

УДК 546.815:550.42:631.416.8

СВИНЕЦ В ПОЧВАХ ДЕЛЬТЫ РЕКИ СЕЛЕНГА© 2021 г. С. Б. Сосорова^{a, *}, В. К. Кашин^a^aИнститут общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: soelma_sosorova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.

После доработки 23.04.2020 г.

Принята к публикации 25.05.2020 г.

Изучено пространственное и профильное распределение валового содержания свинца и содержания кислоторастворимой фракции свинца в пяти типах почв и в почвообразующих породах дельты р. Селенга. Низкое содержание свинца в почвообразующих породах (среднее значение 6.0 мг/кг), наряду с почвенно-геохимическими условиями, обуславливает его низкую концентрацию в почвах. Валовое содержание свинца в верхнем 0–20 см слое почв варьирует в пределах 3–17 мг/кг при среднем значении 10 мг/кг, что ниже ПДК и кларка в почвах мира. В аллювиальных болотных и аллювиальных дерновых почвах валовое содержание свинца в 2 раза больше, чем в аллювиальных луговых, серых лесных почвах и борových песках. Установлены различия в содержании свинца между почвами лево- и правобережной частей дельты. В аллювиальных болотных и аллювиальных луговых почвах доля кислоторастворимой фракции свинца от валового содержания составляет от 24 до 68%, в аллювиальных дерновых – 15–43%, в серых лесных почвах и борových песках – 11–26%. Профильное распределение свинца в большинстве почв элювиально-иллювиальное (аллювиальные болотные, аллювиальные луговые почвы, боровой песок) или аккумулятивно-элювиально-иллювиальное (дерновые, серые лесные почвы). Выявлена его аккумуляция в органогенном и глеевом горизонте аллювиальных болотных и луговых почв. В аллювиальных дерновых и серых лесных почвах, относительно однородных по гранулометрическому и минералогическому составу, свинец распределяется в профиле равномерно с некоторым обогащением дернины. Корреляционные зависимости валового содержания свинца от почвенных свойств оцениваются как слабые. Для содержания кислоторастворимой фракции свинца эти связи несколько сильнее. Результаты могут использоваться при организации биогеохимического мониторинга Байкальского региона.

Ключевые слова: тяжелые металлы, дельты, Fluvisols, Luvisols, Arenosols

DOI: 10.31857/S0032180X21020143

ВВЕДЕНИЕ

Свинец является одним из наиболее значимых факторов загрязнения биосферы. По глобальной антропогенной эмиссии в атмосферу, а также по вредности воздействия на организмы он занимает первое место среди рассеянных элементов [46]. Свинец не является биологически значимым, но достаточно распространенным, чтобы представлять серьезную биохимическую угрозу при повышенных концентрациях. Поэтому он отнесен к группе токсичных элементов [4]. Воздействие повышенных концентраций свинца отрицательно сказывается на репродуктивной, нервной, сердечно-сосудистой, иммунной и эндокринной системах [61].

Свинец относится к халькофильным элементам. На поведение свинца в почве, наряду с почвенно-геохимическими условиями, оказывают влияние особенности химических свойств элемента, прежде всего, электронной конфигурации атомов. На внешнем электронном уровне его ато-

ма ($6s^2 6p^2$) находится 4 электрона, которые являются валентными, поэтому в соединениях он может в двух- и четырехвалентной форме, в биосфере преобладает первая [44]. В почвах он находится главным образом в состоянии окисления Pb^{2+} (PbS). Это является причиной его слабой подвижности [63]. Состояние Pb^{4+} неустойчиво, при взаимодействии с кислотами дает растворимые соли, например, $Pb(NO_3)_2$.

Преобладающая часть соединений свинца в почве характеризуется небольшой подвижностью и высокой аккумулярующей способностью [35]. Это обусловлено тем, что, выступая в роли “промежуточной кислоты” (согласно концепции “жестких и мягких кислот и оснований” по Льюису), ионы свинца могут образовывать прочные связи с мягкими основаниями, а с жесткими основаниями – легко растворимые соединения [47, 60]. С жестким основанием OH^- свинец способен вступать в реакцию гидролиза с образованием $Pb(OH)_2$ в условиях нейтральной и щелочной реакции и по-

следующей конденсации $[\text{Pb}_6\text{O}(\text{OH})_6]^{4+}$ [11]. Если почва содержит растворимые фосфаты, то $\text{Pb}(\text{OH})_2$ переходит постепенно в $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ или другие труднорастворимые фосфаты [35].

Наибольшее влияние на состояние свинца в почвах оказывают следующие анионы: CO_3^{2-} , OH^- , S^{2-} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} [35], с которыми он образует соединения различной растворимости. Так, свинец формирует относительно слабые водные комплексы с хлорид, фторид, нитрат и сульфат ионами. Более прочные с карбонат-ионом, а наиболее устойчивые комплексы образуются с гидроксид-ионом.

Среди механизмов связывания Pb^{2+} почвой следует назвать осаждение его малорастворимых солей, поглощение гидроксидами металлов, силикатами и органическим веществом [63]. Он может активно связываться глинистыми минералами, карбонатами, оксидами железа и марганца, фосфатами [44, 63]. При этом оксиды железа в почвах могут непосредственно адсорбировать металлы, в то время как органическое вещество хелатирует и адсорбирует металлы через функциональные группы гуминовой кислоты, а глинистые минералы — через гидроксильные группы [65]. Органическим веществом почвы и глинистыми минералами свинец поглощается специфично [23]. Эти особенности способны определять процессы мобилизации, миграции элемента в почвах.

В связи с этим экогеохимический мониторинг содержания свинца, наряду с другими элементами [52], актуален в области здравоохранения, сельского хозяйства и охраны окружающей среды.

Несмотря на значительную историю изучения содержания свинца в почвах, исследование различных аспектов его поведения как в техногенных, так и в фоновых условиях разных регионов активно продолжается [28, 30, 33, 34, 37].

В Западном Забайкалье изучено содержание свинца в почвообразующих породах (дельвиальные отложения гранитоидов) и почвах автономных ландшафтов степной и сухостепной зон. Определены диапазоны и среднее содержание в них элемента [16, 25, 54]. Для гидроморфных ландшафтов, в частности, важной для экосистемы оз. Байкал дельты р. Селенга, имеются лишь фрагментарные данные по содержанию свинца в почвах [9, 12, 36, 48].

Дельта служит индикатором экологического состояния бассейна р. Селенга в целом. Это определяется тем, что через нее проходит около 50% годового стока речных вод и 60% терригенных наносов в оз. Байкал; экосистемы дельты являются своеобразным “биологическим фильтром”, способствующим очистке воды от различных примесей [13, 40].

В дельтовой части происходит отложение взвешенных веществ, в среднем ежегодно 2600 тыс. т. По данным [9], с водным стоком р. Селенга в

оз. Байкал в 2014 г. поступило соединений свинца около 7.7, в 2015 г. — 19 т.

Цель настоящего исследования — изучение содержания и распределения свинца в почвообразующих породах и почвах дельты р. Селенга. Задачи работы: определить характеристики содержания свинца в почвообразующих породах и почвах, выявить особенности пространственного и профильного распределения в почвах, выявить степень подвижности в почвах, оценить уровень содержания свинца в почвах с имеющимися нормативами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в дельте р. Селенга (самой крупной в мире пресноводной дельты), расположенной в центральной зоне юго-восточного побережья оз. Байкал. Она занимает площадь 1120 км². На этой территории расположен ряд населенных пунктов Кабанского района Республики Бурятия и производится сельскохозяйственная продукция. Карта-схема района исследования [70] приведена на рис. 1.

Дельта р. Селенга представлена системой террас и низких, большей частью заболоченных равнин и островов, разделенных протоками [21]. По физико-географическому районированию иссле-



Рис. 1. Карта-схема района исследования — дельты р. Селенга [70].

дуемая территория относится к Южно-Байкальскому таежно-равнинному округу Джидинско-Нижнеселенгинской котловинно-горнотаежной провинции Байкало-Джугджурской горнотаежной области [3]. Основные закономерности формирования почвенного покрова в дельте р. Селенга определяются рельефом и почвообразующими породами [12].

В качестве объектов исследований служили почвообразующие породы (аллювиальные, делювиальные, песчаные отложения) и различные типы почв дельты Селенги — аллювиальные (болотного, лугового, дернового ряда почвообразования (Fluvisols по классификации WRB [62])), серые лесные почвы (Luvisols) и боровые пески (Arenosols). Название типов почв даны по [26]. Всего отобрано 85 образцов из 15 разрезов, заложенных на типичных участках дельты с морфологическим описанием и взятием проб по генетическим горизонтам. В отобранных образцах после предварительной подготовки определяли содержание гумуса по методу Тюрина, общего азота по методу Кьельдаля, подвижных форм фосфора и калия по методу Мачигина, железа и алюминия по методу Тамма, обменных кальций и магний трилометрическим, рН — потенциометрическим методами, емкости поглощения по методу Бабко и Аскинази, карбонатов по методу Голубева, гранулометрического состава по методу Качинского [2].

Основные физико-химические свойства некоторых исследуемых почв приведены в табл. 1. Почвы характеризуются нейтральной или слабощелочной реакцией среды, невысоким содержанием гумуса, преобладанием в составе обменных оснований кальция, среднеобеспечены обменным калием и низко — подвижным фосфором. Гранулометрический состав почв изменялся от песчаного до среднесуглинистого.

Содержание свинца определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с пламенной атомизацией на приборе AAS Solaar M: валовое после разложения прокаленной почвы HF в присутствии H_2SO_4 (удельная масса 1.84) и перевода осадка в солянокислый раствор, а кислоторастворимой формы после экстракции 1 М раствором HCl в соотношении почва — экстрагент 1 : 10. Нижний предел обнаружения свинца в почвах 0.04 мг/кг. Погрешность анализа 7–10%. Аналитическая погрешность трехкратная. Статистическая обработка данных произведена стандартными методами с использованием программы Microsoft Excel.

Интенсивность перераспределения свинца по генетическим горизонтам оценивали коэффициентом радиальной дифференциации (R), представляющим собой отношение содержания элемента в том или ином генетическом горизонте ($C_{г.г.п.}$) к его содержанию в почвообразующей породе ($C_{п.о.п.}$): $R = C_{г.г.п.}/C_{п.о.п.}$. Данный показатель позволяет судить о накоплении ($R > 1.0$) или выносе ($R < 1.0$)

элемента в каждом горизонте почвенного профиля по сравнению с почвообразующей породой [1].

Вклад техногенной составляющей в общее содержание ТМ в почве рассчитывали, как отношение содержания ТМ в кислотной вытяжке к их валовому содержанию, выраженному в процентах. В зависимости от физико-химических свойств и гранулометрического состава для фоновых почв это отношение составляет 5–20%, а для техногеннозагрязненных — более 50% [27, 43].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свинец в почвообразующих породах. Почвообразующие породы дельты р. Селенга представлены в основном аллювиальными и иными рыхлыми осадочными отложениями четвертичного периода [22]. Их минералогический состав сформирован кварцем, полевыми шпатами, роговой обманкой, минералами группы эпидота, слюдой [5].

По данным [51], основными характерными минералами донных отложений дельты являются кварц (60–70%), полевые шпаты (15–20%), слюды (5–10%), а содержание таких минералов, как хромит, гранат, оливин, сфен, турмалин, рутил, дистен, силлиманит, амфиболы, эпидот, пироксены не превышает 5–8%.

Содержание свинца в почвообразующих породах дельты р. Селенга изменялось в пределах 4.7–10.9 мг/кг при среднем значении 6.0 ± 0.7 мг/кг (табл. 2), что ниже кларка литосферы и осадочных пород [10, 63], а также среднего содержания в почвообразующих породах — 34 мг/кг [25] и в аллювиальных отложениях степной и сухостепной зон Забайкалья — 24.5 мг/кг [16].

Низкое содержание свинца отмечено в почвообразующих породах, подстилающих аллювиальные болотные и луговые почвы. Относительно повышенное содержание свинца выявлено в супесчаных и песчаных отложениях (5.8–10.9 мг/кг), подстилающих аллювиальные дерновые и серые лесные почвы, которые занимают более высокое положение в рельефе дельты.

Причинами различий содержания свинца в породах дельты от его содержания в породах степной и сухостепной зон Забайкалья могут быть, прежде всего, разное содержание полевых шпатов, являющихся основными минералами-носителями свинца [25], а также выщелачивание элемента водой при выветривании в гидроморфных условиях дельты. Судя по содержанию полевых шпатов в донных отложениях дельты, можно предположить, что их количество в почвообразующих породах исследуемого района также невысокое.

Низкое содержание свинца в почвообразующих породах, подстилающих аллювиальные болотные и луговые почвы, возможно, связано с преобладанием пыли во фракции физической глины и миграцией его растворимых соединений в виде водных

Таблица 1. Основные физико-химические свойства почв дельты р. Селенги

Горизонт	Глубина, см	pH _{H2O}	C _{орг} , %	N, %	P ₂ O ₅		K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		СаСО ₃ , %	Фракция, %	
					по Мачигину, мг/100 г						по Тамму, %			<0.01 мм	>0.01 мм
Разрез 1. Аллювиальная торфяно-глебовая почва															
А ₀	0-3	-	-	-	-	-	-	48.0*	-	1.40	1.43	1.43	4.38	-	-
А _{T1}	3-30	7.8	-	-	1.93	2.6	76.0*	1.40	-	1.40	1.53	1.53	7.04	27.01	72.99
А _{T2}	30-46	7.9	3.41	0.25	1.07	3.2	36.0*	1.36	-	1.36	0.66	0.66	8.95	26.06	73.94
В _{qnp}	46-61	7.7	0.55	0.09	0.53	4.6	20.8	0.8	0.8	0.84	0.25	0.25	4.27	15.71	84.29
В _g	60-120	5.6	0.22	0.05	1.47	6.2	5.5	1.2	1.2	-	-	-	0.32	7.87	92.13
Разрез 9. Аллювиальная торфянисто-глебовая почва															
А _{T1}	5-9	7.2	-	0.81	2.67	3.4	57.1	10.0	10.0	1.44	0.52	0.52	0.85	11.56	88.44
А _{T2}	9-14	7.8	1.80	0.02	4.33	4.4	25.5	1.8	1.8	0.68	0.46	0.46	0.64	6.23	93.77
В _{ca}	14-20	7.9	1.14	0.12	5.00	6.2	21.8	-	-	1.12	0.34	0.34	1.71	6.28	93.72
А	20-37	7.6	3.41	0.39	6.27	6.6	22.0*	4.2	4.2	3.07	0.65	0.65	6.29	15.46	84.54
В _{lg}	38-59	7.3	0.47	0.06	3.67	4.6	7.8	1.2	1.2	0.52	-	-	-	7.28	92.64
В _{gC}	59-68	7.3	0.31	0.13	3.20	4.0	5.6	1.2	1.2	0.60	-	-	1.07	4.36	95.64
В _{2g}	68-90	7.5	0.92	0.13	1.93	6.0	10.8	4.2	4.2	0.40	-	-	-	13.69	86.31
Разрез 20. Аллювиальная торфянисто-глебовая почва															
А _T	0-5	7.4	3.93	0.43	7.60	25.0	28.0	15.8	15.8	-	-	-	-	-	-
А _T	5-19	7.5	2.04	0.20	1.93	10.0	25.0	3.0	3.0	-	-	-	0.64	42.68	57.32
В _g	19-56	7.5	1.64	0.20	1.20	10.0	20.0	9.0	9.0	-	-	-	0.85	37.04	62.96
С	56-82	7.2	0.60	0.11	1.40	8.0	7.5	6.3	6.3	-	-	-	0.43	12.32	87.68
Разрез 12. Аллювиальная луговая слоистая почва															
А _д	0-4	7.2	2.48	0.24	1.07	9.0	21.4	8.8	8.8	0.52	0.48	0.48	0.21	18.20	81.80
А	4-28	7.6	2.50	0.24	1.87	4.8	23.6	6.8	6.8	0.34	0.46	0.46	1.07	14.28	85.72
В	28-38	7.7	0.52	0.09	9.33	2.8	11.4	4.9	4.9	0.52	-	-	Следы	9.81	90.19
АВ	38-49	8.0	1.12	0.12	9.33	4.0	20.3	7.4	7.4	0.68	-	-	0.11	24.44	75.56
[А]	49-57	7.2	2.10	0.18	0.80	4.2	28.1	7.3	7.3	0.76	-	-	0.21	35.35	64.65
В	57-86/90	7.3	1.40	0.15	2.33	4.3	29.2	7.6	7.6	1.16	-	-	0.21	37.21	62.79
С	86/90-120	7.7	0.52	0.08	2.13	4.8	17.4	4.6	4.6	1.04	-	-	0.21	11.59	88.41

Таблица 1. Окончание

Горизонт	Глубина, см	pH _{H2O}	Сорг. %	N, %	P ₂ O ₅		K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		СаСО ₃ , %		Фракция, %	
					по Мачигину, мг/100 г	обменные, смоль(экв)/кг					по Тамму, %	СаСО ₃ , %	<0.01 мм	>0.01 мм		
Разрез 15. Аллювиальная луговая карбонатная почва																
A	0–5	6.9	–	0.38	6.53	29.0	34.0	12.0	0.52	0.42	1.07	–	–	–	–	–
A	5–23/28	7.2	1.22	0.36	0.33	5.0	21.0	6.0	0.52	0.76	0.64	21.95	78.05	–	–	–
B _g	23/28–49	7.9	0.28	0.06	0.93	3.0	7.5	2.5	0.34	0.41	0.85	9.21	90.79	–	–	–
Bca	49–73	7.8	0.41	0.13	0.56	8.0	–	–	0.52	0.79	0.43	29.09	70.91	–	–	–
C	73–110	7.7	0.10	0.08	0.60	2.0	15.0	3.0	–	–	0.85	4.20	95.80	–	–	–
Разрез 11. Аллювиальная дерновая остепняющаяся почва																
Ад	0–4	7.5	5.76	0.50	16.7	16.2	38.8	9.2	–	–	Следы	27.36	72.64	–	–	–
A	4–21	7.3	2.49	0.20	0.40	4.0	30.3	7.6	–	–	Следы	36.86	63.14	–	–	–
AB	21–34	7.1	1.15	0.11	0.73	4.6	22.7	7.3	–	–	0.21	32.63	67.37	–	–	–
B	34–95	7.2	0.28	0.06	1.67	3.2	10.6	2.2	–	–	0.21	6.83	93.17	–	–	–
C	95–116	7.0	0.26	0.04	1.07	1.6	5.4	3.6	–	–	0.11	6.32	93.68	–	–	–
Разрез 3. Серая лесная почва																
A _{st}	0–4	6.5	1.50	–	6.93	9.6	6.6	3.1	0.52	0.36	0.21	6.37	93.63	–	–	–
A	4–17	7.1	0.79	0.06	3.20	3.6	5.5	2.0	0.40	0.26	0.11	5.78	94.22	–	–	–
AB	17–38	6.6	0.24	0.04	3.87	4.0	4.4	2.2	0.40	0.28	0.11	8.72	91.28	–	–	–
B	38–58	7.0	0.32	0.04	2.80	5.4	4.4	4.0	0.30	0.20	0.11	5.74	94.26	–	–	–
BC	58–87	7.4	0.18	0.02	3.20	4.8	5.5	3.0	0.34	0.30	0.11	7.55	92.45	–	–	–
C	87–105	7.2	0.06	0.04	1.60	3.2	2.4	1.2	0.28	0.25	Следы	0.60	99.40	–	–	–
Разрез 8. Боровой песок																
A _{корк}	0–3	6.7	0.13	0.11	1.33	4.0	3.8	1.5	0.26	0.20	1.07	1.70	98.30	–	–	–
Cl	3–58	6.6	0.13	0.08	1.73	5.0	3.0	0.8	0.2	0.28	0.11	1.24	98.76	–	–	–
C2	58–71	6.2	0.32	0.04	3.47	4.0	3.8	3.0	–	–	Следы	2.88	97.12	–	–	–
[A] ₁	71–78	6.8	0.53	0.14	4.20	4.0	6.0	5.0	–	–	Следы	4.88	95.12	–	–	–
C ₃	78–84	6.8	0.20	0.11	2.00	5.0	3.8	0.3	–	–	Следы	4.12	95.88	–	–	–
[A] ₂	84–90	6.8	0.13	0.11	.33	4.0	3.8	1.5	–	–	0.11	9.64	90.36	–	–	–

* Емкость поглощения по Бабко-Аскинази. Примечание. Прочерк – определение не проводили.

Таблица 2. Содержание свинца в почвообразующих породах дельты р. Селенги, мг/кг

Почвообразующая порода	$M \pm m$
Аллювиальные супесчаные отложения (подстилающие болотные почвы)	4.7
Аллювиальные супесчаные отложения (подстилающие луговые почвы)	5.2
Рыхлые супесчаные отложения (подстилающие дерновые почвы)	10.9
Рыхлые песчаные отложения (подстилающие серые лесные почвы)	5.8
Песчаные отложения (боровые пески)	6.6
Среднее по дельте ($n = 9$)	6.0 ± 0.7
Кларк литосферы [10]	17
Среднее региональное [25]	34

Примечание. M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего арифметического.

растворов. Подвижность свинца в этих почвообразующих породах выше, чем в супесчаных и песчаных отложениях.

Относительно повышенное содержание свинца в супесчаных и песчаных отложениях, по-видимому, связано с тем, что в данных почвообразующих породах преобладает илистая фракция в составе физической глины и его нахождением в составе первичных минералов и других минеральных компонентов, где он закрепляется прочнее, чем в суглинистых отложениях. Так, согласно А. Andersson (1977, цит. по [20]), J. Garcia-Miragaya Levels (1984, цит. по [39]), свинец не может изоморфно замещать октаэдрические позиции в глинистых минералах из-за большого ионного радиуса. Как отмечают Минкина с соавт. [31], илистая фракция обладает большей емкостью поглощения и сродством к тяжелым металлам (ТМ), чем фракция пыли.

Дренированность территории также оказывает влияние на процесс выщелачивания и выноса свинца в нижележащие ландшафты.

Наши данные близки к результатам, полученным [53] для почвообразующих пород, подстилающих серые лесные почвы Бурятии: в песках и аллювии – 8–10, элюво-делювии – 12, при среднем значении – 10 мг/кг. В породах юга Западной Сибири свинец содержится в пределах 6.7–17.9 мг/кг: песчаных и супесчаных – 6.7, среднесуглинистых – 17.9 [19], лёссовидных суглинках – 13.3, аллювиальных песках – 8.0 [18].

В почвообразующих породах, подстилающих аллювиальные луговые карбонатные почвы Западной Сибири, концентрация свинца колеблется в пределах 13–15 мг/кг [49], а в почвообразующих породах поймы р. Дон его средняя концентрация составляет 14.0 мг/кг [32], что выше наших определений.

По данным [46], среднее валовое содержание свинца в верхнем слое 1–20 см песков соснового бора Семипалатинского Прииртышья, сформированных на древнеаллювиальных песчаных отложениях, составляет в среднем 23.1 мг/кг при диапазоне от 3.1 до 29.6, а кислоторастворимой формы – 0.8 мг/кг при колебании от 0.2 до 1.6.

Как отмечает [19], в зависимости от гранулометрического состава пород кларковое содержание свинца в них значительно различается: в глинистых породах – 20, карбонатных – 9 и песчаных – 7 мг/кг.

Таким образом, литохимические и минералогические особенности почвообразующих пород дельты р. Селенга обуславливают различия в концентрации в них свинца.

Свинец в почвах. Диапазоны и среднее содержание свинца в поверхностном (0–20 см) и 0–100 см слоях почв дельты представлены в табл. 3. Из

Таблица 3. Статистические показатели валового содержания свинца в почвах дельты р. Селенга, мг/кг

Почва	<i>lim</i>	$M \pm m$	$V, \%$
В поверхностном слое (0–20 см)			
Аллювиальные болотные ($n = 6$)	8.9–17.4	12.2 ± 1.14	23
Аллювиальные луговые ($n = 8$)	3.2–11.4	7.3 ± 0.88	34
Аллювиальные дерновые ($n = 4$)	9.5–14.8	12.0 ± 1.09	18
Серые лесные ($n = 3$)	9.0–10.8	9.7 ± 0.54	10
Боровые пески ($n = 1$)	–	6.2	–
Среднее по дельте ($n = 22$)	3.2–17.4	10.1 ± 0.65	31
В слое 0–100 см (без гор. С)			
Аллювиальные болотные ($n = 21$)	5.7–15.7	10.6 ± 0.6	29
Аллювиальные луговые ($n = 26$)	3.0–12.0	7.6 ± 0.6	40
Аллювиальные дерновые ($n = 8$)	8.6–14.8	11.3 ± 0.7	17
Серые лесные ($n = 13$)	7.0–10.8	8.6 ± 0.3	13
Боровые пески ($n = 4$)	5.7–10.1	7.3 ± 1.3	27
Среднее по дельте ($n = 72$)	3.0–14.8	9.5 ± 0.6	–
Среднее региональное [25]		34	

Примечание. *lim* – пределы колебаний, M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего арифметического, V – коэффициент вариации, $P = 0.95$, прочерк – расчет не проводили.

Таблица 4. Распределение валового и кислоторастворимого свинца по генетическим горизонтам почв дельты р. Селенга

Горизонт	Глубина, см	Валовое, мг/кг	R	Кислоторастворимая форма (1 М HCl), мг/кг	% от валового
Разрез 1. Аллювиальная торфяно-глеевая почва (с. Исток)					
A ₀	0–3	10.5	–	4.2	40
A _{T1}	3–30	12.0	–	4.0	33
A _{T2}	30–46	15.7	–	5.5	35
B _{ОХР}	46–61	12.1	–	4.0	33
B _g	60–120	12.6	–	3.2	26
Разрез 9. Аллювиальная торфянисто-глеевая почва (с. Дубинино)					
A _{T2}	9–14	7.2	–	2.7	38
B	14–20	10.4	–	2.9	28
A	20–37	8.2	–	4.0	48
B _{1g}	38–59	10.1	–	2.4	24
B _{gC}	59–68	5.7	–	2.2	39
B _{2g}	68–90	8.8	–	2.9	33
Разрез 20. Аллювиальная торфянисто-глееватая почва (о. Шаманка)					
A _o	0–5	11.1	2.36	–	–
A _T	5–19	11.4	2.43	5.7	50
B _g	19–56	12.1	2.57	5.6	47
C	56–82	4.7	1.0	3.4	73
Разрез 12. Аллювиальная луговая слоистая почва (с. Кудара)					
A _д	0–4	10.9	2.30	2.7	25
A	4–28	11.6	2.47	2.8	25
B	28–38	10.4	2.21	2.6	25
AB	38–49	11.9	2.57	3.6	30
[A]	49–57	12.0	2.55	3.2	27
B	57–86/90	6.5	1.38	4.1	62
C	86/90–120	4.7	1.0	2.6	57
Разрез 15. Аллювиальная луговая карбонатная почва (о. Шустовский)					
A _д	0–5	9.8	2.33	3.4	34
A	5–23/28	9.6	2.29	1.9	20
B _g	23/28–49	4.3	1.0	1.8	42
B _{Ca}	49–73	3.0	0.70	2.0	68
C	73–110	4.2	1.0	1.2	29
Разрез 11. Аллювиальная дерновая остепняющаяся почва (с. Фофаново)					
A _д	0–4	13.2	1.21	3.4	26
A	4–21	12.0	1.10	3.7	31
AB	21–34	14.8	1.36	3.3	22
B	34–95	11.7	1.07	1.9	16
C	95–116	10.9	1.0	1.6	15
Разрез 3. Серая лесная почва (с. Истомино)					
A _o	0–4	9.5	1.63	2.0	22
A	4–17	8.8	1.51	1.6	18
AB	17–38	8.1	1.40	1.5	19
B	38–58	8.8	1.51	1.8	21
BC	58–87	7.7	1.33	2.0	26
C	87–105	5.8	1.0	1.4	25

Таблица 4. Окончание

Горизонт	Глубина, см	Валовое, мг/кг	R	Кислоторастворимая форма (1 М HCl), мг/кг	% от валового
Разрез 18. Боровой песок (с. Степной Дворец)					
A _{корк}	0–3	6.1	0.86	1.2	20
C ₁	3–58	7.1	1.0	1.2	17
C ₂	58–71	10.1	1.42	1.1	11
[A] ₁	71–78	5.7	0.80	1.2	21
[A] ₂	84–90	12.4	1.75	1.4	11
ПДК	32		6		
Кларк	17				
Среднее в почвах мира [15]	12				

приведенных данных видно, что средние концентрации свинца в верхнем 0–20 см слое по типам почв различались не более 1.5 раз относительно его среднего содержания в почвах дельты. Однако по отдельным точкам содержание элемента различалось до 3.2 раза в левобережной части и до 1.8 раза в правобережной части дельты (табл. 4, рис. 2), что обусловлено геоморфологическими, гидрогеологическими и гидрологическими условиями. Это различие отмечено также Гыниновой с соавт. [12]. Ими установлено его относительно высокое содержание в почвах островов р. Селенга и северо-восточного сектора дельты выдвигения и поймы р. Шумиха. В почвах Калтусного болотного массива в неосушенной части данными автора выявлена аккумуляция свинца в количествах,

превышающих ПДК, и его пониженное содержание в осушенной части. При осушении торфяных почв активная минерализация органического вещества и изменение окислительно-восстановительных условий в сторону окислительных процессов способствуют повышению подвижности и миграции свинца за счет образования растворимых соединений [64]. Например, в аэрируемых почвенных горизонтах сульфид свинца окисляется до сульфата с последующей трансформацией в карбонат:

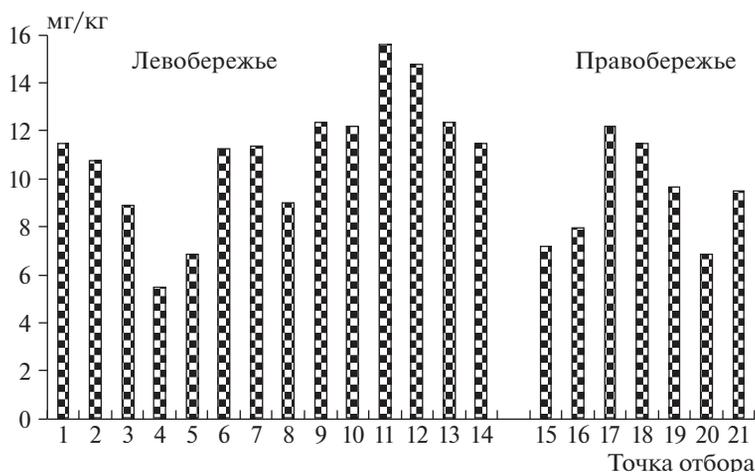
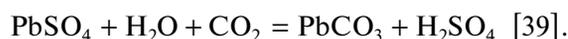


Рис. 2. Пространственное распределение свинца в поверхностном слое (0–20 см) почв право- и левобережной частей дельты р. Селенга (номер разреза и место отбора проб (село, поселок, остров)). Левобережная часть: 1 – разрез 1 (с. Исток), 2 – разрез 2 (с. Истомино), 3 – разрез 3 (с. Истомино), 4 – разрез 4 (с. Степной Дворец), 5 – разрез 18 (с. Степной Дворец), 6 – разрез 20 (о. Шаманка), 7 – разрез 21 (о. Семеновский), 8 – разрез 22 (Истокско-Твороговское поднятие), 9 – точка 1 (п. Кабанск), 10 – точка 2 (пгт. Селенгинск), 11 – точка 3 (пгт. Селенгинск), 12 – точка 4 (на северо-запад от п. Кабанск 5 в направлении п. Кабанск–с. Бол. Колесово), 13 – точка 5 (на юго-запад от п. Кабанск в направлении с. Закалтус–Кабанск), 14 – точка 6 (с. Ньюки). Правобережная часть: 15 – разрез 9 (с. Дубинино), 16 – разрез 10 (с. Красный Яр), 17 – разрез 11 (с. Фофоново), 18 – разрез 12 (с. Кудара), 19 – разрез 15 (о. Шустовский), 20 – разрез 16 (с. Корсаково), 21 – разрез 17 (с. Корсаково).

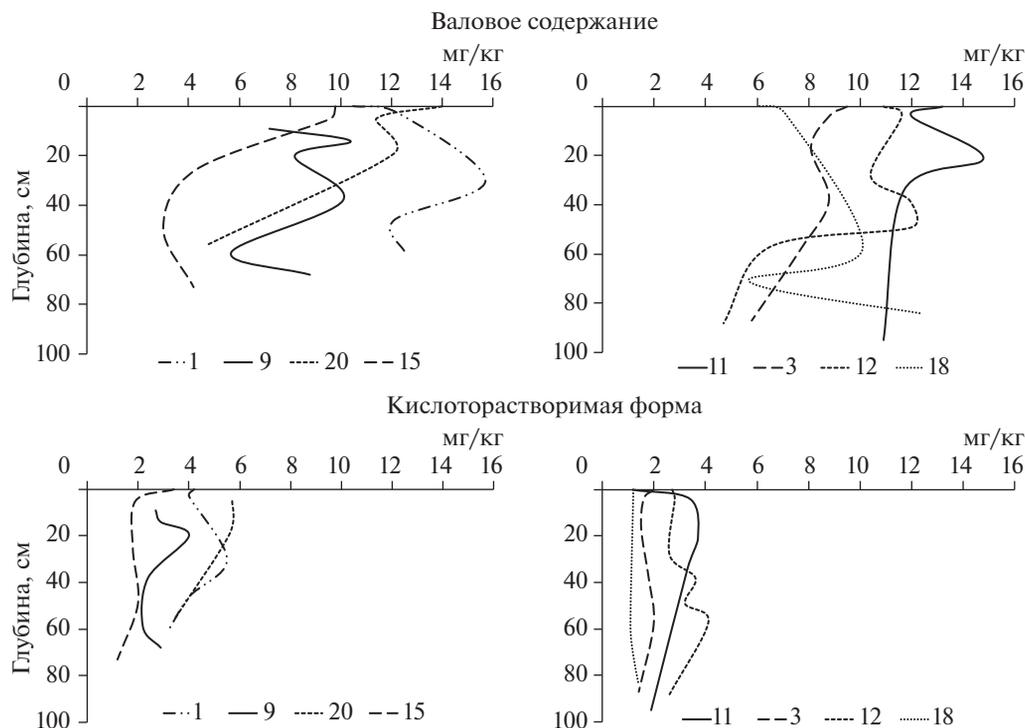


Рис. 3. Профильное распределение свинца в почвах дельты р. Селенга в разрезах: 1 – аллювиальная торфяно-глеевая почва, 9 – аллювиальная торфянисто-глееватая почва, 20 – аллювиальная торфянисто-глееватая почва, 15 – аллювиальная карбонатная почва, 12 – аллювиальная луговая слоистая почва, 11 – аллювиальная дерновая остепняющаяся почва, 3 – серая лесная почва, 18 – боровой песок.

Растворимость $PbCO_3$ больше, чем PbS (произведение растворимости соответственно 7.4×10^{-14} и 2.5×10^{-27}) [35].

По данным рекогносцировочного исследования, проведенного в верхней части левобережья дельты [36], содержание свинца в поверхностном слое почв варьировало в пределах 11.5–15.6 мг/кг (рис. 2, точки 1–5), что находится в интервале значений наших определений.

Концентрация свинца в поверхностном слое почв дельты р. Селенга значительно меньше по сравнению с его средним содержанием в поверхностном слое почв Европы – 32 мг/кг, США – 19 мг/кг [63].

При изучении содержания ТМ, в том числе свинца, в синлитогенных почвах, целесообразно принимать во внимание их содержание в метровом, а не только в верхнем 0–20 см слое. Содержание ТМ в верхнем слое почв в основном отражает биогенное накопление, а также аэральное и гидрогенное поступление поллютанта в почву [6]. Часто значительная доля ТМ с высокой реакционной способностью мигрирует в глубь почвы – вплоть до соответствующего геохимического барьера. Такая ситуация типична для слоистых аллювиальных почв [17].

В метровом слое изученных почв концентрация свинца превышала его среднее содержание в

1.1 (в серых лесных почвах) и в 1.9 раз (в аллювиально-луговых).

Данные табл. 3 и 4 свидетельствуют, что валовое содержание свинца в почвах не превышает его кларкового значения для почв мира и литосферы [10, 15], среднего регионального в почвах Западного Забайкалья – 34 мг/кг [25] и предельно допустимой концентрации (ПДК) [15].

Невысокие концентрации свинца в почвах дельты обусловлены его низким содержанием в почвообразующих породах. Вместе с тем разнообразие почвенно-геохимической обстановки определяет различие в уровнях накопления свинца в почвах и особенности его пространственного и профильного распределения в почвенном покрове дельты (рис. 2, 3).

Так, аллювиальные болотные (торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые) и аллювиальные дерновые почвы характеризовались относительно повышенным содержанием свинца по сравнению с аллювиальными луговыми, серыми лесными почвами и боровыми песками.

Подчиненное положенное гидроморфных почв в ряду элементарных ландшафтов, обеспечивает дополнительное их обогащение свинцом за счет притока почвенно-грунтовых вод с водосборной территории. Показано, что реки бассейна Селенги обогащены относительно среднего содержания в реках мира растворенным свинцом, мигрирую-

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между содержанием свинца в почвах дельты р. Селенга и их свойствами (поверхностный слой 0–20 см)

Тип почвы	<i>n</i>	Валовое содержание	pH	$C_{орг}$	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	Физическая глина
Валовое содержание						
Аллювиальные болотные и лугово-болотные	9	–	–0.48	0.27	–0.25	0.10
Аллювиальные луговые	14	–	–0.02	0.47	0.21	0.11
Аллювиальные дерновые	4	–	0.30	0.43	0.72	0.62
Серые лесные	7	–	–0.16	0.57	0.32	–0.03
В целом по дельте	34	–	0.09	0.53	0.11	0.26
Кислоторастворимая форма						
Аллювиальные болотные и лугово-болотные	9	0.85	0.71	0.39	–0.27	0.50
Аллювиальные луговые	14	–0.25	0.38	0.72	0.73	0.37
Аллювиальные дерновые	4	–0.24	0.26	–0.87	–0.41	0.44
Серые лесные	7	0.73	0.62	0.94	0.78	0.14

щим в форме комплексных соединений с органическим веществом [24].

Кроме того, к факторам, увеличивающим аккумуляцию свинца в профиле гидроморфных почв, следует отнести относительно высокое содержание органического вещества, физической глины, щелочную реакцию среды и восстановительные условия.

Повышенное накопление свинца в профиле аллювиальных дерновых почв обусловлено его повышенным содержанием в почвообразующей породе, подстилающей их, и подвижного фосфора в верхних горизонтах профиля, слабощелочной или щелочной реакцией среды, относительно низким залеганием грунтовых вод, развитием дернового процесса.

Следует отметить, что повышенный фон свинца свойственен относительно тяжелым по гранулометрическому составу и хорошо гумусированным почвам (разрезы 1, 11, 20 и др.), пониженное – почвам легкого гранулометрического состава, содержащим небольшое количество гумуса (разрезы 3, 15, 18 и др.).

Среди почвенных свойств, определяющих уровень концентрирования и мобильности металлов, выделяют количественный и качественный состав органического вещества почвы, минералогический и гранулометрический состав, характеристики почвенного поглощающего комплекса, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные режимы, содержание карбонатов, оксидов железа, марганца и алюминия, а также микробиологическую активность почвы [42].

Выявить связь между свойствами почвы и уровнем содержания в них свинца позволяют коэффициенты корреляции (r). Так, рассчитанные для верхнего 0–20 см слоя коэффициенты корреляции валового содержания и кислоторастворимой формы свинца с физико-химическими показателями почв показывают различия в степени корреляции в зависимости от типа почв. Коэффициенты корреляции указывают, что рассмот-

ренные почвенные свойства на 9–72% контролируют уровень валового содержания и на 14–87% кислоторастворимой формы свинца. Корреляция оценивается в основном как очень слабая и слабая (табл. 5). В целом для аллювиальных дерновых почв корреляция валового содержания свинца с их физико-химическими свойствами сильнее, чем для гидроморфных и полугидроморфных почв. Уровень содержания физической глины оказывает меньшее влияние на валовую концентрацию свинца, чем другие показатели, за исключением аллювиальных дерновых почв, где содержание илистой фракции больше, чем в других почвах.

Сравнение коэффициентов корреляции содержания свинца со свойствами почв для других регионов показало также различие в уровнях корреляционных связей. Так, в пойменных почвах Северного Зауралья выявлена прямая корреляционная зависимость содержания свинца от содержания гумуса ($r = 0.6–0.9$), гидролитической кислотности ($r = 0.4–0.6$), валового содержания азота и калия ($r = 0.6–0.8$) [6]. Для аллювиальных луговых почв Западной Сибири [49] отмечена очень слабая корреляция валового содержания свинца с гумусом ($r = 0.20$) и слабая с реакцией почвенной среды ($r = 0.25$), содержанием физической глины ($r = 0.46$). Для почв Каталонии коэффициенты корреляции содержания свинца составляли для содержания органического вещества – 0.22, pH – 0.46, $CaCO_3$ – 0.32, песка – 0.09, глины – 0.08 [56].

В целом способность к сорбции свинца почвой возрастает с увеличением содержания органического вещества и pH среды и положительно коррелирует с pH, катионообменной способностью, содержанием глины, $CaCO_3$ и органического вещества [59, 67].

При анализе загрязнения почв следует обращать внимание не только на средние величины содержания ТМ, но и на размах варьирования, так как в техногенных аномалиях изменение содержания многих ТМ и металлоидов больше, чем на фоне [7]. В дельте р. Селенга, по нашим расче-

там, диапазоны варьирования валового содержания свинца в верхнем слое почв составляли в 10–34% (табл. 3), что свидетельствует об отсутствии техногенного загрязнения и соответствует нормальному уровню варьирования [41]. Максимальная вариабельность содержания свинца выявлена в почвах полугидроморфного, а минимальная – автоморфного ряда (табл. 3 и 4). Значения коэффициента вариации содержания свинца почвах в исследуемого района по мнению [66] указывают на умеренные воздействия внешних факторов, включая промышленную деятельность.

Наши данные по вариабельности содержания свинца в почвах несколько отличаются от данных для других регионов. Так, вариабельность содержания свинца в различных видах аллювиальных почв Северного Зауралья составляет по данным [6]: дерновой – 27%; луговой – 23%; болотной – 12%.

Следует отметить, что величины концентраций свинца и особенности их распределения с глубиной в почвах дельты Селенги существенно не разнятся с результатами исследований в других районах без значительных антропогенных влияний. Так, его валовое содержание в аллювиальных луговых карбонатных почвах Западной Сибири колеблется в пределах 15–20 мг/кг [49]. Известно [29], что среднее содержание свинца в аллювиальных почвах (0–20 см) долинно-речных экосистем бассейна р. Вилюй составляет 11.9 мг/кг. В почвах поймы р. Дон концентрация свинца составляла 2.5–33.0 мг/кг [32], в верхнем слое аллювиальных почв восточной части дельты р. Нил в пределах 4.9–10.6 мг/кг с максимальной аккумуляцией в дерново-луговой [14].

Кислоторастворимая форма свинца. Валовое содержание ТМ в почве отражает общую картину их накопления и не учитывает миграционную активность химических веществ и возможность их поступления в другие компоненты природной среды. Более детальную информацию об этом дает анализ форм их нахождения, прежде всего, содержание подвижных форм [8], которые способны участвовать в химических реакциях, вовлекаться в биологическую и другие виды миграции и активно воздействовать на биоту.

В исследуемых почвообразующих породах и почвах содержание кислоторастворимой формы свинца не превышает ПДК для его подвижной формы, разработанной и утвержденной с использованием вытяжки ацетатно-аммонийного буфера. Низкое содержание кислоторастворимого свинца в них связано с его способностью образовывать труднорастворимые соединения с компонентами почвы и отсутствием значительных антропогенных воздействий.

Согласно полученным результатам, в почвах болотного и лугового рядов почвообразования содержится от 24 до 68% кислоторастворимой формы свинца от его валового количества. Больше всего свинца извлекалось из аллювиальных

болотных почв, что связано с его поступлением с поверхностно-грунтовыми водами, взвешенными частицами, а также с его менее жесткой связью с поверхностью гранулометрических фракций по сравнению супесчаными и песчаными почвами. Во взвешенных наносах р. Селенга и ее притоков повышенное содержание свинца обусловлено как геохимическими особенностями региона, так и техногенным воздействием.

С увеличением автоморфности почв уменьшалось содержание кислоторастворимой формы свинца в них. Так, в аллювиальных дерновых почвах содержание данной формы свинца составляло 15–43% от валового содержания. Наименьшее количество свинца извлекалось из серых лесных почв и бортовых песков. Это, по-видимому, связано с тем, что в данных почвах свинец входит в состав минералов и других минеральных компонентов, где он закреплен прочно. Свинец обычно проявляет большое сродство к оксидной и остаточным фракциям [55].

Кроме того, на токсичность и подвижность свинца в почве влияет не только общая концентрация, но и формы его соединения: обменные, железо-марганцево-связанные, органически ассоциированные и остаточные [68]. Формы нахождения свинца в разных типах почв могут значительно различаться. В целом можно предположить, что в исследуемых условиях большая часть свинца образует малорастворимые соединения: в нейтральных почвах с оксидами Fe, Mn и органическим веществом, а в слабощелочных и щелочных условиях находится в “карбонатной”, “органической” и “остаточной” фракциях. В почвах при $pH > 5.6$ в присутствии карбонатов Pb^{2+} осаждается в виде $PbCO_3$ (минерала церуссита) [39]. В нейтральной или щелочной среде свинец образует гидроксид, который в присутствии растворимых фосфатов переходит в $Pb_3(PO_4)_2$ или другие труднорастворимые фосфаты [35].

Количество подвижной формы свинца в почвах связано с такими почвенными свойствами, как реакция почвенной среды, содержание органического вещества, гранулометрический состав, а также с геохимической обстановкой, определяющей процессы миграции металла в почвенном покрове. Как указывают [69], высокое содержание органического вещества, нейтральное значение pH, оптимальные гидрологические условия и окислительно-восстановительные свойства ограничивают миграцию свинца в почвах. Так, в высокогумусированных почвах свинец обладает слабой подвижностью за счет образования стабильных Pb^{2+} -органических комплексов. В слабогумусированных почвах доминирующую роль в адсорбции свинца играют оксиды Mn и Fe [57, 58].

Для кислоторастворимой формы свинца корреляционные связи со свойствами исследуемых почв несколько сильнее, чем для его валового содержания (табл. 5). Так, отмечалась тесная корре-

ляция содержания кислоторастворимой формы свинца с количеством органического вещества и слабая – с физической глиной. Также значительное влияние на подвижность свинца в серых лесных и аллювиальных луговых почвах оказывала сумма $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, в аллювиальных болотных – реакция почвенной среды и его валовое содержание. Следует отметить высокую зависимость содержания кислоторастворимой формы свинца в серых лесных почвах от их физико-химических свойств и его валового содержания.

Внутрипрофильное распределение свинца. Почвообразовательный процесс вносит определенные коррективы в распределение свинца по профилю почв. Так, растворимые формы свинца, поступающие на поверхность почвы в процессе миграции, частично закрепляются на поверхности дисперсных частиц, входят в состав устойчивых гумусовых соединений. Это обусловлено тем, что свинец способен образовывать комплексы гетерополярные соли с гумусовыми кислотами, в которых металл входит в состав анионной части молекулы или, реагируя одновременно с двумя группами гумусовых кислот, образует комплексные соединения хелатного типа. Степень закомплексованности свинца может достигать 80% [50]. Комплексы свинца с фульвокислотами способны передвигаться с током фильтрующейся влаги вниз по почвенному профилю и оседать на щелочном карбонатном барьере в виде труднорастворимой соли карбоната свинца или гидрооксида свинца [35]. Также с увеличением содержания иллитой и глинистой фракций в почвах происходит накопление свинца, как и при уменьшении кислотности почвы [47].

Сопоставление профильного распределения свинца с изменением свойств почв по профилю наряду с другими факторами позволяет выявить его особенности и закономерности. Из данных табл. 1 видно, что для аллювиальных болотных, луговых и дерновых почв максимальные величины $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, содержания органического вещества, обменных оснований, подвижного фосфора и оксидов железа, алюминия, глинистых частиц относятся к верхнему слою 0–50 см почвы, где происходила аккумуляция и миграция свинца. В то время как наличие погребенных гумусовых горизонтов в профиле аллювиальных луговых слоистых почв и борových песков способствовало некоторому перераспределению свинца по профилю данных почв. Для серых лесных почв меньшие значения $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, содержания обменных оснований, физической глины способствовали меньшей аккумуляции и подвижности свинца.

Профильное распределение свинца в исследуемых почвах в основном носило элювиально-иллювиальный (аллювиальные болотные, аллювиальные луговые почвы, боровой песок) или аккумулятивно-элювиально-иллювиальный характер (аллювиальные дерновые, серые

лесные почвы) с уменьшением в почвообразующей породе (рис. 3, табл. 4).

В распределении свинца по профилю аллювиальных болотных и луговых почв дельты отмечалась его аккумуляция в гумусовых и оглеенных горизонтах. Это дает основание считать, что органический и глеевый горизонты являются барьером на пути миграции свинца. Так, R для аллювиальной торфянисто-глеевой почвы (разрез 20) изменялся в пределах 2.43–2.98, аллювиальных луговых (разрезы 12 и 15) – 0.70–2.57. Для серых лесных и аллювиальных дерновых почв R варьировал от 1.07–1.36 (аллювиальная дерновая, разрез 11) до 1.33–1.63 (серая лесная, разрез 3). В этих почвах выявлена незначительная аккумуляция свинца в дернине и подстилке, а также в горизонтах АВ аллювиальной дерновой почвы на карбонатном барьере и иллювиальном горизонте В серой лесной почвы в связи со сменой кислотно-основных условий в сторону слабощелочных. Незначительные колебания R свинца в автоморфных почвах, возможно, связаны с замедлением интенсивности выветривания свинца в них. В борovém песке колебания R составляли 0.80–1.75, отмечалась аккумуляция свинца в погребенных гумусовых горизонтах. Помимо свойств почв, различие в R связано как с изменением окислительно-восстановительных условий, так и с наличием геохимических барьеров, формирующихся на границах генетических горизонтов в профиле почв.

Следует отметить, что характер профильного распределения кислоторастворимой формы и валового содержания свинца в основном был сходным (рис. 3). В целом в профильном распределении свинца в почвах дельты р. Селенга отмечалась его аккумуляция в верхнем слое 0–50 см почв, что в основном связано с биогенной аккумуляцией, утяжелением гранулометрического состава, а также наличием геохимического барьера.

По данным [38], как правило, значение R валового содержания свинца в гумусовых и иллювиальных горизонтах почв гумидных зон не превышает 1.5–2, в гумусовых горизонтах степных почв – 1.2–1.5.

Относительно равномерное распределение свинца по профилю отмечено для аллювиальных луговых карбонатных почв Западной Сибири. Так, R для аллювиальной луговой карбонатной почвы Васюганской равнины изменялось в пределах 1.23–1.54, а луговой карбонатной Кулундинской равнины – 1.0–1.13 с максимумом в иллювиальном карбонатном горизонте [49].

Таким образом, пространственное и внутрипрофильное распределение свинца в разных почвах дельты характеризовалось контрастностью. Это можно объяснить, наряду с различием физико-химических свойств почв, особенностями химических свойств элемента. Эти особенности могут определять процессы мобилизации, миграции и иммобилизации элемента в существенно различа-

ющихся почвенно-геохимических условиях дельты и неоднородность его пространственного и профильного распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенные различия эколого-геохимических факторов обуславливают разнообразие почв дельты р. Селенга и неравномерность содержания в них свинца. Диапазоны различий содержания свинца в верхнем 0–20 см слое почв составляли 3–17 мг/кг, а среднее значение 10 мг/кг, что значительно ниже ПДК и его кларка в почвах мира.

В пространственном распределении аллювиальные болотные и аллювиальные дерновые почвы характеризуются повышенным в 2 раза содержанием свинца по сравнению с аллювиальными луговыми, серыми лесными почвами и борowymi песками. Однако по отдельным точкам содержание элемента различалось до 3.2 раза в левобережной части и до 1.8 раза в правобережной части дельты, что обусловлено геоморфологическими, гидрогеологическими и гидрологическими условиями.

В аллювиальных болотных и аллювиальных луговых почвах кислоторастворимой формы свинца содержится от 24 до 68% от его валового количества. С увеличением автоморфности почв уменьшалось содержание данной формы свинца: в аллювиальных дерновых почвах оно составляло 15–43%, в серых лесных почвах и борowych песках – 11–26%. Содержание кислоторастворимой формы свинца не превышало предельно допустимой концентрации, разработанной для ацетатно-аммонийной вытяжки.

Профильное распределение свинца в исследуемых почвах в основном носило элювиально-иллювиальный (аллювиальные болотные, аллювиальные луговые почвы, боровой песок) или аккумулятивно-элювиально-иллювиальный (дерновые, серые лесные почвы) характер. Выявлена его аккумуляция в органогенном и глеевом горизонтах аллювиальных болотных и луговых почв. В метровом слое профиля аллювиальных дерновых и серых лесных почв свинец распределялся относительно равномерно в связи со сравнительной однородностью гранулометрического и минералогического состава, а также окислительно-восстановительных условий.

Корреляция содержания свинца со свойствами исследуемых почв оценивается в основном как очень слабая и слабая. Для кислоторастворимой формы свинца эти корреляционные связи несколько сильнее, чем для его валового содержания.

Таким образом, концентрация свинца, его подвижность, пространственное и профильное распределение в почвах дельты определяются как внешними, так и внутренними факторами: его содержанием в почвообразующих породах, свойствами почв (емкостью поглощения, рН, содержанием гумуса и илистой фракции, степенью гидроморфизма), геоморфологическими и геохимическими

особенностями территории, свойствами элемента и его соединений [32, 67].

Уровни содержания свинца в почвах исследуемого района свидетельствует о благополучной ситуации в отношении данного элемента.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания номер регистрации АААА-А17-117011810038-7.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авессаломова И.А.* Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 108 с.
2. *Агрохимические методы исследования почв.* М.: Наука, 1975. 656 с.
3. *Атлас Забайкалья. Бурятская АССР и Читинская область / Под ред. В.Б. Сочава.* Иркутск: ГУГК, 1967. 176 с.
4. *Бертини И., Грей Г., Стифель Э., Валентине Дж.* Биологическая неорганическая химия: структура и реакционная способность. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. Т. 1. 456 с.
5. *Болдырев Г.С.* Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. Новосибирск: Наука, 1982. 182 с.
6. *Бужин А.В.* Состав и свойства аллювиальных почв средних рек Северного Зауралья. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2012. 20 с.
7. *Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Кожева А.В.* Тяжелые металлы в аллювиальных почвах Среднего Предуралья // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2004. № 5. С. 23–25.
8. *Головатый С.Е., Савченко С.В., Самусик Е.А.* Кадмий, цинк и свинец в почвах в зоне воздействия промышленных предприятий // Журн. Белорусского гос. ун-та. Экология. 2017. № 4. С. 70–80.
9. Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2015 г.”. Иркутск: ИНЦХТ, 2016. 372 с. <http://www.mnr.gov.ru>
10. *Григорьев Н.А.* Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
11. *Гринвуд Н.Н., Эрншо А.* Химия элементов. М.: Бином, 2008. Т. 1. 601 с.
12. *Гынинова А.Б., Шоба С.А., Балсанова Л.Д., Гынинова Б.Д.* Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. 344 с.
13. Дельта реки Селенги – естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал / Под ред. Тулохонова А.К., Плюснина А.М. Новосибирск: Наука, Сибирское отд. РАН, 2008. 314 с.
14. *Елсайед Саид Мохамед Мохамед, Гома Ботхина Саад Мохамед Али, Шуравилин А.В.* Оценка загрязнения почв восточной части дельты Нила тяжелыми

- ми металлами // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 5. С. 44–48.
15. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Справочник. М.: Недра, 1996. Кн. 3. 351 с.
 16. *Иванов Г.М.* Микроэлементы-биофилы в ландшафтах Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. 237 с.
 17. *Изерская Л.А., Воробьева Т.Е.* Формы соединения тяжелых металлов в аллювиальных почвах Средней Оби // Почвоведение. 2000. № 1. С. 56–62.
 18. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в почвах Западной Сибири // Почвоведение. 1987. № 11. С. 87–94.
 19. *Ильин В.Б., Сысо А.И., Конрабаева Г.А., Байдина Н.Л., Черевко А.С.* Содержание тяжелых металлов в почвообразующих породах юга Западной Сибири // Почвоведение. 2000. № 9. С. 1086–1090.
 20. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
 21. *Ильичева Е.А., Корытный Л.М., Павлов М.В.* Руслонная сеть дельты реки Селенги на современном этапе // Вестник Томского гос. ун-та. 2014. № 380. С. 190–194.
 22. *Иметхенов А.Б.* Позднекайнозойские отложения побережья озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 152 с.
 23. *Карпунин М.М., Ладонин Д.В.* Влияние компонентов почвы на поглощение тяжелых металлов в условиях техногенного загрязнения // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1388–1398.
 24. *Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Пашикина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В.* Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 69–83. <https://rucont.ru/efd/501276>
 25. *Кашин В.К.* Свинец в абиотических компонентах и растениях ландшафтов Западного Забайкалья // Геохимия. 2002. № 7. С. 794–800.
 26. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
 27. *Ладонин Д.В.* Влияние техногенного загрязнения на фракционный состав меди и цинка в почвах // Почвоведение. 1995. № 10. С. 1299–1305.
 28. *Ладонин Д.В.* Фракционно-изотопный состав соединений свинца в почвах заповедника “Кологривский лес” // Почвоведение. 2018. № 8. С. 994–1003.
 29. Ландшафтно-геохимические особенности формирования микроэлементозов в среднетаежной зоне Якутии / Под ред. Д.Д. Саввинова. М.: ООО “Недра–Бизнес-центр”, 2006. 319 с.
 30. *Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Карпунин М.М., Завгородняя Ю.А., Цветнова О.Б.* Распределение тяжелых металлов и бенз(а)пирена в торфяных олиготрофных почвах и торфяно-глееземах на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2018. № 5. С. 551–562.
 31. *Минкина Т.М., Статовой А.А., Крыщенко В.С.* Механизмы поглощения свинца гранулометрическими фракциями чернозема обыкновенного // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2004. № 4. С. 66–69.
 32. *Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Манджиева С.С., Козлова М.Н.* Особенности содержания и подвижность тяжелых металлов в почвах поймы реки Дон // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 1(66). С. 86–98.
 33. *Неведров Н.П., Проценко Е.П., Глебова И.В.* Соотношение содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах Курска // Почвоведение. 2018. № 1. С. 111–117.
 34. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439.
 35. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И.* Химия почв. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.
 36. Отчет о научно-исследовательской работе “Оценка состояния и загрязнения почв Бурятии по результатам рекогносцировочного экспедиционного обследования в 2014 г.”. Обнинск, 2015. 158 с.
 37. *Пампура Т.В., Мейли М., Холм К., Кандопап Ф., Пробст А.* Погребенные палеопочвы как фоновые объекты для оценки уровня загрязнения свинцом современных почв Нижнего Поволжья // Почвоведение. 2019. № 1. С. 43–60.
 38. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 610 с.
 39. *Понизовский А.А., Мироненко Е.В.* Механизмы поглощения свинца(II) почвами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 418–429.
 40. *Потемкина Т.Г.* Распределение стока воды и наносов в протоках дельты р. Селенги // География и природные ресурсы. 1995. № 1. С. 75–78.
 41. *Савич В.И.* Применение вариационной статистики в почвоведении. М., 1972. 104 с.
 42. *Савосько В.Н.* Тяжелые металлы в почвах Кривбасса. Кривой Рог: Діонат, 2016. 288 с.
 43. *Садовникова Л.К., Ладонин Д.В.* Метод изучения соединений цинка в фоновых и загрязненных почвах // Физические и химические методы исследования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. С. 130–141.
 44. *Самофалова И.А.* Химический состав почв и почвообразующих пород. Пермь, 2009. 132 с.
 45. *Сибиркина А.З.* Содержание тяжелых металлов в песках соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Вестник ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2011. № 2. С. 46–52.
 46. *Снакин В.В.* Свинец в биосфере // Вестник РАН. 1998. Т. 68. № 3. С. 214–224.
 47. *Соколова Т.А., Трофимов С.Я.* Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен: учебное пособие по некоторым главам химии почв. Тула: Гриф и К, 2009. 172 с.
 48. *Сосорова С.Б., Кашин В.К.* Тяжелые металлы в почвах и растениях дельты реки Селенги. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 162 с.
 49. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 274 с.
 50. *Хаданович А.В., Свириденко В.Г.* Экологическая химия. Природные сорбенты, свойства и использование. Гомель, 2005. 56 с.
 51. *Хажеева З.И.* Вещественный и дисперсный состав седиментационных отложений проток дельты р. Селенга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 5. С. 384–386.
 52. *Чернова О.В., Бекецкая О.В.* Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в эко-

- логическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1102–1113.
53. Чимитдоржиева Г.Д., Нимбуева А.З., Бодеева Е.А. Тяжелые металлы (медь, свинец, никель, кадмий) в органической части серых лесных почв Бурятии // Почвоведение. 2012. № 2. С. 166–172.
 54. Чимитдоржиева Г.Д., Бодеева Е.А., Нимбуева О.З. Свинец в системе: порода–почва–гумусовые вещества–растения на примере степных и лесостепных почв Западного Забайкалья // Сибирский экологический журн. 2014. Т. 21. № 3. С. 485–492.
 55. Шахин С.М., Ринклебе Й., Цадилаас Х.Д. Формы токсичных элементов в пойменных почвах Египта, Германии и Греции: сравнительное исследование // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1450–1461.
 56. Bech J., Reverter F., Tume P., Longan L., Bech J., Oliver T. Pedogeochemical mapping of Al, Ba, Pb, Ti and V in surface soils of Barcelona Province (Catalonia, NE Spain): Relationships with soil physicochemical properties // J. Geochemical Exploration. 2011. V. 109. № 1–3. P. 26–37.
 57. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 277(1). P. 1–18.
 58. Covelo E.F., Vega F.A., Andrade M.L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components // J. Hazardous Materials. 2007. V. 140(1–2). P. 308–315.
 59. Elbana T.A., Magdi Selim H., Akrami N., Newman A., Shaheen S.M., Rinklebe J. Freundlich sorption parameters for cadmium, copper, nickel, lead, and zinc for different soils: influence of kinetics // Geoderma. 2018. V. 324. P. 80–88.
 60. Essington M.E. Soil and Water Chemistry. Boca Raton: CRC Press, 2004. 534 p.
 61. Health risks of heavy metals from long–range transboundary air pollution. /Joint WHO/Convention Task-Force on the Health Aspects of Air Pollution. Copenhagen: World Health Organization Regional Office Europe, 2007. 144 p.
 62. IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference-Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome.
 63. Kabata A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis, 2011. 534 p.
 64. Kõlli R., Asi E., Apuhtin V., Kauer K., Szajdak L.W. Chemical properties of surface peat on forest land in Estonia // Mires and Peat. 2010. V. 6. Article 06.
 65. Li J., Wu Z., Wu W., Wang S.L., Zhen G.L., Chen D., Xie Y., Niazi N.K., Ok Y.S., Rinklebe J., Wang H. Sorption of lead in soil amended with coconut fiber biochar: geochemical and spectroscopic investigations // Geoderma. 2019. V. 350. P. 52–60.
 66. Mahmoudabadi E., Sarmadian F., Nazary Moghaddam R. Spatial distribution of soil heavy metals in different land uses of an industrial area of Tehran (Iran) // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2015. № 12. P. 3283–3298. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0808-z>
 67. Strawn D.G., Sparks D.L. Effects of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb(II) sorption and desorption in soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. № 1. P. 144–156.
 68. Tian H., Duan C., Fang L., Wang Y., Wu H. Dominant factor affecting Pb speciation and the leaching risk among land–use types around PB–ZN Mine // Geoderma. 2018. V. 326. C. 123–132.
 69. Węgrzyn Michał, Wietrzyk Paulina, Lisowska Maja, Klimek Beata, Nicia Paweł. What influences heavy metals accumulation in arctic lichen *Cetrariella delisei* in Svalbard? // Polar Sci. 2016. V. 10. № 4. P. 532–540.
 70. www.sib-man.ru.

Lead in Soils of the Selenga River Delta

S. B. Sosorova^{1,*} and V. K. Kashin¹

¹Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047 Russia

*e-mail: soelma_sosorova@mail.ru

Distribution of total and acid-extractable lead in five major soil types and parent rocks have been studied in the Selenga River Delta, the major affluent of Lake Baikal. A generally low content of this element in soil-forming rocks (6.0 mg/kg on the average), along with the local soil-geochemical conditions, is responsible for its low concentration in soils. Thus, the bulk lead content in the topsoil (0–20 cm) layer varies from 3 to 17 mg/kg with the average value of 10 mg/kg, which is lower than the maximum permissible concentration and natural abundance (Clarke) of lead in world soils. Against this background, the lead content in swampy and soddy alluvial soils is two times higher than its content in meadow alluvial, gray forest, and sandy soils under pine stands in the studied region. Differences in the lead content in soils of the left- and right-bank parts of the Selenga Delta were found. The content of acid-extractable lead varies within 24–68% of the total lead content in swampy and meadow alluvial soils, within 15–43% in soddy alluvial soils, and within 11–26% in gray forest soils and sandy soils under pine stands. The distribution of lead in the vertical soil profile has an eluvial–illuvial pattern in the swampy and meadow alluvial soils and in sandy soils under pine stands and an accumulative–eluvial–illuvial pattern in soddy alluvial and gray forest soils. Lead tends to accumulate in the organic and gley horizons of swampy and meadow alluvial soils. In the soddy alluvial and gray forest soils with relative uniformity of their textural and mineralogical characteristics, lead is evenly distributed in the soil profile with some enrichment of the upper sod layer. In general, correlative dependences between the total lead content and the soil properties are weak. They are somewhat stronger for the acid-extractable lead. The results obtained in this study can be used for the purposes of biogeochemical monitoring in the Baikal region.

Keywords: heavy metal, distribution, Delta, Fluvisols, Luvisols, Arenosols