

И.Н. СЕМЕНКОВ, Т.В. КОРОЛЁВА, А.В. ШАРАПОВА, Е.В. ТЕРСКАЯ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, ivan.semenkov.n@gmail.com, korolevat@mail.ru, avsharapova@mail.ru, elena_terskaya@mail.ru

НОРМАТИВЫ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Проанализированы нормативы содержания химических элементов в почвах России, Германии, Канады, Нидерландов и США. В России разработаны предельно допустимые концентрации (ПДК) для химических элементов по общесанитарному, водно-миграционному и транслокационному показателю вредности, в Германии — по общесанитарному и транслокационному, в Нидерландах, Канаде и США — по общесанитарному. Выявлено, что с учетом типичных уровней для фоновых почв мира российские ПДК для валового содержания химических элементов адекватны в отношении Mn и V, американские — Co, Cu и Pb, голландские — Pb и Zn, канадские — Ba, Co, Ni, Pb, V и Zn, немецкие — Cr, Ni и Pb. Методически наиболее близкие между собой российские и голландские нормативы валового содержания химических элементов в настоящей статье сравнивали с уровнями, типичными для фоновых дерново-подзолистых глееватых, темно-серых почв и черноземов центра Западной Сибири. Установлено, что использование голландских ПДК для центральной части Западной Сибири дает меньше случаев ложного загрязнения Pb, но во всех рассматриваемых почвах превышен уровень голландской ПДК для Ba. Ложное загрязнение фиксируется в гумусовом горизонте дерново-подзолистых глееватых почв по содержанию Zn, в текстурном и глеевом горизонтах — Cr, Cu и V, а также в большинстве проб темно-серых почв и черноземов — Cr, Ni и V. Сделан вывод, что для рассматриваемых почв центра Западной Сибири использование российской ПДК дает меньше случаев ложного загрязнения V. Но в фоновых дерново-подзолистых глееватых почвах превышены уровни российских ПДК для Mn и Pb, накапливающихся на биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте. Уровни российских ПДК для подвижных форм металлов наиболее корректны в отношении Co, Cr, Cu, Ni и Pb, а в отношении абиотфильных Mn и Zn — занижены. Для дерново-подзолистых глееватых почв Тобольского материка, темно-серых Ишимской равнины и черноземов Зауралья предложены фоновые уровни (подстрочные цифры, мг/кг) содержания валовых (подвижных — извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером) $Ba_{404-515}$, $Co_{12-19(0,001-0,23)}$, $Cr_{143-188(0,001-0,72)}$, $Cu_{32-41(0,01-0,72)}$, $Mn_{423-874(0,09-64)}$, $Ni_{30-62(0,003-1,3)}$, $Pb_{18-27(0,003-0,87)}$, $V_{112-170}$ и $Zn_{55-104(0,004-0,42)}$.

Ключевые слова: предельно допустимая концентрация, микроэлементы, дерново-подзолистая почва, темно-серая почва, чернозем, вертикальное распределение.

I.N. SEMENKOV, T.V. KOROLEVA, A.V. SHARAPOVA, E.V. TERSKAYA

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, ivan.semenkov.n@gmail.com, korolevat@mail.ru, avsharapova@mail.ru, elena_terskaya@mail.ru

STANDARD RATES OF CONTENT OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE SOIL: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND USE FOR WESTERN SIBERIA

Maximum permissible concentrations for chemical elements in soils (MPCs) of Russia, Germany, Canada, the Netherlands and the USA are compared. In Russia, general sanitary, water-transferred and translocation MPCs are created; in Germany, general sanitary and translocation, and in the Netherlands, the USA and Canada, general sanitary. It is found that Russian MPCs for total contents of chemical elements are adequate for Mn and V, American, for Co, Cu, and Pb; Netherlands, for Pb and Zn; Canadian, for Ba, Co, Ni, Pb, V, and Zn, and German, for Cr, Ni, and Pb by taking into account the typical levels of elements in the background soils across the world. The methodologically closest Russian and Netherlands standard rates of total contents of chemical elements are compared in this paper with the typical levels for background Retisols gleic, Phaeozems, and Chernozems in the center of Western Siberia. It is established that use of the Netherlands MPCs for the soils under study gives fewer cases of false Pb pollution, but in all the soils under consideration the Netherlands MPCs for Ba is exceeded. False pollution by total Zn is observed in the top-soil; by Cr, Cu and V, in subsoil horizons of Retisols gleic as well as by Cr, Ni and V, in most samples of Phaeozems and Chernozems. It is concluded that for the soils under consideration the utilization of Russian MPCs gives fewer cases of false pollution by V. But in the background Retisols gleic, Russian MPCs for Mn and Pb accumulated in the biogeochemical barrier in the top-soil horizons are exceeded. Russian MPCs for metal mobile fraction are the most correct for Co, Cr, Cu, Ni and Pb. The MPCs for mobile fraction of biogenic Mn and Zn are underestimated. Background

levels (mg/kg in subindex) of total concentration (mobile fraction extracted by acetate-ammonium buffer) are proposed for $Ba_{404-515}$, $Co_{12-19(0.001-0.23)}$, $Cr_{143-188(0.001-0.72)}$, $Cu_{32-41(0.01-0.72)}$, $Mn_{423-874(0.09-64)}$, $Ni_{30-62(0.003-1.3)}$, $Pb_{18-27(0.003-0.87)}$, $V_{112-170}$ и $Zn_{55-104(0.004-0.42)}$ in Retisols gleic on Tobol Upland, Phaeozems on Ishym Upland, and Chernozems in the Trans-Ural region.

Key words: maximum permissible concentration, trace elements, Retisols, Phaeozems, Chernozems, vertical distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды определило необходимость мониторинга состояния почв для снижения возможного негативного воздействия на здоровье человека и состояние экосистем. К настоящему времени сложились два подхода к разработке уровней предельно допустимых концентраций для химических элементов (ПДК ХЭ). Первый ориентирован на экосистемы и(или) их отдельные компоненты, в том числе сохранение почвой способности к самоочищению, а второй предупреждает поступление с пищей и водой опасных доз веществ в организм человека. Первые ПДК ХЭ разработаны в России [1] и утверждены как нормативные акты в 1987 г. Оригинальные системы нормирования содержания ХЭ в почвах позднее созданы в Германии, Голландии, Канаде и США [2].

Опубликовано много данных о заниженности уровней российских ПДК [3, 4]. Согласно официальным нормативам Великобритании [5], в случаях превышения уровней ПДК на незагрязненных участках рекомендуется использовать значение местного геохимического фона, в то время как в России такой подход законодательно не утвержден [3, 4, 6]. Таким образом, для корректной оценки степени загрязнения необходимы данные о содержании ХЭ в естественных ландшафтах. Избыток для биоты веществ более тесно связан не с валовым содержанием, а с подвижными соединениями, усваиваемыми растениями в первую очередь и перемещающимися по пищевым цепочкам. Подвижные формы максимального количества ХЭ (Co, Cr, Cu, F, Mn, Ni, Pb и Zn) нормируются в России [7].

В отличие от хорошо исследованной европейской части России немногочисленны обобщения по содержанию валовых и подвижных форм ХЭ по фоновым почвам Западной Сибири [8–13], где в результате интенсификации хозяйственной деятельности, особенно нефтедобычи, возрастает техногенная нагрузка на экосистемы [14]. Например, на местах проливов буровых сточных вод увеличивается содержание Ba, Ni, Pb и Zn [4, 15]. Однако высокие содержания ХЭ в почве могут быть обусловлены природным накоплением на геохимических барьерах: биогеохимическом — гумусового горизонта A1 и особенно подстилки A0, сорбционном — текстурного Bt и щелочном — в карбонатном Bk. Не учитывая эти особенности для ХЭ с контрастной дифференциацией в почвах, можно ошибочно отнести объекты к загрязненным.

Цель данной работы — сравнить содержание Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V и Zn как приоритетных загрязнителей почв центральной части Западной Сибири с уровнями российских ПДК и методически близкими показателями других стран, обосновав наиболее подходящие для региона на основе анализа средних содержаний в фоновых ландшафтах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы проведены вне зон влияния локальных источников загрязнения на трех участках (см. рисунок) с дерново-подзолистыми глееватыми почвами (10 разрезов) Тобольского материка (вышеуказанность в южной части Обь-Иртышского междуречья), темно-серыми лесными (8) севера Ишимской равнины (в северной части водосбора р. Вагай) и черноземами оподзоленными и выщелоченными (7) восточного Зауралья (в пределах северной части междуречья рек Исеть и Миасс). Разрезы закладывали на междуречье и склонах, чтобы учесть перераспределение веществ в сопряженном ряду ландшафтов. Плотность минеральных горизонтов определяли с помощью бура Качинского, органо-генных — посредством вырезания проб известного объема.

Величина рН, содержание углерода органических веществ ($C_{орг}$) по И.В. Тюрину [16] и гранулометрический состав измерены в Эколого-геохимическом центре географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). Валовое содержание Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V и Zn определяли рентгенофлуоресцентным методом в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН с точностью 15 %, подвижные формы Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn в одной вытяжке ацетатно-аммонийного буфера (соотношение почва:раствор равно 1:5, время экстракции 18 ч) [7] — атомно-абсорбционным методом в МГУ и масс-спектрометрическим — во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.И. Федоровского с точностью 5 %. В почве выделяли аккумулятивное распределение металлов (монотонное

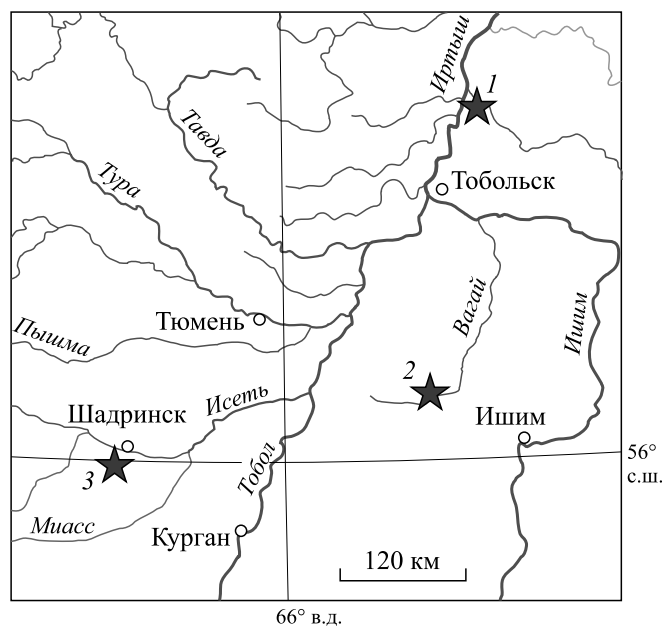
Карта-схема отбора почв в Западной Сибири.
Места отбора проб почв: 1 — дерново-подзолистых, 2 — темно-серых лесных, 3 — черноземов выщелоченных и оподзоленных.

уменьшение содержания с глубиной) и элювиальное (наличие локального минимума или максимума в средней части профиля или монотонное увеличение содержания). При этом различия составляют не менее 1,3 раза относительно нижнего горизонта.

Среднее содержание элемента (X , мг/кг) в почвах рассчитано по формуле:

$$X = \frac{\sum a \times c \times h}{H},$$

где a — плотность горизонта относительно нижнего, г/см³; c — содержание элемента, мг/кг в горизонте мощностью h , дм; H — глубина разреза, дм.



ПОДХОДЫ К НОРМИРОВАНИЮ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ

Российская система. В основе российских ПДК лежат четыре основных показателя вредности: общесанитарный (отражает способность почвы к самоочищению и биологической активности), транслокационный (связан с накоплением ХЭ в сельскохозяйственных растениях), миграционно-водный и миграционно-воздушный (переход ХЭ из загрязненной почвы в воды и атмосферный воздух соответственно). Разработаны ПДК для валовых содержаний Cr⁶⁺, Mn, Pb, S, V и подвижных форм Mn, Cu, Ni, Pb по общесанитарному показателю вредности; валовой Sb по миграционно водному показателю вредности; валовых As и Hg и подвижных форм Zn и F по транслокационному. ПДК по общесанитарному показателю вредности соответствует внесенному в песчаный (с 2 % физической глины) безгумусный субстрат водорастворимому количеству ХЭ, при котором микробиологическая активность и биохимические показатели уменьшаются не менее чем на 50 и 25 % соответственно относительно контроля. ПДК по транслокационному показателю вредности устанавливали в ходе вегетационных опытов по выращиванию растительной продукции на почвах, в которые ХЭ вносят в водорастворимой форме с последующим учетом рациона человека и содержания нормируемого ХЭ в питьевой воде. При разработке ПДК рекомендовано использовать в качестве тест-объекта преобладающие в конкретном регионе почвы, содержащие до 20 % физической глины и 0,5–2 % гумуса и с измеренными заранее значениями рН, емкостью поглощения, влагоемкостью и содержанием нормируемого ХЭ в валовой и подвижной формах. Учитывали также производственные процессы, использующие ХЭ, пути его поступления в почву, параметры и механизмы токсичности, а также уже имеющиеся уровни ПДК в воздухе и водах и утвержденные методы обнаружения. Устойчивость и изменение подвижности рекомендовалось оценивать в разных типах почв и одном типе почв с отличающимися физико-химическими факторами: гумусностью, кислотностью и влажностью [1, 7]. Однако на практике это реализовано только для Mn. Таким образом, большинство российских ПДК ХЭ соответствует уровням, критичным для нормального функционирования микробиоты, а для здоровья человека опасные уровни могут быть выше, так как загрязнители никогда не находятся в почве на 100 % в водорастворимой форме.

Хотя ПДК определяют как максимальный уровень ХЭ в пахотном слое абсолютно сухой почвы, не вызывающий отрицательного влияния на здоровье человека, и как самоочищающую способность почвы [1], эти нормативы также применяют к «населенным пунктам, зонам санитарной охраны источников водоснабжения, территориям курортных зон и отдельных учреждений» [7, с. 2].

Немецкая система. В почвах Германии контролируют валовое содержание As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb и Zn (табл. 1). Кроме того, для сельхозугодий (пашен и лугово-пастбищных территорий) обоснованы предохранительные, триггерные и действенные уровни в почве и сельхозпродукции, достижение

Таблица 1

Средние валовые содержания металлов в фоновых почвах и ПДК, мг/кг

Металл	Фоновые почвы			ПДК										
	Мир [20]	Нидерланды [17]	Западная Сибирь [3, 11, 12, 21]	Россия [7]	Нидерланды [17]	Канада [18]				ФРГ (триггерные) [16]				США [19]
						I	II	III	IIIa	IV	IIa	V	IIIa	
Ba	315–500	155	373–1360	–	165	750	500	2000		–	–	–	–	330
Co	7–10	9,0	1–23	–	33	40	50	300		–	–	–	–	13
Cr	42–200	100	5–190	0,05*/–	100	0,4*/64		1,4*/87		200	400	1000		1,0*/40
Cu	11–13	36	5–100	–	40	63		91		–	–	–	–	28
Mn	310–1007	–	50–1800	1500	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100
Ni	15–50	35	7–100	–	38	70	140	260	600	70	140	350	900	30
Pb	10–35	85	5–35	32	140	45		89		200	400	1000	2000	11
V	55–100	42	5–140	150	43	130		130		–	–	–	–	2,0
Zn	31–90	140	10–120	–	160	200		360		–	–	–	–	46

Примечание. Выделены уровни, отличающиеся от фоновых почв мира: серый фон — повышенные значения, жирным шрифтом — пониженные, жирный шрифт на сером фоне — диапазон средних для Западной Сибири значений шире среднемирового (меньше минимального и больше максимального). I — сельхозугодья; зоны: II — жилая (IIa) и парковая, III — коммерческого использования (IIIa — промышленная), IV — детские площадки, V — парковая и рекреационная. Прочерк — норматив отсутствует.

* Шестивалентный.

которых ограничивает перечень выращиваемых культур для снижения риска негативных последствий на организм человека [2, 17], что близко по методической основе к российским ПДК по транслокационному показателю вредности. Превышение триггерного уровня в почве предполагает процедуру мониторинга сельхозугодий, действенного — индицирует опасное загрязнение, которого необходимо избегать, или при достижении данного уровня определяет необходимость ремедиации почв. Триггерные и действенные значения (обоснованы также для подвижных As, Cu, Ni и Zn) зависят от типа землепользования и пути поступления ХЭ в организм человека: из почвы через пищу, из пыли при вдыхании или через питьевую воду при загрязнении поверхностных вод. Предупреждающие уровни содержания в почве Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb и Zn, разработанные для песчаных, суглинистых и глинистых почв, используют на участках с повышенным техногенным воздействием. Также они установлены для подвижных As, Cu, Ni и Zn.

Голландская и канадская системы. Методические основы голландской системы нормирования валового содержания As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V и Zn в почвах [18], используемые в ряде стран Европейского союза [6], разработаны для стандартной почвы, содержащей 10 % органического вещества и 25 % илстой фракции, с учетом местного геохимического фона страны (см. табл. 1). В качестве ПДК выбран уровень, обеспечивающий защиту всех видов организмов экосистемы от вредных воздействий ХЭ. Концентрация, характеризующая для биоты серьезный риск, соответствует уровню нарушения функционирования 50 % видов и/или микробиологических процессов.

В Канаде принятие ПДК для валового содержания As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Ta, U, V и Zn направлено на защиту наземных организмов и почвенных процессов от негативных последствий. Для сельскохозяйственных, селитебных и парковых территорий предполагается сохранение 75 % видов организмов и почвенных процессов, а для коммерческих и промышленных — 50 % [2, 19]. Таким образом, методическая основа разработки голландских и канадских ПДК близка к российским общесанитарным нормативам.

Система США. В США разработаны экологические ПДК ХЭ для защиты наземных организмов от веществ, содержащихся в почвах, на основе токсичности Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, Sb, V и Zn для отдельных представителей млекопитающих, птиц, растений, почвенных беспозвоночных и микроорганизмов, а также микробных процессов [20]. Как и в России, выбран минимальный уровень концентрации ХЭ в почве, который безопасен для всех рассматриваемых организмов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержания ХЭ в фоновых почвах Западной Сибири преимущественно соответствуют среднемировым уровням, за исключением Cr и Ba (см. табл. 1). В почвах Нидерландов повышен фон по Cu, Pb и Zn. За счет низкого содержания в почвах Ba и V уровень голландской ПДК может быть заниженным.

Рассчитанные средние содержания металлов в верхней метровой толще дерново-подзолистых глееватых почв западной части Тобольского материка, темно-серых севера Ишимской равнины и черноземов выщелоченных и оподзоленных Восточного Зауралья типичны для почв Западной Сибири уровней варьирования (см. табл. 1; табл. 2).

Дерново-подзолистые глееватые почвы запада Тобольского материка. В легкосуглинистых дерново-подзолистых глееватых почвах содержание илистой фракции увеличивается с глубиной (табл. 3), что определяет формирование сорбционного барьера. Значение величины рН уменьшается от горизонта А0 к Вт, возрастая в глеевом G.

В изученных почвах Тобольского материка выявлено элювиальное распределение валовых Co, Cr, Cu и Ni и аккумулятивное у наиболее биофильных — Mn и Zn (см. табл. 2). Также в отдельных пробах органических горизонтов накапливаются Ba (до 0,21 %) и Pb (до 206 мг/кг), содержание которых понижено в элювиальном горизонте (А2), что отражает миграцию в результате кислотного гидро-

Таблица 2

Валовое содержание металлов в почвах Западной Сибири, мг/кг

Горизонт, n	Металл								
	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Дерново-подзолистые почвы запада Тобольского материка									
A0, 25	427 / 145 40	9 / 110 28	70 / 94 16	20 / 161 8	1997 / 223 32	15 / 411 12	20 / 285 0 (12)	37 / 90 28 (0)	85 / 336 12
A1, 12	534 / 26 100	17 / 34 0	124 / 21 100	25 / 65 33	1265 / 140 50	22 / 56 17	20 / 42 0 (8)	115 / 15 100 (0)	76 / 32 0
A2, 16	521 / 13 69	11 / 47 0	133 / 20 63	32 / 60 31	511 / 117 13	19 / 43 6	14 / 46 0 (0)	113 / 13 69 (0)	50 / 26 0
Вт, 6	538 / 3 100	13 / 16 0	167 / 7 100	58 / 26 83	438 / 23 33	35 / 19 33	16 / 32 0 (0)	130 / 6 100 (0)	63 / 19 0
G, 19	540 / 3 100	14 / 40 0	174 / 8 100	45 / 73 26	364 / 85 5	38 / 25 37	23 / 25 0 (0)	134 / 8 100 (5)	63 / 14 0
Среднее	469	12	143	39	423	30	18	112	55
Темно-серые почвы севера Ишимской равнины									
A1, 22	584 / 6 100	21 / 19 0	212 / 14 100	49 / 20 86	1168 / 11 (0)	56 / 15 100	28 / 17 0 (14)	180 / 9 100 (5)	135 / 16 14
Вт, 5	530 / 4 100	20 / 22 0	201 / 4 100	40 / 53 55	825 / 5 (0)	70 / 7 100	29 / 20 0 (20)	185 / 4 100 (20)	104 / 22 5
Вк, 9	483 / 10 100	19 / 20 0	161 / 7 100	43 / 12 67	775 / 7 (0)	60 / 10 100	26 / 22 0 (11)	152 / 13 100 (44)	86 / 20 0
Среднее	515	19	188	41	874	62	27	170	104
Черноземы восточного Зауралья									
A1, 14	411 / 6 100	16 / 20 0	157 / 10 100	30 / 13 0	766 / 5 0	45 / 12 100	19 / 29 0 (7)	130 / 8 100 (0)	116 / 13 0
AB, 6	471 / 5 100	20 / 21 0	199 / 10 0	30 / 21 17	744 / 10 0	54 / 33 100	24 / 20 0 (17)	160 / 5 100 (100)	113 / 20 0
Вк, 8	404 / 10 100	18 / 15 0	174 / 5 100	37 / 44 25	717 / 7 0	70 / 8 100	25 / 23 0 (13)	133 / 12 100 (13)	71 / 13 0
Среднее	404	17	168	32	708	57	22	133	89

Примечание. В числителе слева от черты — среднее, справа — коэффициент вариации, %; в знаменателе — процент проб (n) с превышением уровня голландской (русской) ПДК. Среднее рассчитано для верхней метровой толщи.

Таблица 3

Содержание илистой фракции, $C_{орг}$ и величина pH в почвах

Почвы	Почвенные горизонты, <i>n</i>	Ил, %	$C_{орг}$, %	pH
Дерново-подзолистые глеевые	A0, 1/24	2,1	20 ± 13	6,0 ± 0,2
	A1, 11/12	2,9 ± 1,1	2,0 ± 1,6	5,2 ± 0,7
	A2, 11/16	3,3 ± 0,8	0,7 ± 0,4	4,7 ± 0,7
	Bt, 6/6	3,3 ± 0,9	0,5 ± 0,2	4,8 ± 0,3
	G, 19/19	3,7 ± 0,9	0,4 ± 0,2	5,2 ± 0,4
Темно-серые лесные	A1, 22/22	7,9 ± 1,1	4,7 ± 2,0	6,8 ± 0,4
	Bt, 20/22	8,9 ± 1	1,1 ± 0,4	7,0 ± 0,5
	Bк, 9/9	12 ± 4	0,8 ± 0,4	7,9 ± 0,1
Выщелоченные и оподзоленные черноземы	A1, 14/14	7 ± 1	6,9 ± 1,7	6,8 ± 0,4
	A1B, 6/6	10 ± 3	2,3 ± 1,2	7,6 ± 0,3
	Bк, 8/8	15 ± 9	1,1 ± 0,7	8,2 ± 0,4

Примечание. Приведены среднее, стандартное отклонение и число проб *n*: гранулометрический состав/pH и гумус.

лиза. Содержание Ва, в 91 % случаев превышающее уровень голландской ПДК, соответствует фоновым концентрациям в почвах мира [21], что может указывать на заниженность норматива: в фоновых почвах страны его показатель равен 155 мг/кг при уровне ПДК 165 мг/кг [18].

Содержание Со и Ni в изученных почвах находится в диапазоне, свойственном фоновым дерново-подзолистым почвам Западной Сибири [12], и редко превышает уровень голландских ПДК (см. табл. 1, 2). Содержание Сг и Си, укладываемые в фоновые значения, превышает уровни голландских ПДК в 78 и 46 % случаев соответственно; данные элементы встречаются чаще в органоминеральных

Таблица 4

Содержание подвижных форм металлов в почвах Западной Сибири, мг/кг

Горизонт, <i>n</i>	Металл						
	Со	Сг	Си	Mn	Ni	Pb	Zn
Дерново-подзолистые почвы запада Тобольского материка							
A0, 25	0,006/49	0,002/37	0,01/24	2,6/33	0,021/31	0,022/29	0,135/81
A1, 12	0,003/153	0,001/38	0,01/81	0,2/458	0,009/79	0,005/63	0,007/227
A2, 16	0,001/184	0,001/19	0,01/37	0,1/552	0,002/116	0,003/37	0,003/79
Bt, 6	0,002/69	0,001/21	0,01/58	0,1/55	0,003/32	0,004/18	0,002/30
G, 19	0,001/122	0,001/44	0,01/86	0,0/938	0,003/66	0,004/11	0,002/84
Среднее	0,001	0,001	0,009	0,1	0,003	0,003	0,004
Темно-серые почвы севера Ишимской равнины							
A1, 22	0,13/48	0,5/145	0,1/269	48/47	0,49/53	0,2/75	0,28/77
Bt, 5	0,06/68	1,0/79	0,9/255	17/35	0,79/49	0,8/50	0,18/329
Bк, 9	0,03/53	0,4/59	1,2/50	26/33	0,49/43	2,0/33	0,21/67
Среднее	0,07	0,72	0,72	26	0,62	0,87	0,20
Черноземы восточного Зауралья							
A1, 14	0,24/31	0,40/51	0,07/215	70/28	0,7/40	0,21/50	0,36/36
AB, 6	0,18/31	0,73/41	0,40/79	32/80	1,3/33	0,56/71	0,36/41
Bк, 8	0,26/26	0,86/43	0,78/96	77/27	1,7/25	0,90/43	0,51/111
Среднее	0,23	0,68	0,48	64	1,3	0,62	0,42

Примечание. Слева от черты — среднее, справа — коэффициент вариации, %. Среднее рассчитано для верхней метровой толщи.

и минеральных горизонтах. В 38 % случаев превышен уровень российской ПДК для Mn (до 10 раз), что обнаружено преимущественно в A0 и A1 из-за гипераккумуляции металла древесной растительностью и отмечалось ранее [11]. В горизонтах Bt и G концентрация Mn укладывается в фоновые уровни. Аналогичная ситуация свойственна Pb и Zn. Содержание Pb в 20 и 7 % случаев превышает российский и голландский норматив соответственно, Zn — в 18 % уровень голландской ПДК. Превышение уровня российской ПДК для ванадия (161 мг/кг) выявлено единично в горизонте G, а голландской — в 84 % проб. Все 11 проб с содержанием V ниже уровня голландской ПДК относятся к горизонту A0. Из них 8 — в наиболее оторфованной его части.

Содержание подвижных Co, Cr, Mn, Ni Pb и Zn максимально в горизонте A0 (локальные максимумы также встречаются в Bt) и минимально в A2 большинства разрезов. Равномерно распределена только подвижная Cu (табл. 4). Относительно уровней российских ПДК для подвижных соединений металлов почвы можно охарактеризовать как незагрязненные.

Темно-серые почвы севера Ишимской равнины. В тяжелосуглинистых темно-серых почвах с увеличивающейся с глубиной долей илистой фракции и величиной pH для биофильных Mn и Zn, а также Ba и Cr выявлено аккумулятивное распределение, а для Co, Cu, Ni, Pb и V — равномерное (см. табл. 2). Содержание Ni, Ba, Cr и V выше уровня голландской ПДК. По V превышение российского норматива обнаружено по одной пробе в горизонте A0 (112 мг/кг) и языке A1 (141 мг/кг) и по четырем — в Bk (121–144 мг/кг). Концентрации Co, Mn, Pb и Zn преимущественно меньше голландских нормативов. Превышение уровня ПДК для Co не зафиксировано, а для Zn обнаружено в пяти пробах: A0 (370 мг/кг) и A1 двух разрезов (163–182 мг/кг). В той же пробе A0 превышены уровни российских ПДК для Mn (0,6 %) и Pb (49 мг/кг). Высокие содержания Pb и V не имеют определенной приуроченности к горизонтам: три пробы с содержанием 32–36 мг/кг относятся к A1, четыре — к Bt (34–36 мг/кг) и одна — к Bk (37 мг/кг). Концентрация Cu выше уровня голландской ПДК в 68 % случаев. Ее пониженные содержания приурочены к горизонтам Bt и Bk.

У подвижных Mn и Zn доминирует аккумулятивное распределение; у Co, Cr, Cu, Ni и Pb — элювиальное (см. табл. 4). Уровни содержания подвижных Co, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn соответствуют литературным данным по фоновым дерново-подзолистым почвам и черноземам [12], а Cr превосходят верхний предел в 5–10 раз. При этом среднее содержание всех металлов ниже уровней российских ПДК для подвижных соединений. В единичном образце A0 превышен уровень ПДК для Mn (365 мг/кг) и Zn (37 мг/кг), что связано с их биогенным накоплением. В горизонте A1 этого же разреза много подвижного Mn (107 мг/кг). В трех пробах горизонта Bt превышен уровень ПДК для Cu (4,4–10,0 мг/кг), что, вероятно, связано с накоплением этого элемента на сорбционном барьере, а не с загрязнением. Превышения уровней ПДК в фоновых почвах Западной Сибири, связанные с накоплением подвижных форм Pb, Zn, Cu, Mn и Ni на биогеохимическом барьере, отмечали ранее только на примере торфяных почв [22]. По остальным металлам превышений уровней ПДК не обнаружено.

Выщелоченные и оподзоленные черноземы восточного Зауралья. В тяжелосуглинистых оподзоленных и выщелоченных черноземах с большим разбросом доли илистой фракции, содержание которой увеличивается от горизонта A1 до A1B, далее снижаясь в Bk (см. табл. 3), обнаружено элювиальное распределение валовых Cr, Pb, Ni и V, равномерное — Ba, Co, Cu и Mn, аккумулятивное — Zn (см. табл. 2). Во всех 28 пробах черноземов содержание Ba, Cr, Ni и V выше уровней голландских ПДК. Содержание V в семи пробах надкарбонатных горизонтов A1 и A1B превышает менее жесткий уровень российской ПДК, что, вероятно, определяется накоплением металла на внутрпочвенном щелочном барьере, а не антропогенной нагрузкой. Аналогичная ситуация характерна для Cu и Pb. Их повышенные до 2 раз относительно уровня голландской ПДК содержания (три пробы по Cu и четыре — по Pb) выявлены в надкарбонатных горизонтах трех разрезов черноземов. Содержание валовых Co, Mn и Zn ниже уровня ПДК.

В черноземах преобладает элювиальное распределение подвижных соединений изученных металлов, и содержание во всех 28 пробах ниже уровня ПДК (см. табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фоновые концентрации валового содержания (подвижных форм) в верхней метровой толще дерново-подзолистых глееватых легкосуглинистых почв западной части Тобольского материка составляют, мг/кг: Ba — 469, Co — 12 (0,001), Cr — 143 (0,001), Cu — 39 (0,01), Mn — 423 (0,09), Ni — 30 (0,003), Pb — 18 (0,003), V — 112 и Zn — 55 (0,004); в тяжелосуглинистых темно-серых почв севера Ишимской равнины: Ba — 515, Co — 19 (0,07), Cr — 188 (0,72), Cu — 41 (0,72), Mn — 874 (26), Ni — 62 (0,62),

Pb — 27 (0,87), V — 170 и Zn — 104 (0,2); в тяжелосуглинистых черноземах Восточного Зауралья: Ba — 404, Co — 17 (0,23), Cr — 168 (0,68), Cu — 32 (0,48), Mn — 78 (64), Ni — 57 (1,3), Pb — 22 (0,62), V — 133 и Zn — 89 (0,42). Для корректной оценки наличия или отсутствия антропогенного загрязнения необходимы данные не только о фоновых уровнях содержания ХЭ, но и о их вертикальном распределении в почвах.

В России разработаны ПДК для химических элементов в почве по общесанитарному, миграционно-водному и транслокационному показателям вредности, в Германии — по общесанитарному и транслокационному, Нидерландах и Канаде — по общесанитарному. Американская система нормирования содержания ХЭ в почвах близка к российской по общесанитарному показателю вредности, но в качестве тест-объектов дополнительно использованы растения и животные.

Применение голландских нормативов к почвам центральной части Западной Сибири дает меньше случаев ложного загрязнения Pb, а российской ПДК — V, хотя изначально предполагалось, что первые жестче отечественных, так как базируются на повышенном фоновом уровне содержания ХЭ. По голландским нормативам в западносибирских почвах выделяются зоны ложного загрязнения Ba. В дерново-подзолистых глееватых почвах запада Тобольского материка валовое содержание Mn, Pb и Zn в верхних (A0 и A1) горизонтах и Cr, Cu и V — в нижних (Bt и G) превышает уровни российских (Mn, Pb) и голландских (Cr, Cu, V и Zn) ПДК. В абсолютном большинстве проб темно-серых почв севера Ишимской равнины и черноземов восточного Зауралья превышены уровни голландских ПДК Cr, Ni и V.

С учетом уровней содержания в фоновых почвах российские ПДК адекватны в отношении валового содержания Mn и V, американские — Co, Cu и Pb, голландские — Pb и Zn, канадские — Ba, Co, Ni, Pb, V и Zn, немецкие — Cr, Ni и Pb. Российские ПДК для подвижных форм Co, Cr, Cu, Ni и Pb корректнее отражают естественный уровень содержания металлов в почвах центральной части Западной Сибири, чем разработанные для валового содержания. Однако содержание биофильных Mn и Zn в горизонте A0 и Cu в Bt зачастую выше уровней ПДК, что связано с их интенсивным природным накоплением на геохимических барьерах.

Для сохранения лидирующих позиций России в области нормирования содержания ХЭ в почвах необходимо разрабатывать ПДК для еще не контролируемых ХЭ и актуализировать существующие нормативы с учетом регионального фона валового содержания и подвижных форм, а также их вертикального распределения в фоновых почвах. Предложенные в настоящей статье фоновые концентрации валового содержания и подвижных форм ХЭ могут быть использованы для экологической оценки территорий Западной Сибири, испытывающих антропогенное воздействие. Дальнейшие исследования будут направлены на анализ более широкого спектра элементов и систем нормирования качества почв, применяемых в иных странах.

Работа выполнена в рамках проекта 5.4 Президиума РАН и при финансовой поддержке Российского научного фонда (17-77-20072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методические** рекомендации по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве. 2-е изд. — 1982 [Электронный ресурс]. — docs.cntd.ru/document/1200126486 (дата обращения 28.01.2018).
2. **Heemsbergen D., Warne M., McLaughlin M., Kookana R.** The Australian Methodology to Derive Ecological Investigation Levels in Contaminated Soils. — Canberra: CSIRO Land and Water Science Report, 2009. — 74 p.
3. **Сысо А.И.** Российские нормативы оценки качества почв и кормов: проблемы их использования // Экологический мониторинг окружающей среды: Материалы междунар. школы молодых ученых. — Новосибирск: Золотой колос, 2016. — С. 153–168.
4. **Могузова Г.В., Безуглова О.С.** Экологический мониторинг почв. — М.: Академический Проект: Гаудеамус, 2007. — 237 с.
5. **Fishwick S.** Soil Quality & Protection. Technical Report. — Bristol: Environment Agency, 2004. — 81 p.
6. **Чернова О.В., Бекецкая О.В.** Допустимые фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. — 2011. — № 9. — С. 1102–1113.
7. **ГН 2.1.7.2041-06.** Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве [Электронный ресурс]. — <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850511.htm> (дата обращения 28.01.2018).
8. **Этюды** по биогеохимии элементов-биофилов / Отв. ред. В.Б. Ильин. — Новосибирск: Наука, 1977. — 101 с.

9. Худяев С.А. Закономерности распределения стронция в почвообразующих породах и почвах юга Обь-Иртышского междуречья // Сиб. экол. журн. — 2007. — Т. 14, № 5. — С. 809–817.
10. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва–растение в условиях юга Западной Сибири. — Омск: Вариант-Омск, 2013. — 232 с.
11. Московченко Д.В. Экогеохимия нефтегазодобывающих районов Западной Сибири. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2013. — 259 с.
12. Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральная дифференциация форм соединений металлов в почвенных суглинистых катенах центра Западно-Сибирской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. — 2019. — № 3. — С. 25–37.
13. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 277 с.
14. Mueller L., Sheudshen A.K., Syso A., Barsukov P., Smolentseva E.N., Khodzher T., Sychev V.G., Romanenkov V.A., Rukhovich O.V., Puzanov A., Dannowski R., Schindler U., Eulenstein F. Land and water resources of Siberia, their functioning and ecological state // Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia. — Cham; Switzerland: Springer, 2016. — P. 3–73.
15. Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т. Содержание химических элементов в торфяных почвах, засоленных буровыми сточными водами на участке добычи нефти в Среднем Приобье // Агрохимия. — 2013. — № 1. — С. 75–84.
16. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. — М.: ГЕОС, 2006. — 400 с.
17. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999 [Электронный ресурс]. — <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/BBodSchV.pdf> (дата обращения 24.01.2018).
18. Crommentuijn T., Sijm D., Bruijn J. de, Hoop M. van den, Leeuwen K. van, Plassche E. van de. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations // Journ. of Environm. Management. — 2000. — Vol. 60. — P. 121–143
19. ССМЕ (Canadian Council for Ministers for the Environment). 1999. Canadian Environmental Quality Guidelines [Электронный ресурс]. — <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html> (дата обращения 28.01.2018).
20. Baseline Ecological Risk Assessment Wastebeds 1 through 8 Site Geddes. — New York: New York State Department of Environmental Conservation, 2011. — 272 p.
21. Caritat P. de, Reimann C., Bastrakov E. Comparing results from two continental geochemical surveys to world soil composition and deriving Predicted Empirical Global Soil (PEGS2) reference values // Earth and Planetary Science Letters. — 2012. — Vol. 319–320. — P. 269–276.
22. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах севера Западной Сибири // Вестн. Тюмен. ун-та. Экология и природопользование. — 2015. — Т. 1, № 3 (3). — С. 163–174.

Поступила в редакцию 09.02.2018

После доработки 28.04.2018

Принята к публикации 19.09.2019