rastvora na sorbtionnyuyu sposobnost' MnO(OH) k radionuklidam ^{90}Sr , ^{137}Cs i ^{60}Co [Effect of ionic strength and acidity of the solution on the sorption capacity of MnO(OH) for radionuclides ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{60}Co], *Vestn. Novgorodskogo Gos. un-ta*, 2017, no. 5(103), p. 22–25. (In Russian)
- Laverov N.P., Velichkin V.I., Miroshnikov A.Yu., Asadulin En E., Semenov I.N. Estimate of the density of global fallout of cesium-137 according to the data of its content in closed geochemical arenas of southwestern Siberia, *Doklady earth sciences*, 2016, vol. 468, no. 3, p. 532–535, DOI: 10.1134/S1028334X16050226.
- Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G., Kryshchenko V.S., Mandzhieva S.S. Combined approach for fractioning metal compounds in soils, *Eurasian soil science*, 2008, vol. 41, no. 11, p. 1171–1179, DOI: 10.1134/S1064229308110057.
- Minkina T.M., Pinskiy D.L., Mandzhieva S.S., Bauer T.V., Sushkova S.N., Kushnareva A.V. Effect of an attendant anion on the balance of cations in the soil-solution system with an ordinary chernozem as an example, *Eurasian soil science*, 2014, vol. 47, no. 8, p. 772–780, DOI: 10.1134/S1064229314080109.
- Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii* [Scientific principles for preventing soil (land) degradation of arable areas in Russia and forming the systems of their fertility reproduction through the adaptive-landscape agriculture], A.L. Ivanov (ed.), Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Science In-te Publ., 2013, vol. 1, 756 p. (In Russian)
- Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S. Ekologicheskie posledstviya primeneniya protivogolodnykh reagentov dlya pochv Vostochnogo okruga Moskvy [Ecological impact of antiglaze treatment on soils of the Eastern district of Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 40–49. (In Russian)
- Perel'man A.I. *Geokhimiya landshtafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1966, 392 p. (In Russian)
- Semenov I., Koroleva T. Heavy metals content in soils of Western Siberia in relation to international soil quality standards, *Geoderma regional*, 2020, vol. 21, p. e00283, DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00283.
- Semenov I.N., Koroleva T.V. The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia, *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 106, p. 1–6, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.04.010.
- Struktura, funktsionirovanie i evolyutsiya sistemy biogeotsenozov Baraby* [Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses system], R.V. Kovalev (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, vol. 1, 309 p. (In Russian)
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in Western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, p. 32, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Vorob'eva L.A., Rudakova T.A. O vozmozhnosti prognoza sostoyaniya nekotorykh khimicheskikh elementov v prirodnykh vodnykh rastvorakh po diagrammam rastvorimosti [About the possibility of forecasting the state of some chemical elements in natural aqueous solutions by solubility diagrams], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 1981, no. 4, p. 3–12. (In Russian)

Received 27.02.2020

Revised 15.06.2021

Accepted 22.11.2021