МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

УДК 631.41

doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-53-67

Концентрация элементов-загрязнителей в почвах ландшафта р. Беседь

Геннадий Владимирович Чекин¹, Андрей Леонидович Силаев²,
Евгений Владимирович Смольский³

^{1, 2, 3}Брянский государственный аграрный университет, Кокино, Российская Федерация

¹gb-swamp@yandex.ru

²kafeap@bgsha.com

³sev_84@mail.ru

Аннотация. Цель: исследовать распределение и концентрации элементов-загрязнителей в аллювиальных почвах различных элементов пойменного ландшафта и их связь с показателями плодородия. **Материалы и методы:** валовое содержание элементов определено атомно-абсорбционным методом, агрохимические показатели плодородия почв устанавливали по общепринятым методикам. Рассчитали изменчивость концентраций элементов-загрязнителей по слоям через 5 см до 20 см исследуемых почв и кларк концентрации. **Результаты:** убывающие ряды концентраций элементов-загрязнителей имеют общую схожую структуру, что объясняется однотипными биогеохимическими условиями пойменного режима. Некоторые отличия присутствуют в почве притеррасной пойменной подсистемы, что может объясняться отличием водного режима и окислительно-восстановительных условий данной территории от других частей поймы и варьированием горизонтальной и вертикальной подвижности элементов-загрязнителей. **Выводы:** концентрации элементов-загрязнителей в почвах пойменного ландшафта р. Беседь не превышают величину кларка. Исключение составляет Cd в почве центральной подсистемы поймы и Cu и Cd в почве притеррасной подсистемы поймы. Вертикальное распределение элементов-загрязнителей в слое 0–20 см определяется химическими свойствами элемента и генезисом почв пойменных подсистем и может быть равномерным или с концентрированием в отдельных слоях. В пойменном ландшафте р. Беседь кларк концентрации элементов-загрязнителей и их концентрации возрастают от прирусловой к притеррасной подсистеме поймы для Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Mo, As. Для Mn и Cd максимумы обнаружены в центральной подсистеме пойменного ландшафта. Высокий кларк концентрации кадмия и свинца, нетипичный для почв пойменных ландшафтов данного региона, и особенности распределения данных элементов могут указывать на их антропогенное происхождение. Корреляционный анализ выявил значимую положительную связь между содержанием органического вещества, обменных катионов и концентрацией Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Co, As.

Ключевые слова: аллювиальные почвы, ландшафт поймы, элементы-загрязнители, содержание, кларк концентрации, плодородие, корреляция

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Original article

Pollutant elements concentration in the landscape soils of the Besed' river

Gennadiy V. Chekin¹, Andrey L. Silaev², Evgeniy V. Smolskiy³

^{1, 2, 3}Bryansk State Agrarian University, Kokino, Russian Federation

¹gb-swamp@yandex.ru

²kafeap@bgsha.com

³sev_84@mail.ru

Abstract. Purpose: to study the distribution and concentration of pollutant elements in alluvial soils of various elements of the floodplain landscape and their relationship with fertility indicators. **Materials and methods:** the gross content of elements was determined by the atomic absorption method, the soil fertility agrochemical indicators were determined according to generally accepted methods. The variability of the pollutant element concentrations in layers in 5 cm to 20 cm of the studied soils and the concentration clarke were calculated. **Results:** the decreasing series of concentrations of pollutants have a general similar structure, which is explained by the same type of biogeochemical conditions of the floodplain regime. Some differences are present in the soil of the near-terrace floodplain subsystem, which can be explained by the difference in the water regime and redox conditions of this territory from other parts of the floodplain and by the variation in the horizontal and vertical mobility of pollutant elements. **Conclusions:** the concentration of pollutant elements in the soils of the floodplain landscape of the Besed' river does not exceed the clarke value. The exception is Cd in the soil of the floodplain central subsystem and Cu and Cd in the soil of the floodplain near-terrace subsystem. The vertical distribution of pollutant elements in the 0–20 cm layer is determined by the element chemical properties and the genesis of the floodplain subsystem soils and can be uniform or concentrated in separate layers. In the floodplain landscape of the Besed' river the clarke concentrations of pollutants and their concentrations increase from the near-river to the near-terrace subsystem of the floodplain for Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Mo, As. For Mn and Cd, the maxima were found in the central subsystem of the floodplain landscape. The high clarke concentration of cadmium and lead, which is atypical for the soils of the floodplain landscapes of this region, and the peculiarities of these elements distribution may indicate their anthropogenic origin. Correlation analysis revealed a significant positive relationship between the content of organic matter, exchangeable cations and Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Co, As concentration.

Keywords: alluvial soils, floodplain landscape, pollutant elements, content, concentration clarke, fertility, correlation

Введение. Распределение и концентрации химических элементов в аллювиальных почвах ландшафта пойм изменяются в результате действия ряда факторов, таких как неоднородность почвенного покрова, пойменность, показатели почвенного плодородия, антропогенное воздействие [1–3].

Аллювиальные почвы аккумулируют химические элементы, как поступающие с бассейна водосбора, так и приносимые с паводковыми водами. Это обуславливает особую роль данных почв как маркера техногенно-геохимических преобразований в бассейне реки. Занимая сравнительно небольшие площади, аллювиальные почвы играют важную роль в кормопроизводстве [4–7].

С точки зрения ландшафтно-геохимических исследований в пойменных ландшафтах наибольшей информативностью обладает корнеобитаемый слой почв, включающий собственно гумусовый горизонт и частично следующий за ним слой аллювия разной степени вовлеченности в почвообразовательный процесс. Свойства данного слоя являются как чувствительным индикатором техногенного загрязнения, так и показателем возможности формирования урожая естественных кормовых трав [8–10].

В связи с этим выяснение особенностей рассеивания и концентрации элементов-загрязнителей в аллювиальных почвах является актуальным.

Цель исследования – изучить распределение и концентрации элементов-загрязнителей в аллювиальных почвах различных элементов пойменного ландшафта и их связь с показателями плодородия.

Материалы и методы. Исследования проводили в ландшафте поймы р. Беседь в западной части Брянской области. Территория представляет собой определенный набор сочетаний подсистем, которые образуют ландшафт конкретной поймы, обуславливающий индивидуальные закономерности поступления, накопления, перемещения элементов. Отбор почвенных образцов для определения концентрации элементов-загрязнителей проводили в разных по геоморфологии и гидрологии подсистемах пойменного ландшафта (рисунок 1).

На рисунке 1 отражено местоположение отбора почвенных образцов: РФ, Брянская область, Красногорский район, с. Батуровка, левый берег р. Беседь. Соответствие точек отбора почвенных образцов и аллювиальных почв представлено в таблице 1. Средние показатели плодородия исследуемых почв прирусловой поймы: pH_{KCl} 5,26 ед., $C_{общ}$ 1,98 %, P_2O_5 310 мг/кг, K_2O 54 мг/кг, обменный Ca 5,47 ммоль/100 г, обменный Mg 1,16 ммоль/100 г; центральной поймы: pH_{KCl} 4,52 ед., $C_{общ}$ 3,15 %, P_2O_5 241 мг/кг, K_2O 74 мг/кг, обменный Ca 9,72 ммоль/100 г, обменный Mg 1,66 ммоль/100 г; притеррасной поймы: pH_{KCl} 4,50 ед., $C_{общ}$ 13,83 %, P_2O_5 362 мг/кг, K_2O 156 мг/кг, обменный Ca 22,47 ммоль/100 г, обменный Mg 2,22 ммоль/100 г.

Рисунок 1 – Расположение точек отбора почвенных образцов

Таблица 1 – Концентрация элементов-загрязнителей в верхней части почв поймы р. Беседь

В мг/кг

Почва	Мощность слоя, см	Элемент									
		Cu	Ni	Zn	Mn	Cr	Cd	Pb	Co	Mo	As
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Аллювиальная дерновая кислая слоистая примитивная укороченная супесчаная (P19)	0–5	12,67	0,00	14,03	450,82	125,52	0,04	3,98	0,32	0,01	0,21
	5–10	8,07	6,06	13,23	353,11	66,99	0,03	7,22	0,33	0,01	0,21
	10–15	4,80	0,00	12,94	319,42	90,51	0,12	3,51	0,39	0,06	0,28
	15–20	7,56	0,00	11,70	266,18	28,31	1,02	3,74	0,40	0,04	0,30
Коэффициент вариации, %		39	200	7	22	52	159	38	11	89	19
Аллювиальная дерновая кислая маломощная укороченная тяжелосуглинистая (P18)	0–5	15,59	10,29	18,23	498,66	64,95	1,87	4,54	0,45	0,01	0,28
	5–10	8,22	0,46	17,54	510,12	104,74	0,57	4,42	0,41	0,04	0,40
	10–15	13,03	7,31	16,02	465,64	54,38	2,04	4,53	0,40	0,05	0,36
	15–20	8,29	15,09	20,51	382,76	49,13	1,85	2,84	0,41	0,01	0,31
Коэффициент вариации, %		32	74	10	12	37	43	20	5	91	16

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Аллювиальная перегонно- болотная тяже- лосуглинистая (P17)	0–5	37,29	16,73	57,88	539,09	194,55	0,81	6,28	0,95	0,01	0,57
	5–10	25,46	35,29	56,94	376,69	121,68	0,53	10,34	1,00	0,06	0,85
	10–15	28,10	24,60	42,39	298,52	103,05	0,72	8,20	0,74	0,02	0,99
	15–20	24,66	32,64	38,33	234,51	151,90	0,38	7,43	0,76	0,12	1,11
Коэффициент вариации, %		20	31	20	36	28	32	21	15	95	26
Кларки химических элементов (по А. П. Виноградову) в почвах мира		20	40	50	850	200	0,50	10	8	2	5

Образцы отбирались со стенки разреза. К анализам образцы подготавливали общепринятыми методами. Общий углерод определяли по ГОСТ 26213-91. Обменный калий и подвижный фосфор по ГОСТ Р 54650-2011. pH_{KCl} по ГОСТ 26483-85. Определение обменного кальция и магния по ГОСТ 26487-85. Разложение почв для валового определения элементов-загрязнителей осуществляли смесью концентрированных азотной и плавиковой кислот с помощью микроволновой системы MARS 6. Валовое содержание элементов-загрязнителей определяли атомно-абсорбционным методом (прибор: Shimadzu-7000, «Квант-Z.ЭТА», методика М-МВИ 80-2008). Анализы выполнены в Центре коллективного пользования приборным и научным оборудованием при ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ».

Варьирование содержания элементов-загрязнителей по слоям аллювиальных почв оценивали с использованием коэффициента вариации, который показывает степень изменчивости показателя [11].

Для характеристики степени концентрирования или рассеяния элементов-загрязнителей в почвах рассчитывали кларк концентрации (КК) по формуле: $KK = C_j/K$, где C_j – содержание элемента в почве; K – среднее содержание элемента в почвах мира. Геохимические индексы составлялись в виде ранжированных дробных показателей, где возле дробной черты – элементы с околосларковыми значениями ($KK = 1,1...0,9$), в числителе – элементы с содержанием выше кларка ($KK > 1,1$), в знаменателе – элементы с содержанием ниже кларка ($KK < 0,9$) [12].

Для выявления почвенных факторов, связанных с распределением элементов-загрязнителей, использовали корреляционный анализ по Спирмену, который позволяет в первом приближении определить связи между исследуемыми переменными, к ним в нашем случае относятся элементы-загрязнители и показатели почвенного плодородия. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием MS Excel 2016 и Statistica.

Результаты и обсуждение. Распределение концентраций элементов-загрязнителей в различных слоях почв подчиняется определенным закономерностям, обусловленным действием многих факторов, и является результатом сложных и многообразных биогеохимических процессов [13].

Концентрация химических элементов в различных подсистемах пойменного ландшафта, который расположен в зоне промывного водного режима и на который накладываются пойменный и водозастойный режимы, характеризуется значительной пестротой и сложностью. Формирование профиля в аллювиальных почвах обусловлено различным расположением на рельефе, длительностью поемного процесса, особенностями видового состава растительного покрова, разным гранулометрическим и минералогическим составом почв [14].

Проанализировав распределение химических элементов по слоям аллювиальных почв, выявили, что концентрации элементов-загрязнителей в аллювиальных почвах зависели от генезиса почвы и химических свойств элемента и колебались: Cu от 4,80 до 37,27; Ni от 0,00 до 35,88; Zn от 11,70 до 57,88; Mn от 234,51 до 539,09; Cr от 28,31 до 194,55; Cd от 0,03 до 2,04; Pb от 2,84 до 10,34; Co от 0,32 до 1,00; Mo от 0,01 до 0,12; As от 0,21 до 1,11 мг/кг.

Максимальные значения концентрации подавляющего большинства элементов-загрязнителей (Cu, Ni, Zn, Mn, Cr, Pb, Co, Mo, As) обнаружили в аллювиальной перегнойно-болотной тяжелосуглинистой почве притер-

расной подсистемы пойменного ландшафта, для почвы центральной подсистемы характерен максимум для Cd. Минимальные значения концентрации большинства элементов-загрязнителей (Cu, Ni, Zn, Cr, Cd, Co, Mo, As) обнаружены в почве прирусловой подсистемы пойменного ландшафта (таблица 1).

В центральной и притеррасной подсистемах пойменного ландшафта р. Беседь в отдельных слоях соответствующих почв выявили превышение кларков содержания: в аллювиальной дерновой кислой маломощной укороченной тяжелосуглинистой Cd в 4,08 раза, в аллювиальной перегнойно-болотной тяжелосуглинистой Cu в 1,86 раза, Zn в 1,16 раза. При этом если для притеррасной подсистемы превышение Cu и Zn наблюдали в слое почвы 0–5 см, то для центральной подсистемы превышение Cd характерно для более глубоких слоев.

Установили, что варьирование концентрации элементов-загрязнителей в пойменном ландшафте р. Беседь по слоям 5 см в слое 0–20 см зависело от химических свойств элемента и генезиса почв подсистем. По Б. А. Доспехову [11], изменчивость принято считать незначительной, если коэффициент вариации не превышает 10 %, средней, если он выше 10 %, но меньше 20 %, и значительной, если больше 20 %. Выявили, что распределение концентраций Zn и Co по профилю исследуемых почв в ландшафте поймы варьировало либо незначительно, либо средне, это говорит о равномерном вертикальном распределении элементов-загрязнителей. Для Ni, Cr, Cd и Mo характерна значительная изменчивость концентраций по профилю исследуемых почв в ландшафте поймы, что говорит о высокой локализации этих элементов в некоторых слоях. Изменчивость концентраций Cu, Mn, Pb и As зависела от особенностей развития подсистем ландшафта поймы.

Медиана концентрации элементов-загрязнителей в почвах пойменного ландшафта представлена в таблице 2, по которой рассчитаны значения кларков концентрации, отражающие уровни накопления или рассеива-

ния микроэлементов. При группировке КК и медианы концентрации элементов-загрязнителей в виде убывающего ряда получены следующие результаты (в числителе – КК, в знаменателе – концентрация):

приусловная подсистема	$Mn > Cu \approx Pb \approx Cr > Zn > Cd > Co \approx As > Mo > Ni$
центральная подсистема	$Mn > Cr > Zn > Cu > Pb > Co > As > Cd > Mo > Ni$
притеррасная подсистема	$Cd > Mn > Cu > Pb > Zn > Cr > Ni > As > Co > Mo$
	$Mn > Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > Cd > Co > As > Mo$
	$Cu > Cd > Zn > Pb > Ni > Cr > Mn > As > Co > Mo$
	$Mn > Cr > Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd > As > Mo$

Таблица 2 – Медиана концентрации элементов-загрязнителей в слое 0–20 см почв поймы р. Беседь

Почва	Элемент									
	Cu	Ni	Zn	Mn	Cr	Cd	Pb	Co	Mo	As
Аллювиальная дерновая кислая слоистая примитивная укороченная супесчаная	7,82	следы	13,09	336,27	78,75	0,08	3,86	0,36	0,02	0,25
Кларк концентрации	0,39	–	0,26	0,40	0,39	0,16	0,39	0,05	0,01	0,05
Аллювиальная дерновая кислая маломощная укороченная тяжелосуглинистая	10,66	8,80	17,89	482,15	59,67	1,86	4,48	0,41	0,02	0,34
Кларк концентрации	0,53	0,22	0,36	0,57	0,30	3,72	0,45	0,05	0,01	0,07
Аллювиальная перегнойно-болотная тяжелосуглинистая	26,78	28,62	49,67	337,61	136,79	0,63	7,82	0,86	0,04	0,92
Кларк концентрации	1,34	0,72	0,99	0,40	0,68	1,25	0,78	0,11	0,02	0,18

Убывающие ряды имеют общую схожую структуру, что объясняется однотипными биогеохимическими условиями пойменного режима, в котором формируются аллювиальные почвы. Некоторые отличия присутствуют в почве притеррасной пойменной подсистемы, что, вероятно, может объясняться отличием водного режима и окислительно-восстановительных условий данной территории от других частей поймы и, как следствие, варьированием горизонтальной и вертикальной подвижности элементов-загрязнителей. Обращает внимание относительно высокий кларк концентрации кадмия и свинца в рассматриваемых почвах. Нетипичность высоко-

го содержания данных элементов в почвах пойменных ландшафтов данного региона и особенности горизонтального варьирования могут указывать на их антропогенное происхождение.

Рассматривая горизонтальное распределение элементов-загрязнителей в пойменном ландшафте, установили следующую закономерность: кларк концентрации элементов-загрязнителей и их концентрации возрастают от прирусловой к притеррасной подсистеме поймы для Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Mo, As. Для Mn и Cd максимумы обнаружены в центральной подсистеме пойменного ландшафта.

При построении геохимического индекса в ассоциацию накапливающихся элементов относят элементы с относительной концентрацией > 1 , в группу рассеивающихся – с относительной концентрацией < 1 . Насколько меньше и насколько больше 1, решают в зависимости от выраженности региональной геохимической дифференциации по изучаемым элементам.

Результаты исследования позволяют отобразить обеспеченность аллювиальных почв пойменного ландшафта р. Беседь микроэлементами посредством геохимических индексов.

Геохимический индекс аллювиальной дерновой кислой слоистой примитивной укороченной супесчаной почвы:

$$\frac{\text{—}}{\text{Mo } 0,01; \text{As } 0,05; \text{Co } 0,05; \text{Cd } 0,16; \text{Zn } 0,26; \text{Cr } 0,39; \text{Pb } 0,39; \text{Cu } 0,39; \text{Mn } 0,40} \cdot$$

Геохимический индекс аллювиальной дерновой кислой маломощной укороченной тяжелосуглинистой почвы:

$$\frac{\text{Cd } 3,72}{\text{Mo } 0,01; \text{Co } 0,05; \text{As } 0,07; \text{Ni } 0,22; \text{Cr } 0,30; \text{Zn } 0,36; \text{Pb } 0,45; \text{Cu } 0,53; \text{Mn } 0,57} \cdot$$

Геохимический индекс аллювиальной перегнойно-болотной тяжелосуглинистой почвы:

$$\text{Zn } 0,99 \frac{\text{Cu } 1,34; \text{Cd } 1,25}{\text{Mo } 0,02; \text{Co } 0,11; \text{As } 0,18; \text{Mn } 0,40; \text{Cr } 0,68; \text{Ni } 0,72; \text{Pb } 0,78} \cdot$$

Рассматриваемые элементы-загрязнители в почвах прирусловой, центральной и притеррасной подсистем пойменного ландшафта р. Беседь по величине кларка концентрации относятся к группе рассеивающихся. Исключение составляет микроэлемент Cd в почве центральной подсистемы поймы, а также Cu и Cd в почве притеррасной подсистемы поймы, которые относятся к ассоциации накапливающихся.

Проведенный корреляционный анализ агрохимических показателей почвенного плодородия и концентрации элементов-загрязнителей выявил значимую положительную связь между содержанием органического вещества и концентрацией Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Co, As; значимую положительную связь между содержанием обменного кальция и магния и концентрацией Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Co, As; значимую положительную связь между содержанием обменного калия и концентрацией Cu, Zn, Cr, Pb (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ($n = 12$) валового содержания элементов-загрязнителей и показателей почвенного плодородия

Показатель	Микроэлемент									
	Cu	Ni	Zn	Mn	Cr	Cd	Pb	Co	Mo	As
P ₂ O ₅ , мг/кг	0,17	–0,25	–0,01	0,25	0,33	–0,14	0,05	–0,05	–0,37	–0,29
K ₂ O, мг/кг	0,71*	0,44	0,60	0,19	0,85	–0,40	0,62	0,40	–0,10	0,24
Ca, ммоль/100 г	0,80	0,65	0,77	0,29	0,71	–0,02	0,80	0,75	0,19	0,68
Mg, ммоль/100 г	0,75	0,57	0,69	0,08	0,68	–0,05	0,71	0,74	0,22	0,70
pH _{KCl} , ед.	–0,07	–0,46	–0,26	0,35	0,11	–0,11	–0,08	–0,25	–0,46	–0,56
C _{общ} , %	0,85	0,73	0,80	0,15	0,81	–0,10	0,78	0,75	0,16	0,68
* Статистически значимые величины коэффициента корреляции при заданных n выделены курсивом.										

Непараметрический коэффициент корреляции Спирмена позволяет избежать ошибок, возникающих из-за присутствия в выборках «отскоков», обуславливающих неоправданно высокие коэффициенты корреляции Пирсона, который оценивает степень линейной взаимосвязи нормально распределенных совокупностей [15].

Различные свойства почвы (рН, C_{общ}, емкость катионного обмена (ЕКО), гранулометрический состав) участвуют в различных процессах

почвообразования, включая удержание или поглощение элементов, в частности, через органические вещества и илистые частицы. Содержание органического углерода и илистые частицы в разной степени участвуют в удерживании или ремобилизации элементов, содержащихся в аллювиальных почвах.

Электроположительно заряженные элементы могут притягиваться к отрицательно заряженной поверхности органического вещества, глинистых частиц и оксидов Fe и Al, которые определяют катионообменную емкость. Поэтому высокая ЕКО снижает подвижность и доступность металла и увеличивает удержание катионов металлов. Как следствие, появление значимых корреляционных связей между ЕКО, органическим веществом и содержанием металлов в пойменных почвах [16–20].

Таким образом, рациональное использование почв ландшафта пойм должно основываться на знании геохимических индексов аллювиальных почв подсистем, чтобы четко осознавать дифференциацию почвенного покрова пойменного ландшафта по концентрации и распределению элементов-загрязнителей. Проведенные исследования подтверждают мысль об относительно низком содержании большинства элементов-загрязнителей в почвах естественных пойменных кормовых угодий.

Выводы

1 Концентрации элементов-загрязнителей в почвах пойменного ландшафта р. Беседь не превышают величин кларка. Исключение составляет Cd в почве центральной подсистемы поймы, а также Cu и Cd в почве притеррасной подсистемы поймы.

2 Вертикальное распределение элементов-загрязнителей в слое 0–20 см определяется химическими свойствами элемента и генезисом почв пойменных подсистем и может быть как равномерным, так и с концентрированием в отдельных слоях.

3 В пойменном ландшафте р. Беседь кларк концентрации элементов-

загрязнителей и их концентрации возрастают от прирусловой к притеррасной подсистеме поймы для Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Mo, As. Для Mn и Cd максимумы обнаружены в центральной подсистеме пойменного ландшафта.

4 Высокий кларк концентрации кадмия и свинца, нетипичный для почв пойменных ландшафтов данного региона, и особенности распределения данных элементов могут указывать на их антропогенное происхождение.

5 Корреляционный анализ показателей почвенного плодородия и концентраций элементов-загрязнителей выявил значимую положительную связь между содержанием органического вещества, содержанием обменных катионов и концентрацией Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Co, As.

Список источников

1. Фацевский Б. В. Экологическое значение поймы в речных экосистемах // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2007. № 5. С. 118–129.
2. How do long-term development and periodical changes of river-floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from European rivers / G. J. Lair, F. Zehetner, M. Fiebig, M. H. Gerzabek, C. A. M. van Gestel, T. Hein, S. Hohensinner, P. Hsu, K. C. Jones, G. Jordan, A. A. Koelmans, A. Poot, D. M. E. Slijkerman, K. U. Totsche, E. Bondar-Kunze, J. A. C. Barth // Environmental Pollution. 2009. Vol. 157. P. 3336–3346. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.004>.
3. Мартынов А. В. Содержание подвижных форм микроэлементов в аллювиальных почвах поймы среднего течения р. Амур и влияние на них паводка 2013 года // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 2. С. 32–39.
4. Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences / G. V. Dobrovolski, P. N. Balabko, N. V. Stasjuk, E. P. Bykova // Arid Ecosystems. 2011. Vol. 1, № 3. P. 119–124. DOI: 10.1134/S207909611103005X.
5. Почвы мелиорированной поймы верхнего течения реки Оки, используемые в интенсивном земледелии / П. Н. Балабко, А. А. Снег, Т. В. Локалина, В. Н. Щедрин // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 3(23). С. 116–137. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1101> (дата обращения: 21.03.2021).
6. Lead in iron-manganese concretions of varying size from alluvial soils and deposits / V. N. Oreshkin, V. S. Kuzmenkova, T. I. Ulyanochkina, P. N. Balabko // Geochemistry International. 2000. Vol. 38, № 6. P. 619–623.
7. Современное состояние экосистемы правобережной поймы Средней Десны и перспективы ее рационального использования / Д. Е. Просянкин, П. Н. Балабко, Е. В. Просянкин, Г. В. Чекин // Агрохимический вестник. 2012. № 5. С. 9–13.
8. Разработка комплекса мероприятий по коренному улучшению естественных кормовых угодий, загрязненных радионуклидом цезий-137 / В. Ф. Шаповалов, В. Г. Плющиков, Н. М. Белоус, А. А. Курганов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2014. № 1. С. 13–20.

9. Белоус Н. М. Развитие радиоактивно загрязненных территорий Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 3–11.

10. Эффективность комплекса защитных мероприятий при возделывании многолетних трав на радиоактивно загрязненных пойменных лугах / Н. Н. Бокатуро, А. А. Справцев, А. А. Асташина, С. Н. Поцепай, В. Ф. Шаповалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2020. Т. 15, № 2. С. 159–172.

11. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

12. Прохорова Н. В. Ландшафтный подход в региональных эколого-геохимических исследованиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2004. Т. 6, № 2. С. 259–265.

13. Протасова Н. А., Щербаков А. П. Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // Почвоведение. 2004. № 1. С. 50–59.

14. Шиманская А. А., Позняк С. С. Профильное распределение меди, цинка и свинца в пойменных почвах Мозырского Полесья // Экологический вестник. 2016. № 1. С. 118–123.

15. Самсонова В. П., Мешалкина Ю. Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 164–182.

16. Factors affecting metal concentrations in the upper sediment layer of intertidal reedbeds along the river Scheldt / G. Du Laing, P. De Grauwe, W. Moors, B. Vandecasteele, E. Lesage, E. Meers, F. M. G. Tack, M. G. Verloo // Journal of Environmental Monitoring. 2007. № 9. P. 449–455. DOI: 10.1039/b618772b.

17. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review / G. Du Laing, J. Rinklebe, B. Vandecasteele, E. Meers, F. M. G. Tack // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407, iss. 13. P. 3972–3985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.025>.

18. Shiva Kumar D., Srikantaswamy S. Factors affecting on mobility of heavy metals in soil environment // International Journal for Scientific Research & Development [Electronic resource]. 2014. Vol. 2, iss. 3. P. 201–203. URL: <http://www.ijserd.com/articles/IJSRDV2I3073.pdf> (date of access: 21.03.2021).

19. Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils / B. Rutkowska, W. Szulc, K. Bomze, D. Gozdowski, E. Szychaj-Fabisiak // International Journal of Environmental Science and Technology. 2015. 12(5). P. 1687–1694. DOI: 10.1007/s13762-014-0546-7.

20. Rinklebe J., Knox A. S., Paller M. Redox reactions of heavy metal(loid)s in soils and sediments in relation to bioavailability and remediation // Trace Elements in Waterlogged Soils and Sediments. CRC Press, 2016. P. 27–46.

References

1. Fashchevsky B.V., 2007. *Ekologicheskoye znachenie poymy v rechnykh ekosistemakh* [Ecological significance of floodplain in river ecosystems]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Russian State Hydrometeorological University], no. 5, pp. 118–129. (In Russian).

2. Lair G.J., Zehetner F., Fiebig M., Gerzabek M.H., Van Gestel C.A.M., Hein T., Hohensinner S., Hsu P., Jones K.C., Jordan G., Koelmans A.A., Poot A., Slijkerman D.M.E., Totsche K.U., Bondar-Kunze E., Barth J.A.C., 2009. How do long-term development and periodical changes of river – floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from

European rivers. *Environmental Pollution*, vol. 157, pp. 3336-3346, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.004>.

3. Martynov A.V., 2019. *Soderzhanie podvizhnykh form mikroelementov v allyuvial'nykh pochvakh poymy srednego techeniya r. Amur i vliyanie na nikh pavodka 2013 goda* [Content of mobile forms of microelements in alluvial soils of the floodplain of the middle reaches of the Amur river and the impact of the 2013 flood on them]. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Bulletin VSU. Series: Geography. Geoecology], no. 2, pp. 32-39. (In Russian).

4. Dobrovol'ski G.V., Balabko P.N., Stasjuk N.V., Bykova E.P., 2011. Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences. *Arid Ecosystems*, vol. 1, no. 3, pp. 119-124, DOI: 10.1134/S207909611103005X.

5. Balabko P.N., Sneg A.A., Lokalina T.V., Shchedrin V.N., 2016. [Soils of the reclaimed floodplain of the upper reaches of the Oka river, used in intensive agriculture]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 3(23), pp. 116-137, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1101> [accessed 21.03.2021]. (In Russian).

6. Oreshkin V.N., Kuzmenkova V.S., Ulyanochkina T.I., Balabko P.N., 2000. Lead in iron-manganese concretions of varying size from alluvial soils and deposits. *Geochemistry International*, vol. 38, no. 6, pp. 619-623.

7. Prosyannikov D.E., Balabko P.N., Prosyannikov E.V., Chekin G.V., 2012. *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy pravoberezhnoy poymy Sredney Desny i perspektivy ee ratsional'nogo ispol'zovaniya* [The current state of the ecosystem of the right-bank floodplain of the Middle Desna and the prospects for its rational use]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 5, pp. 9-13. (In Russian).

8. Shapovalov V.F., Plyushchikov V.G., Belous N.M., Kurganov A.A., 2014. *Razrabotka kompleksa meropriyatiy po korennomu uluchsheniyu estestvennykh kormovykh ugodiy, zagryaznennykh radionuklidom tseziy-137* [Development of a set of measures for radical improvement of natural forage lands contaminated with radionuclide cesium-137]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bull. of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Livestock], no. 1, pp. 13-20. (In Russian).

9. Belous N.M., 2018. *Razvitie radioaktivno zagryaznennykh territoriy Bryanskoy oblasti v otdalennyi period posle avarii na Chernobyl'skoy AES* [Development of radioactive contaminated territories of Bryansk region in the remote period after the Chernobyl nuclear power plant accident]. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bull. of Bryansk State Agricultural Academy], no. 1, pp. 3-11. (In Russian).

10. Bokaturo N.N., Spravtsev A.A., Astashina A.A., Potsepay S.N., Shapovalov V.F., 2020. *Effektivnost' kompleksa zashchitnykh meropriyatiy pri vozdeystvovanii mnogoletnikh trav na radioaktivno zagryaznennykh poymennykh lugakh* [The efficiency of complex protective measures in cultivating perennial grasses on radioactively contaminated floodplain meadows]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bull. of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Livestock], vol. 15, no. 2, pp. 159-172. (In Russian).

11. Dospekhov B.A., 1985. *Metodika polevogo opyta* [Method of field experiment]. Moscow, Agropromizdat Publ., 351 p. (In Russian).

12. Prokhorova N.V., 2004. *Landshaftnyy podkhod v regional'nykh ekologo-geokhimicheskikh issledovaniyakh* [Concerning landscape approach to regional ecological and geochemical investigations]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bull. of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], vol. 6, no. 2, pp. 259-265. (In Russian).

13. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., 2004. *Osobennosti formirovaniya mikroelementnogo sostava zonal'nykh pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya* [Microelemental composition of zonal soils in the central chernozemic region]. *Pochvovedenie* [Soil Study], no. 1, pp. 50-59. (In Russian).

14. Shimanskaya A.A., Poznyak S.S., 2016. *Profil'noe raspredelenie medi, tsinka i svintsa v poymennykh pochvakh Mozyrskogo Poles'ya* [Profile distribution of copper, zinc and lead in floodplain soils of Mozyr Poles'e]. *Ekologicheskiiy vestnik* [Ecological Bulletin], no. 1, pp. 118-123. (In Russian).

15. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., 2020. *Chasto vstrechayushchiesya netochnosti i oshibki primeneniya statisticheskikh metodov v pochvovedenii* [Common inaccuracies and errors in the statistical methods application in soil science]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva* [Bull. of V.V. Dokuchaev Soil Institute], iss. 102, pp. 164-182. (In Russian).

16. Du Laing G., De Grauwe P., Moors W., Vandecasteele B., Lesage E., Meers E., Tack F.M.G., Verloo M.G., 2007. Factors affecting metal concentrations in the upper sediment layer of intertidal reedbeds along the river Scheldt. *Journal of Environmental Monitoring*, no. 9, pp. 449-455, DOI: 10.1039/b618772b.

17. Du Laing G., Rinklebe J., Vandecasteele B., Meers E., Tack F.M.G., 2009. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. *Science of the Total Environment*, vol. 407, iss. 13, pp. 3972-3985, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.025>.

18. Shiva Kumar D., Srikantaswamy S., 2014. Factors affecting on mobility of heavy metals in soil environment. *International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 2, iss. 3, pp. 201-203, available: <http://www.ijserd.com/articles/IJSRDV2I3073.pdf> [accessed 21.03.2021].

19. Rutkowska B., Szulc W., Bomze K., Gozdowski D., Spychaj-Fabisiak E., 2015. Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, no. 12(5), pp. 1687-1694, DOI: 10.1007/s13762-014-0546-7.

20. Rinklebe J., Knox A.S., Paller M., 2016. Redox reactions of heavy metal(loid)s in soils and sediments in relation to bioavailability and remediation. *Trace Elements in Waterlogged Soils and Sediments*. CRC Press, pp. 27-46.

Информация об авторах

Г. В. Чекин – доцент, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент;

А. Л. Силаев – заведующий кафедрой агрохимии, почвоведения и экологии, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент;

Е. В. Смольский – доцент, кандидат сельскохозяйственных наук.

Information about the authors

G. V. Chekin – Associate Professor, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor;

A. L. Silaev – Head of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Ecology, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor;

E. V. Smolskiy – Associate Professor, Candidate of Agricultural Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2021; одобрена после рецензирования 16.04.2021; принята к публикации 23.04.2021.

The article was submitted 09.03.2021; approved after reviewing 16.04.2021; accepted for publication 23.04.2021.