

УДК 631.445.25 (550.42)

## МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ СОПРЯЖЕННОГО РЯДА ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ТОБОЛ-ИШИМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Константинова Елизавета Юрьевна,  
konstantliza@gmail.com

Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

**Актуальность.** Изучение особенностей распределения и аккумуляции микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, в почвах сельскохозяйственных ландшафтов является одним из наиболее актуальных направлений исследовательской работы в почвоведении, агрохимии и геоэкологии. Данные исследования характеризуются высокой значимостью для территории юга Тюменской области, которая отличается ярко выраженной сельскохозяйственной специализацией. Исследования особенностей и факторов распределения микроэлементов в почвах агроландшафтов могут быть востребованными для комплексной эколого-геохимической оценки территории, уточнения региональных фоновых концентраций элементов-поллютантов в почвах, при разработке мероприятий, направленных на снижение риска загрязнения различных компонентов природной среды и повышение качества сельскохозяйственной продукции.

**Цель работы:** исследование особенностей распределения ряда микроэлементов (Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr) в почвах сопряженного ряда лесостепной зоны Тобол-Ишимского междуречья на примере ключевого участка и выявление соответствия с гранулометрическим составом, содержанием гумуса, величиной pH.

**Методы исследований:** полевые почвенные и ландшафтно-геохимические исследования, определения pH водной почвенной суспензии потенциометрическим методом, гранулометрический анализ пирофосфатным методом с использованием лазерного микроанализатора, определение валовых содержаний металлов рентгенфлуоресцентным анализом полного отражения (TXRF), определение содержания гумуса по методу Тюрина, статистическая обработка данных.

**Результаты.** Исследованы содержания и особенности распределения Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr в почвах сопряженного ряда лесостепной зоны центральной части Тобол-Ишимского междуречья. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что почвы рассматриваемого участка центральной части Тобол-Ишимского междуречья обогащены Co, Cu, Pb и обеднены Ni, Zn, Sr, Mn по сравнению со средним содержанием в почвах и почвообразующих породах юга Западной Сибири. Выявлено, что почвы участка, несмотря на положение в рельефе, слабоконтрастны по гранулометрическому составу; данный параметр практически не влияет на распределение микроэлементов.

### Ключевые слова:

Микроэлементы, тяжелые металлы, лесостепь, агроландшафт, Тюменская область, Западная Сибирь, Тобол-Ишимское междуречье.

### Введение

Значительное увеличение концентраций тяжелых металлов и металлоидов в почвах агроландшафтов, обусловленное их интенсивным поступлением с атмосферными выбросами промышленных предприятий и выхлопными газами автомобильного транспорта, внесением органических и минеральных удобрений, значительно увеличивает риск ухудшения эколого-геохимической обстановки в районах с развитым сельским хозяйством. Избыточное содержание элементов-поллютантов, способных перемещаться по трофическим цепочкам в почвах агроландшафтов, оказывает негативное воздействие на качество сельскохозяйственной продукции и представляет существенную опасность для здоровья животных и человека [1].

В пределах основных сельскохозяйственных районов Западной Сибири располагаются главным образом лесостепные и степные ландшафты. Данные ландшафты подверглись наибольшей трансформации в процессе интенсивного развития сельского хозяйства региона, наблюдавшегося в 50–70-е гг. XX в. [2]. Значительное изменение характера землепользования, активное использование средств химизации и механизации привели к

повышению опасности эрозионных процессов, снижению продуктивности биоценозов, накоплению химических элементов-поллютантов в почвах.

Исследованиям особенностей поведения микроэлементов, в том числе тяжелых металлов и металлоидов, в почвах и ландшафтах основных геоморфологических районов лесостепной и степной зон Западной Сибири посвящено значительное количество работ. Фундаментальные исследования в области агрохимии, почвоведения и геохимии были выполнены для территорий Присалаирской равнины [3–6] Приобского плато [1, 4, 5], Кулундинской равнины [1, 3–6] Барабинской низменности [1, 4–6] и Омского Прииртышья [5, 7–9].

В то же время следует отметить, что геохимические особенности почв и ландшафтов западной части лесостепной зоны Западной Сибири (Тобол-Ишимского междуречья) исследованы в меньшей степени. В отдельных работах по содержанию химических элементов в почвах лесостепной зоны юга Тюменской области [10–12] не рассматриваются особенности профильного распределения микроэлементов, связь микроэлементного состава почв с особенностями почвообразования.

В данной работе приводятся результаты исследования особенностей распределения Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr в почвах сопряженного ряда участка, типичного для территории лесостепной зоны, в пределах центральной части Тобол-Ишимского междуречья.

#### Объекты и методы исследований

Полевые работы проводились на участке, расположенном в 3 км восточнее деревни Окуневка (Омутинский район Тюменской области), в 2,5 км к северу от трассы Тюмень-Ишим. Ключевой участок представляет собой участок поля (залежи), пересекаемый неглубокой вытянутой с северо-запада на юго-восток западиной и окруженный со всех сторон березовыми и осиново-березовыми колками. Ширина участка – 600 м, протяженность с север на юг – 800 м, перепад высот в пределах участка – около 3 м.

Выбор участка обусловлен следующими причинами: во-первых, участок находится на достаточном удалении от городов и объектов инфраструктуры; во-вторых, характеризует типичный для лесостепной зоны Тобол-Ишимского междуречья комплекс колок-поле.

Участок исследований располагается в пределах субгоризонтальной структурно-денудационной (эрозионной) плоской и слабоволнистой Ишимской равнины (абс. высоты 120–155 м) с неглубоким расчленением [13, 14]. Покровные отложения представлены характерными для юга Западной Сибири лессовидными суглинками мощностью 3–8 м [10, 14]. По гранулометрическому составу преобладают средние и тяжелые суглинки; глины и легкие суглинки встречаются значительно реже. Покровные отложения локальных депрессий характеризуются более тяжелым гранулометрическим составом и иногда признаками слабого засоления [14, 15].

В соответствии с физико-географическим районированием юга Тюменской области [16] рассматриваемая территория относится к Ишим-Тобольской провинции подзоны северной лесостепи. Для района исследований характерно чередование степных участков с березовыми лесами по западинам и плоским плакорам. Луговые степи и остепненные луга с темно-серыми лесными почвами и черноземами выщелоченными и оподзоленными занимают повышенные элементы рельефа. Березовые травянистые леса на темно-серых лесных почвах и солодах приурочены к междуречьям, лощинам и западинам на гривах; по ложбинам стока распространены минератрофные болота и цепочки мелких озер [14].

Территория Омутинского района является зоной интенсивного сельскохозяйственного освоения: площадь сельскохозяйственных угодий составляет 94,2 тыс. га, из них пашня занимает 45 тыс. га [17]. Наибольший удельный вес в структуре сельскохозяйственных угодий занимают паш-

ни – 46,5 тыс. га (50,3 %), сенокосы – 21 тыс. га (22,6 %), пастбища – 14,6 тыс. га (15,7 %), залежи – 10,1 тыс. га (11 %), многолетние насаждения – 232 га (0,4 %) [18].

В пределах ключевого участка было заложено 13 почвенных разрезов и отобрано 5 поверхностных почвенных проб, характеризующих основные ландшафтные позиции: участки пашни и колковых лесов на плакорах, склоны западины различной крутизны и степени эродированности, нижнюю часть западины. Для всех разрезов были выполнены почвенные описания и произведен отбор проб по генетическим горизонтам (всего 80 образцов). Описания почв участка даны в соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» (2004) [19].

Перед выполнением химико-аналитических работ была проведена предварительная пробоподготовка почвенных образцов по общепринятой методике [20]. Все химико-аналитические работы выполнены автором в Эколого-геохимическом научно-образовательном центре географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Химико-аналитические работы включали следующие виды определений (во всех 80 образцах): рН водной почвенной суспензии потенциометрическим методом, органического углерода методом Тюрина [20], гранулометрического состава лазерным анализатором Fritsch «Analysette 22 Economy» [21]. В 80 пробах были определены валовые содержания следующих химических элементов: Ti, Cr, Mn, Ni, Co Cu, Zn, Pb, Sr, Fe.

Определение валового содержания микроэлементов выполнено рентгенфлуоресцентным спектрометром Rontec PicoTAX, работающим по схеме полного отражения. Пробоподготовка и определение микроэлементов производились по следующей схеме [22]: в полипропиленовые конические пробирки EPPENDORF объемом 1,5 мл помещали навески подготовленной почвы в 0,02–0,03 г, 1,25 мл раствора Triton x-100 (10 %) и 0,01 мл Se стандарта (раствор 1 г/л). Затем пробирки встряхивались в течение 20 с в центрифуге. После этого пипеткой 0,01 мл помещали полученный раствор в центр круглого стекла. Круглое стекло было предварительно промыто деионизированной водой и высушено. Далее проба на стекле помещалась в нагретый до 800 °С сушильный шкаф до полного высыхания раствора. Высушенную пробу помещали в приемную кювету спектрометра. Последующие манипуляции проводились с помощью специального программного обеспечения.

Рентгенфлуоресцентный метод полного отражения (TXRF) для определения элементного состава почв характеризуется достаточно высокой точностью при правильной калибровке прибора [23]. По сравнению с более распространенным методом определения валового содержания микроэлементов – масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) – наибольшая точность

определения характерна для Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, в то же время содержания Sr и Pb могут быть несколько завышенными [23, 24].

Для интерпретации и анализа данных проводилась их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA и визуализация. В первую очередь была проведена проверка выборки из данных, полученных по результатам измерений (общих свойств почв и содержания микроэлементов), на нормальность распределения с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Вычислены статистические характеристики распределения исследуемых микроэлементов как для исследуемого участка в целом, так и для отдельных типов почв, встречающихся в пределах участка: среднее, минимальное и максимальное значение, стандартное отклонение, стандартная ошибка среднего, коэффициент вариации.

Были выделены корреляционные связи между определяемыми элементами и некоторыми свойствами почв (содержание илстой фракции, рН, гумус). Элементы со схожим распределением объединялись в ассоциации.

Для определения парагенетических ассоциаций микроэлементов был проведен кластерный анализ методом объединения.

#### Результаты и их обсуждение

Почвы автономных позиций (участки березовых колков и пашни на плакорах) представлены преимущественно темно-серыми лесными почвами (табл. 1, разр. 1) и агротемно-серыми глубокопахотными почвами (табл. 1, разр. 5). Для почв, формирующихся в автономных ландшафтных позициях, характерна дифференциация профиля по гранулометрическому составу: наблюдается некоторое обеднение илстой фракцией нижней части темного гумусового горизонта PU и наличие выраженного субэлювиального горизонта BEL. Также важным признаком элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля является типичное для серых лесных почв «седение» оподзоленного горизонта [25]. Значения рН в пределах профиля меняются слабоконтрастно (от 6 в гумусовых горизонтах до 8 в нижней части профиля), что обусловлено довольно глубоким залеганием карбонатов и их интенсивным выщелачиванием из профиля. Темно-серые почвы, формирующиеся под березовым колком, по сравнению с почвами под пашней характеризуются большей глубиной вскипания карбонатов и большей выщелоченностью. Для них характерна значительная мощность гумусового горизонта (около 30 см) с равномерным содержанием гумуса (5–6 %).

Агротемно-серые почвы склонов различной крутизны (или агрочерноземы глинисто-иллювиальные средне- и тяжелосуглинистые) различаются в первую очередь по степени эродированности: по мощности гумусового горизонта и содержанию органического вещества. Агротемно-серые почвы

верхних более пологих частей склонов (табл. 1, разр. 16) слабо эродированы: для них характерен ярко выраженный аккумулятивный тип распределения гумуса по профилю, даже несмотря на распашку. В некоторых разрезах наблюдается незначительное повышение содержания гумуса с глубиной (табл. 1, разр. 7), что может свидетельствовать о признаках наличия морфологически невыраженного второго гумусового горизонта, характерного для почв Омутинского района [10]. В целом почвы пологих склонов близки по своим свойствам к почвам автономных позиций.

Агротемно-серые почвы нижних более крутых частей склонов (табл. 1, разр. 13) западины характеризуются более высокой степенью эродированности: наименьшей среди всех почв участка мощностью гумусового профиля, глубокой распашкой (с вовлечением текстурного горизонта), обедненностью гумусом (около 4 %), по сравнению с почвами автономных позиций. Наблюдается заметная тенденция к уменьшению глубины вскипания карбонатов (54 см) по сравнению с почвами автономных позиций (80 см). В почвах практически не выражена элювиально-иллювиальная дифференциация профиля.

Почвы днища западины на пашне представлены агросолодами гумусово-стратифицированными глубокопахотными (табл. 1, разр. 7), а почвы днища западины под кустарниками и лесной растительностью – солодами гумусово-стратифицированными (табл. 1, разр. 8) и темного гумусовыми (табл. 1, разр. 18) соответственно. Данные почвы среди всех почв сопряженного ряда характеризуются наибольшей степенью гидроморфизма, связанного с сезонным переувлажнением и проявляющегося в виде оруденения в текстурных горизонтах. Привнос материала из поверхностных горизонтов вышележащих по профилю почв приводит к формированию мощного (30–40 см) стратифицированного темного гумусового горизонта (RY) с высоким содержанием гумуса (до 7 %).

Статистическая обработка результатов определения общих свойств почв показала, что величины рН соответствуют нормальному распределению. Распределение остальных свойств почв и содержания рассматриваемых микроэлементов отличается от нормального.

Полученные данные о содержании микроэлементов в почвах участка в целом приведены в табл. 2.

Выбранный способ определения (TXRF) наиболее точен в отношении следующих микроэлементов: Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, поэтому высокая вариативность полученных значений связана не с ошибкой определения, а с неоднородностью выборки. Так, значительный разброс абсолютных значений характерен для таких элементов, как Ti, Mn, Cu и Zn (табл. 2), что, вероятно, связано со значительным количеством образцов выборки, отобранных из органических и органо-минеральных почвен-

**Таблица 1.** Общие свойства изученных почв участка

**Table 1.** General properties of the studied soils

Почва Soil	Положение разреза Location	Горизонт Soil layer	Глубина отбора, см Average sampling depth, cm	pH	Гумус, % Humus, %	Содержание фракций, %; размер, мм Content of fractions, %; size, mm					
						<0,001	0,001–0,005	0,005–0,01	0,01–0,05	0,05–0,25	0,25–1
Темно-серая, разр. 1 Dark gray soil, p. 1	Березовый колок на плакоре Birch outlier on a flatland	AU <sub>e</sub>	15	6,1	6,2	5,72	23,85	11,28	56,56	2,59	0,00
		AU <sub>e</sub>	25	6,2	4,9	6,06	26,40	8,43	50,84	2,33	5,94
		BEL	35	6,2	1,8	8,03	29,64	14,86	44,50	2,95	0,02
		BT	55	6,2	1,0	7,77	26,19	16,14	45,91	0,90	3,09
		BT	85	6,7	0,8	8,39	28,07	13,31	43,15	6,97	0,11
		BC <sub>ca</sub>	100	8,0	0,8	13,35	36,12	10,50	39,16	0,86	0,01
Агротемно-серая глубокопахотная, разр. 5 Postagrogenic dark gray soil, p. 5	Участок пашни на плакоре Tilled area on a flatland	PU	13	6,6	4,2	9,52	35,54	3,19	51,54	0,20	0,01
		BT <sub>yu</sub>	35	6,6	1,1	8,58	30,37	17,32	43,35	0,38	0,00
		BT <sub>yu</sub>	65	6,5	1,2	9,21	30,20	8,67	50,68	1,24	0,00
		BT <sub>yu</sub>	100	7,5	0,9	12,02	32,41	13,27	41,77	0,52	0,01
		BC <sub>ca</sub>	114	8,0	0,8	17,27	42,60	7,63	32,29	0,21	0,00
Агротемно-серая глубокопахотная, разр. 16 Postagrogenic dark gray soil, p. 16	Верхняя более пологая часть склона западины Upper smooth part of the depres- sion slope	PU	13	7,2	6,0	7,82	31,48	15,50	43,18	2,02	0,00
		PU	30	7,2	5,2	9,28	33,23	14,70	42,00	0,79	0,00
		BT	47	7,5	1,4	8,07	27,39	16,17	46,37	2,00	0,00
		BT	85	7,8	0,9	9,57	29,55	16,14	40,94	3,79	0,01
		BC <sub>ca</sub>	95	8,0	1,0	12,24	32,25	13,28	40,87	1,34	0,02
Агротемно-серая, разр. 13 Postagrogenic dark gray soil, p. 13	Нижняя более крутая часть скло- на западины Lower steep part of the depression slope	PU <sub>rh,e</sub>	13	6,8	6,4	7,98	31,65	15,95	41,83	2,59	0,00
		PU <sub>rh,e</sub>	30	6,8		7,55	28,61	18,00	43,44	2,40	0,00
		BEL	42	6,6	5,6	9,12	27,65	15,63	42,78	4,82	0,00
		BT	65	6,8		1,7	7,78	24,14	16,10	47,34	4,64
		BT	85	7,6	1,0	8,23	23,30	14,53	44,89	3,29	5,76
		BC <sub>ca</sub>	100	7,9	0,9	7,72	20,11	10,85	31,44	2,73	27,15
Агросолюдь, разр. 7 Postagrogenic dark deep water accu- mulative solod, p. 7	Днище западины на пашне Tilled area on depression bottom	PU <sub>rh</sub>	12	6,3	3,3	6,17	27,01	16,80	44,53	5,44	0,05
		AU'	31	6,1	5,9	6,59	26,52	16,69	47,39	2,81	0,00
		AU''	50	6,3	7,9	4,42	21,01	16,90	55,70	1,97	0,00
		AEL	63	7,0	0,7	4,79	19,01	16,79	53,32	6,09	0,00
		EL	73	7,0	0,8	5,42	21,76	18,25	50,66	3,91	0,00
		BTG <sub>ox</sub>	90	6,9	0,8	9,57	28,58	15,50	44,41	1,92	0,02
		BTG <sub>ox</sub>	129	7,1	0,7	4,60	12,65	7,97	23,82	3,56	47,40
		BTG <sub>ox</sub>	129	7,1	0,7	4,60	12,65	7,97	23,82	3,56	47,40
Солодь гумусово-стратифициро- ванная, разр. 8 Dark deep water accumulative solod, p. 8	Ивняк в днище западины Willow in local depression	RY	5	6,5	7,0	8,26	30,36	16,61	40,99	3,76	0,02
		AY	15	6,0	5,8	12,04	29,64	3,68	52,85	1,79	0,00
		AEL	27	6,1	3,0	5,99	28,40	5,96	56,62	2,99	0,04
		EL	33	6,5	0,8	5,19	21,22	6,09	50,01	17,48	0,01
		BT	43	6,5	1,0	8,76	29,00	16,38	44,62	1,24	0,00
		BT	60	6,5	0,9	10,89	33,25	14,61	40,49	0,75	0,01
Солодь темногумусовая, разр. 18 Solod, p. 18	Осиновый колок в понижении Aspen outlier in a hollow	AEL	9	5,4	6,6	3,52	14,99	11,90	37,65	5,54	26,40
		EL <sub>fn</sub>	20	5,5	0,6	4,18	17,23	15,70	56,98	5,91	0,00
		BEL	33	6,1	0,6	5,87	18,51	12,63	46,33	11,88	4,78
		BTG <sub>ox</sub>	55	6,1	0,8	16,79	38,87	11,51	31,64	1,19	0,00
		BTG <sub>ox</sub>	85	6,1	0,9	9,25	25,42	15,89	48,61	0,83	0,00

ных горизонтов и существенно отличающихся по содержанию данных элементов от субстрата. Значения коэффициента вариации, как меры относительного варьирования, также подтверждают вывод о неоднородности распределения наблюдаемых содержаний рассматриваемых микроэлементов.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что почвы Tobol-Ишимского междуречья обогащены Cu, Pb и обеднены Mn Ni, Zn, Sr по сравнению со средним содержанием в почвах и почвооб-

разующих породах юга Западной Сибири. Более низкое содержание Sr в исследованных почвах может быть объяснено тем, что северный ареал лесостепи Tobol-Ишимского междуречья по условиям миграции и аккумуляции микроэлементов ближе к слабокислым лесным ландшафтам, нежели к аридным степным (Барабинская низменность), что проявляется особенно ярко для Cu.

Высокие наблюдаемые содержания Co (табл. 3) в почвах участка являются отличительной чертой

**Таблица 2.** Основные статистические показатели изученных микроэлементов, включая все горизонты почв участка

**Table 2.** Basic statistics of the studied micronutrients including all layers of the soils

Показатель/Criteria	Ti*	Cr	Mn*	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
Количество образцов, шт./Sample, pcs	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Среднее/Mean	158,94	65,56	28,85	49,63	27,71	57,53	50,21	53,20	21,80
Минимум/Minimum	14,90	11,00	3,30	8,00	6,00	6,00	9,00	12,00	5,00
Максимум/Maximum	1034,20	289,00	164,20	132,00	160,00	843,00	243,00	328,00	75,00
Стандартное отклонение/Standard Deviation	169,21	52,10	31,77	29,62	22,32	111,69	47,18	43,61	15,17
Стандартная ошибка среднего/Standard Error	18,92	5,83	3,55	3,31	2,50	12,49	5,28	4,88	1,70
Коэффициент вариации, %/CV, %	106,46	79,47	110,15	59,69	80,54	194,16	93,96	81,98	69,57

Примечание. Содержания Mn и Ti приведены в мг/100 г почвы.

Note. Contents of Mn and Ti are in mg/100 g soil.

Приишимья и тяготеющих к нему регионов. Причины повышенного содержания данного элемента в почвах и почвообразующих породах этой территории до конца неизвестны [6].

Средние содержания Cr (табл. 3) в почвах территории исследований полностью соответствуют фоновым значениям для юга Западной Сибири.

**Таблица 3.** Содержание микроэлементов в почвах Tobol-Iшимского междуречья (в мг/кг)

**Table 3.** Content of trace elements in soils of Tobol-Ishim interfluvial (in mg/kg)

Элемент Element	Изученные почвы в целом (n=80) Studied soils as the whole (n=80)	Темно-серые почвы (n=7) Dark grey soils (n=7)	Агропеллоиды (n=43) Postagrogenic dark grey soils (n=43)	Агросолоды (n=18) Postagrogenic dark deep water accumulative solods (n=18)	Солоды (n=12) Solods (n=12)	Почвообразующие породы [6] Soil-forming rocks [6]	Геохимический фон [1] Geochemical background [1]	Почвы Тюменской области [10] Soils of Tyumen region [10]
Ti*	158,94	142,34	159,17	105,01	248,73	390	410	-
Cr	65,56	44,43	73,49	51,78	70,17	63	61	-
Mn*	28,84	48,27	30,93	17,59	26,91	77	83	-
Co	49,63	52,14	50,56	33,50	69,00	11	11	17-29
Ni	27,71	62,57	24,53	24,56	23,50	41,4	40	56
Cu	57,52	117,00	44,56	33,39	105,50	44,2	43	53
Zn	50,21	60,29	46,88	63,83	35,83	82,4	92	40
Sr	53,20	44,43	54,70	43,06	68,17	548	595	-
Pb	21,80	29,71	21,53	18,67	22,83	17,9	18	14

Примечание. Концентрация Mn и Ti приведена в мг/100 г почвы.

Note. Concentration of Mn and Ti is in mg/100 g soil.

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют о том, что почвы сопряженного ряда в пределах рассматриваемого участка (табл. 3) значительно отличаются по их валовым содержаниям

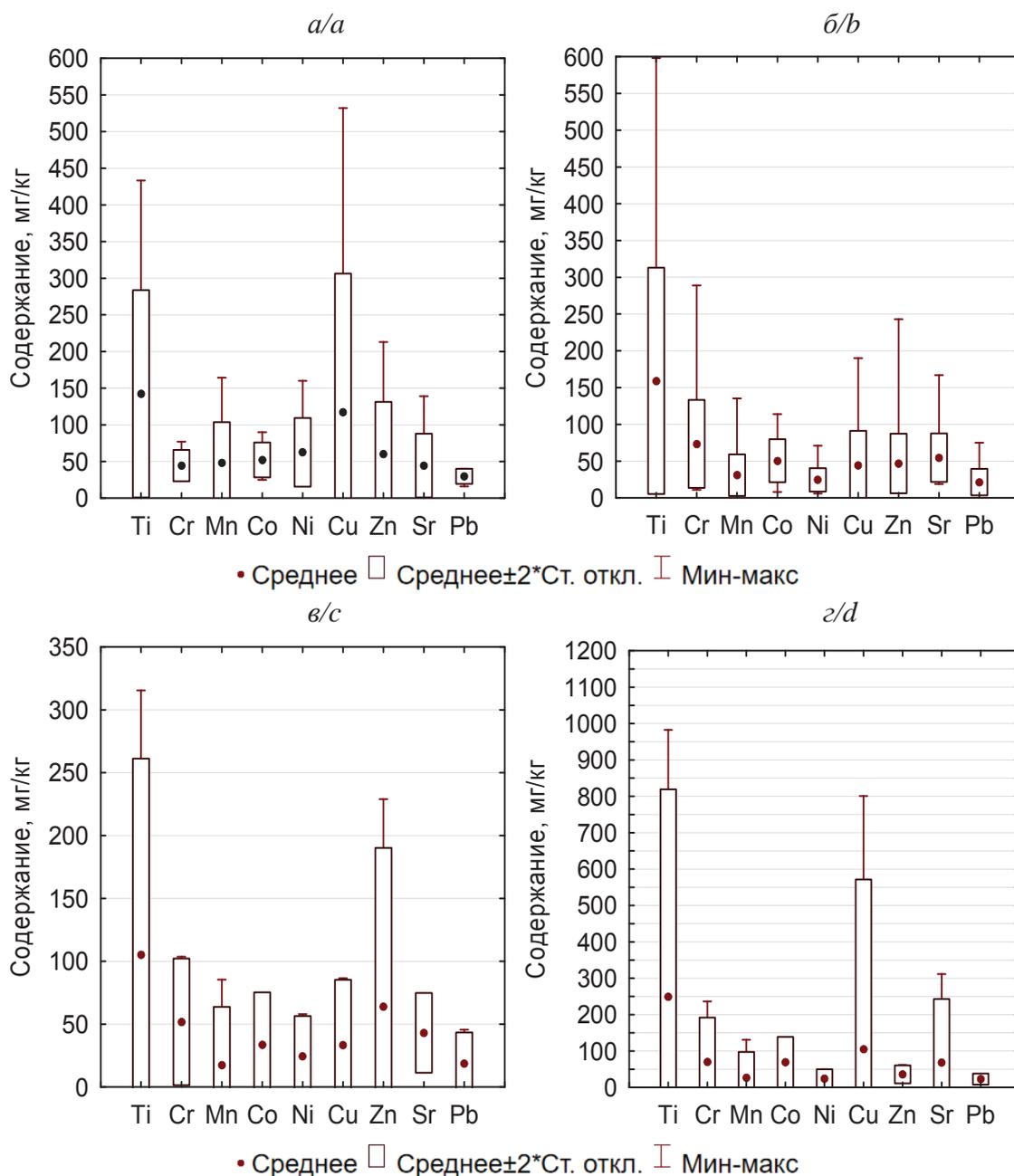
(рис. 1) и условиям распределения микроэлементов по профилю.

Наиболее высокие концентрации Pb, Zn, Cu, Ni и Mn отмечены для темно-серых почв автономных позиций (рис. 1, а). Данный факт объясняется тем, что для почв плакоров характерны малая эродированность, значительный запас органического вещества и, соответственно, наличие контрастного биогеохимического барьера в поверхностных горизонтах. Биохимический барьер препятствует выносу этих микроэлементов из ландшафта за счет образования соединений с малоподвижными гуминовыми кислотами. Кроме того, следует отметить, что в лесостепных ландшафтах миграция Pb затруднена вследствие образования слаборастворимых карбонатов, препятствующих выносу Pb из почв автономных позиций [26].

Агротемно-серые почвы, формирующиеся на склонах западины (рис. 1, б), обеднены микроэлементами, отличающимися интенсивной биогенной аккумуляцией (Cu и Zn). Содержание остальных микроэлементов в них практически не отличается от содержания в почвах плакоров.

Солоды и агросолоды, формирующиеся в днище западин, отличаются повышенными содержаниями Cr, Sr, Pb и Cu. В лесостепных ландшафтах со значениями кислотности среды близкими к нейтральным Cu и другие элементы, характеризующиеся интенсивной биогенной аккумуляцией, малоподвижны, что определяет более высокие содержания Cu как в темно-серых почвах автономных ландшафтов, так и в почвах понижений с повышенным гидроморфизмом (солодах, агросолодах). Особенно высоким сорбционным сродством с Cu обладает двуокись Mn, с чем связано накопление Cu в марганцевых конкрециях, пленках, дендригах. Медь аккумулируется в подчиненных ландшафтах в пределах окисленных горизонтов на железисто-марганцевых конкрециях, в автономных позициях в условиях близкого залегания карбонатов [27].

При изучении особенностей распределения микроэлементов в почвах участка были установлены взаимосвязи между содержанием микроэлементов



**Рис. 1.** Средние показатели содержания микроэлементов в почвах: а – темно-серых; б – агротемно-серых; в – агросолодах; г – солодах гумусово-стратифицированных. Концентрация Mn и Ti приведена в мг/100 г почвы

**Fig. 1.** Average values of trace elements in soils: а – dark gray soils; б – postagrogenic dark gray soils; в – postagrogenic dark deep water accumulative solod; г – solod. The concentrations of Mn and Ti are given in mg/100 g soil

и основных свойств почв с использованием непараметрического коэффициента Спирмена. Установлена положительная значимая степень корреляции между содержанием всех рассматриваемых элементов и содержанием Fe в почвах участка исследования (табл. 4). При этом для Ti, Cr, Mn, Sr наблюдается значимая положительная корреляция с содержанием Fe; для Co, Cu, Zn и Pb наблюдается существенная или относительно слабая корреляция.

Корреляция между содержанием микроэлементов и органическим веществом в пределах рассматриваемого участка выражена достаточно слабо. Слабая положительная корреляция наблюдается между содержанием гумуса и Cu (табл. 4).

Следует отметить, что корреляционная связь содержания микроэлементов с гранулометрическим составом для почв не является очевидной, поскольку в целом почвы участка по данному показателю слабоконтрастны. Интересным представляется

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием микроэлементов и отдельными почвенными свойствами ( $n=80$ )

**Table 4.** Spearman Rank Order Correlations between the content of trace elements and selected soil properties ( $n=80$ )

Переменные Variable	Гумус Humus	Пыль средняя (0,005–0,01 мм) Medium silt (0,005–0,01 mm)	Пыль крупная (0,01–0,05 мм) Sandy silt (0,01–0,05 mm)	Песок мелкий (0,05–0,25 мм) Fine sand (0,05–0,25 mm)	Песок средний и крупный (0,25–1,0 мм) Coarse and medium sand (0,25–1,0 mm)	Fe	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb
Ti	-0,23*	-0,06	0,17	0,08	0,08	0,85**	1,00	0,58**	0,67**	0,47**	0,18	0,40**	0,56**	0,57**	0,54**
Cr	-0,01	0,02	-0,03	0,06	-0,08	0,59**		1,00	0,58**	0,18	0,31**	0,45**	0,44**	0,48**	0,40**
Mn	0,13	-0,14	0,11	0,02	0,11	0,80**			1,00	0,36**	0,25*	0,38**	0,44**	0,61**	0,46**
Co	-0,01	-0,16	0,23*	-0,11	0,03	0,36**				1,00	0,24*	0,51**	0,43**	0,25*	0,58**
Ni	-0,08	-0,21	0,02	-0,01	-0,15	0,14					1,00	0,21	0,17	0,11	0,35**
Cu	0,23*	-0,05	0,18	0,10	-0,16	0,26*						1,00	0,61**	0,31**	0,44**
Zn	0,15	-0,09	0,20	0,30**	-0,03	0,40**							1,00	0,52**	0,56**
Sr	0,07	-0,20	0,12	0,11	0,19	0,53**								1,00	0,41**
Pb	0,03	-0,32**	0,08	-0,02	0,23*	0,44**									1,00

Примечание/Note. \* $p < 0,05$  \*\* $p < 0,01$ .

ся наличие относительно слабой отрицательной корреляции между содержанием средней и мелкой пыли и содержанием Pb, а также наличие относительно слабой положительной корреляции между содержанием мелкого песка и Zn (табл. 4).

Значимая положительная корреляция выявлена между содержаниями Cr и Ti, Cr и Mn, Mn и Ti, Sr и Ti, Sr и Pb, Mn и Sr, Cu и Co, Co и Pb, Zn и Cu, Zn и Sr, Zn и Pb (табл. 4). Анализ дендрограммы корреляционной матрицы изученных микроэлементов показывает значимые корреляционные связи (рис. 2) Ti-Sr-Cr-Mn (критический уровень  $1-r=0,39$ ).

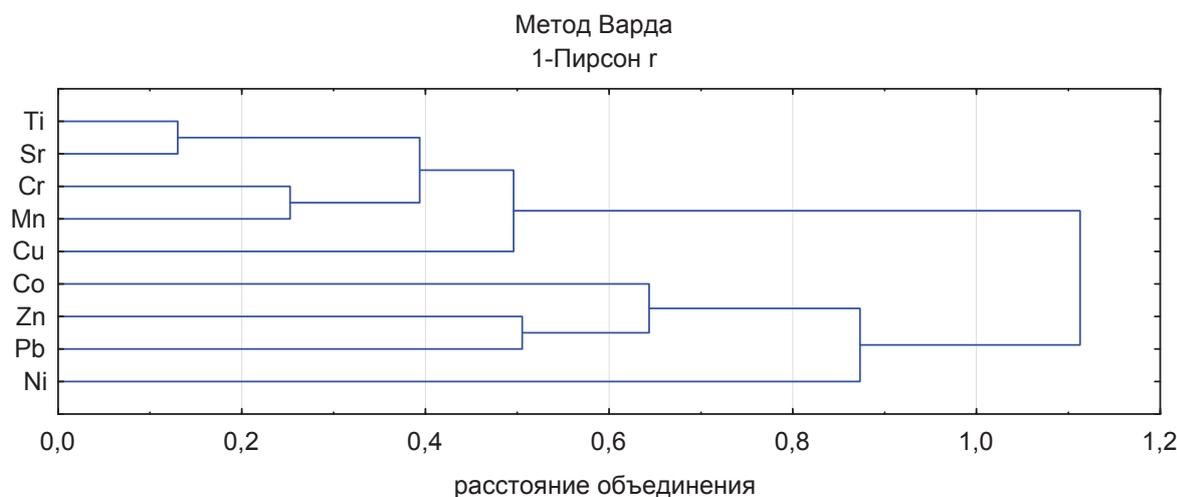
#### Выводы

Полученные данные позволяют предположить, что почвы сопряженного ряда центральной части

Тобол-Ишимского междуречья незначительно обогащены Cu, Pb, Co и обеднены Mn Ni, Zn, Sr по сравнению со средним содержанием в почвах и почвообразующих породах юга Западной Сибири. Данные особенности могут быть обусловлены региональными особенностями почвообразующих пород – лессовидных суглинков, распространенных на территории исследований.

Почвы автономных и подчиненных ландшафтов северной лесостепи Тобол-Ишимского междуречья слабо контрастны по сравнению с лесостепью Омского Приишмья и Барабинской низменности.

Почвы северной лесостепи в пределах Тюменской области характеризуются достаточно высокой степенью устойчивости по отношению к различным видам техногенного воздействия. По био-



**Рис. 2.** Горизонтальная древовидная диаграмма изученных микроэлементов

**Fig. 2.** Horizontal tree diagram of the studied trace elements

геохимическим условиям миграции и аккумуляции микроэлементов в почвах северная лесостепь Tobol-Ишимского междуречья скорее тяготеет к гумидным подтаежным ландшафтам, нежели к аридным – степным. Достаточно высокая интенсивность биологического круговорота, низкая эродированность почв и однородность их гранулометрического состава, удалённость от крупных индустриальных центров значительно снижают риск химического загрязнения почв и водных объектов данной территории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири / В.Б. Ильин, А. И. Сысо, Н.Л. Байдина, Г.А. Конарбаева, А.С. Черевко // Почвоведение. – 2003. – № 5. – С. 550–556.
2. Halicki W., Kulizhsky S.P. Changes in arable land use in Siberia in the 20th century and their effect on soil degradation // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 456–473.
3. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 278 с.
4. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
5. Ильин В.Б. Геохимическая ситуация на территории Обь-Иртышского междуречья // Почвоведение. – 2007. – № 12. – С. 1442–1451.
6. Содержание тяжелых металлов в почвообразующих породах юга Западной Сибири / В.Б. Ильин, А.И. Сысо, Г.А. Конарбаева, Н.Л. Байдина, А.С. Черевко // Почвоведение. – 2000. – № 9. – С. 1086–1090.
7. Азаренко Ю.А., Красницкий В.М., Ермохин Ю.И. Эколого-агрохимическая оценка содержания микроэлементов в почвах и растениях лесостепной и степной зон Омской области // Плодородие. – 2010. – № 5. – С. 49–51.
8. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания и распределения микроэлементов (Mn, Cu, Zn, Co, Mo, V) в почвах лесостепной и степной зон Омского Прииртышья // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (114). – С. 218–223.
9. Азаренко Ю.А., Рейнгард Я.Р. Содержание микроэлементов в почвах и почвенно-геохимическое районирование Омской области // Омский научный вестник. – 2012. – № 1 (108). – С. 188–192.
10. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области / под ред. С.С. Трофимова. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 289 с.
11. Ваймер А.А. Тяжелые металлы в почве и сельскохозяйственной продукции в условиях Тюменской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Тюмень, 1999. – 24 с.
12. Содержание тяжелых металлов в атмосферных осадках юга Тюменской области / Л.Н. Скипин, А.А. Ваймер, Ю.А. Квашнина, О.Г. Богданова, И.К. Судакова // Тезисы докладов «Окружающая среда». – Тюмень: Тюменский дом печати, 2006. – С. 54–68.
13. Морфоструктурное районирование Западно-Сибирской равнины: Атлас Тюменской области / гл. ред. Е.А. Огороднов. – 1:8 000 000. – Москва; Тюмень: ГУТК, 1971. – Вып. 1. – Лист 10.
14. Козин В.В., Гармаш А.А. Ландшафтная структура центральной части Ишимской равнины // Вестник Тюменского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 114–120.
15. Каретин Л.Н. Черноземные и луговые почвы Tobol-Ишимского междуречья. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. – 294 с.
16. Физико-географическое районирование Тюменской области / под ред. Н.А. Гвоздецкого. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 246 с.
17. Территория Омутинского муниципального района Тюменской области / Правительство Тюменской области. URL: [http://omutinka.admtymen.ru/mo/Omutinka/about\\_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle](http://omutinka.admtymen.ru/mo/Omutinka/about_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle) (дата обращения: 12.12.2015).
18. Доклад о состоянии и использовании земель в Тюменской области в 2010 году / Управление Росреестра по Тюменской области. – Тюмень, 2011. – 76 с.
19. Шишов Л.Л. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
20. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
21. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Sci. – 2006. – № 39. – P. 84–90.
22. Innovative Technology Verification Report. XRT Technologies for Measuring Trace Elements in Soil and Sediment. Rontec Pico-tax XRF Analyzer / Tetra Tech EM Inc. – 2006. – 203 p. URL: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000RJG.pdf> (дата обращения: 03.12.2015).
23. Towett E.K. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF) / E.K. Towett, K.D. Shepherd, G. Cadisch // Science of the Total Environment. – 2013. – № 463–464. – P. 374–388.
24. Total elemental composition of soils in Sub-Saharan Africa and relationship with soil forming factors (TXRF) / E.K. Towett, K.D. Shepherd, J.E. Tondoh, L.A. Winowiecki, T. Lulseged, M. Nyambura, A. Sila, T.-G. Vågen, G. Cadisch // Geoderma Regional. – 2015. – № 5. – P. 157–168.
25. Хренов В.Я. Почвы Тюменской области: словарь-справочник. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 156 с.
26. Щеглов Д.И. Микроэлементы в почвах сопряженных ландшафтов Каменной Степи различной степени гидроморфизма / Д.И. Щеглов, Н.С. Горбунова, Л.А. Семенова, О.А. Хатунцева // Почвоведение. – 2013. – №3. – С. 282–290.
27. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Поступила 23.12.2015.

#### Информация об авторах

**Константинова Е.Ю.**, аспирант кафедры геоэкологии Института наук о Земле Тюменского государственного университета.

UDC 631.445.25 (550.42)

## MICROELEMENTS IN SOILS OF FOREST-STEPPE SEQUENT SERIES IN CENTRAL PART OF TOBOL-ISHIM INTERFLUVE

Elizaveta Yu. Konstantinova,

konstantliza@gmail.com

University of Tyumen,

6, Volodarskogo Street, Tyumen, 625046, Russia.

**The relevance of the research.** Features of distribution and accumulation of trace elements, including heavy metals, in soils of agricultural landscapes is one of the most important directions of research in soil science, agricultural chemistry and geocology. These studies have a high relevance for the southern part of Tyumen region which is characterized by a strong agricultural specialization. Exploration of main features and factors of trace elements distribution in soils of agricultural landscapes can be important for the complex ecological and geochemical assessment of the territory, the refinement of the regional background levels of pollutants in soils, for development of special measures aimed for reduction of environmental risks and improvement of the quality of agricultural products.

**The main aim of the study** is to analyze the main geochemical features of distribution and accumulation of several trace elements (Ti, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Sr) in soils of agricultural landscapes located within the forest-steppe zone of Tobol-Ishim interfluve, depending on the differences in particle size distribution, humus content, pH values and position in the relief.

**The methods used in study:** field soil and landscape-geochemical studies, determination of pH values in soil-water suspension, particle size distribution analysis using pyrophosphate method (with a microprobe analyzer), definition of microelements total concentrations using TXRF method, determination of humus content by the Tyurin method, statistical processing of the data.

**The results.** The author has investigated the content and distribution of Ti, Cr, Mn, Ni, Co, Cu, Zn, Pb, and Sr in soils of agricultural landscapes for the territory of Tobol-Ishim interfluve. The data may indicate that soils of the central part of Tobol-Ishim interfluve are enriched in Cu, Pb, Co and depleted in Ni, Zn, Sr, Mn compared to the average content in soils and soil-forming rocks of the south of Western Siberia. It was revealed that soils of the plot, despite the provision in relief, are low-contrast in particle size distribution, and this soil attribute has virtually no effect on the distribution of trace elements.

### Key words:

Microelements, heavy metals, forest-steppe, agrolandscape, Tyumen region, Western Siberia, Tobol-Ishim Interfluve.

### REFERENCES

- Ilin V.B., Syso A.I., Baidina N.L., Konarbaeva G.A., Cherevko A.S. Background Concentrations of Heavy Metals in Soils of Southern Western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 2003, no. 5, pp. 550–556. In Rus.
- Halicki W., Kulizhsky S.P. Changes in arable land use in Siberia in the 20th century and their effect on soil degradation. *International Journal of Environmental Studies*, 2015, vol. 72, no. 3, pp. 456–473.
- Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Laws of distribution of chemical elements in the soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2007. 278 p.
- Ilin V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti* [Trace elements and heavy metals in soils and plants of Novosibirsk Region]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2001. 229 p.
- Il'in V.B. Geochemical situation in the Ob'-Irtysh interfluve. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 12, pp. 1289–1297.
- Il'in V.B., Syso A.I., Konarbaeva G.A., Baidina N.L., Cherevko A.S. Heavy Metal Contents in Soil-Forming Rocks in the South of Western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 2000, no. 9, pp. 1086–1090. In Rus.
- Azarenko Yu.A., Krasnitskiy V.M., Ermokhin Yu.I. Ecological and agrochemical estimation of trace elements in soils and plants of the forest-steppe and steppe zones of the Omsk region. *Plodородie*, 2010, no. 5, pp. 49–51. In Rus.
- Azarenko Yu.A. Laws of composition and distribution of microelements (Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B) in soil of forest-steppe and steppe zones the Omsk Irtysh Region. *Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 2 (114), pp. 218–223. In Rus.
- Azarenko Yu.A., Reingard Ya.R. Composition of microelements in soils and soil-geochemical zoning of Omsk oblast. *Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 1 (108), pp. 188–192. In Rus.
- Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoy oblasti* [The soils of the Tyumen region]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1990. 289 p.
- Vaymer A.A. *Tyazhelye metally v pochve i selskokhozyaystvennoy produkcii v usloviyakh Tyumenskoy oblasti. Avtoref. Dis. Kand. nauk* [Heavy metals in the soil and agricultural production in the conditions of the Tyumen region. Cand. Diss. abstract]. Tyumen, 1999. 24 p.
- Skipin L.N., Vaymer A.A., Kvashnina Yu.A., Bogdanova O.G., Sudakova I.K. Soderzhanie tyazhelykh metallov v atmosferykh osadkakh yuga Tyumenskoy oblasti [The content of heavy metals in precipitation in the south of Tyumen region]. *Tezisy dokladov «Okruzhayushchaya sreda»* [Abstracts of the conference «Environment»]. Tyumen, Tyumenskiy dom pechati Publ., 2006. pp. 54–68.
- Ogorodnov E.A. *Morfostrukturnoe rayonirovanie Zapadno-Sibirskoy ravniny: Atlas Tyumenskoy oblasti* [Morphostructural zoning of the West Siberian Plain: Atlas of Tyumen region]. Moscow; Tyumen, GUGK Publ., 1971. 45 p.
- Kozin V.V., Garmash A.A. Landscape structure of the central part of the Ishim Plain. *UT Research Journal*, 2011, no. 4, pp. 114–120. In Rus.
- Karetin L.N. *Chernozemnye i lugovye pochvy Tobol-Ishimskogo mezhdurechya* [Chernozem and meadow soils Tobol-Ishim interfluve]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1982. 294 p.
- Gvozdetskiy N.A. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Tyumenskoy oblasti* [Physico-geographical division of Tyumen region]. Moscow, MSU Publ., 1973. 246 p.
- Territoriya Omutinskogo munitsipalnogo rayona Tyumenskoy oblasti* [The territory of Omutinskiy municipal district of Tyumen

- region]. Available at: [http://omutinka.admtyumen.ru/mo/Omutinka/about\\_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle](http://omutinka.admtyumen.ru/mo/Omutinka/about_OMSU/more.htm?id=10595411@cmsArticle) (accessed 12 December 2015).
18. *Doklad o sostoyanii i ispolzovanii zemel v Tyumenskoy oblasti v 2010 godu* [Report on the status and use of land in Tyumen region in 2010]. Tyumen, Tyumen region Department of Rosreestr, 2011. 76 p.
  19. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Russian Soil Classification System]. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p.
  20. Vorobeva L.A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soils chemical analysis]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 400 p.
  21. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods. *Eurasian Soil Sci.*, 2006, no. 39, pp. 84–90.
  22. *Innovative Technology Verification Report. XRT Technologies for Measuring Trace Elements in Soil and Sediment. Rontec Picotax XRF Analyzer*. Tetra Tech EM Inc. Available at: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000RJG.pdf> (accessed: 03 December 2015).
  23. Towett E.K., Shepherd K.D., Cadisch G. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). *Sci. of the Total Environment*, 2013, vol. 463–464, pp. 374–388.
  24. Towett E.K., Shepherd K.D., Tondoh J.E., Winowiecki L.A., Lulseged T., Nyambura M., Sila A., Vågen Tor-G., Cadisch G. Total elemental composition of soils in Sub-Saharan Africa and relationship with soil forming factors (TXRF). *Geoderma Reg.*, 2015, vol. 5, pp. 157–168.
  25. Khrenov V.Ya. *Pochvy Tyumenskoy oblasti: slovar-spravochnik* [The soils of the Tyumen region: Glossary]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2002. 156 p.
  26. Shcheglov D.I., Gorbunova N.S., Semenova L.A., Khatuntseva O.A. Microelements in soils of conjugated landscapes with different degrees of hydromorphism in the Kamennaya Steppe. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 3, pp. 254–261.
  27. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.

Received: 23 December 2015.

#### Information about the authors

**Elizaveta Yu. Konstantinova**, graduate student, Tyumen State University.