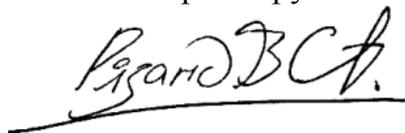


На правах рукописи



**РЯЗАНОВ**

**Станислав Сергеевич**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ  
И ПОДВИЖНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГУМУСОВЫХ  
ГОРИЗОНТАХ ПОЧВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Специальность 03.02.13 – почвоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Казань - 2019

Работа выполнена в лаборатории экологии почв Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук РТ»)

**Научный руководитель:**

**Григорьян Борис Рубенович**

кандидат биологических наук, заведующий лабораторией экологии почв Института проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук РТ»), г. Казань

**Научный консультант:**

**Иванов Дмитрий Владимирович**

кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Института проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия наук РТ»), г. Казань

**Официальные оппоненты:**

**Новосёлова Евдокия Ивановна**

доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа

**Сабиров Айрат Тагирзянович**

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой таксации и экономики лесной отрасли факультета лесного хозяйства и экологии ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань

**Ведущая организация:**

ФГБНУ «Татарский научно-исследовательский институт агрохимии и почвоведения (обособленное структурное подразделение ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»)), г. Казань

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ ч на заседании диссертационного совета Д 220.003.01 при ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» по адресу: 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет».

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах с печатью организации и заверенными подписями по адресу: 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.003.01 Гайфуллину Р.Р.

Факс: 8(347)228-08-98, e-mail: gayfullin@bk.ru

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор сельскохозяйственных наук, доцент



Р.Р. Гайфуллин

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Изучение качества почв дает возможность не только оценить последствия человеческой деятельности, но также является необходимым этапом для устойчивого развития и сохранения истощаемых почвенных ресурсов. Проблема загрязнения почв тяжелыми металлами накладывает ограничения на решение целого ряда практических задач: ведение сельскохозяйственной деятельности, развитие органического земледелия и агротуризма и т.п.

Республика Татарстан представляет особый интерес для изучения содержания и поведения в почвах тяжелых металлов на региональном уровне, поскольку характеризуется большим количеством земель сельскохозяйственного назначения (67% от общей площади), с одной стороны, и широким промышленным профилем, определяемым нефтегазохимическим комплексом, машиностроительными предприятиями, предприятиями радио- и электроприборостроения, с другой (Государственный ..., 2015). Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования определяется востребованностью данных почвенно-геохимического мониторинга для оценки экологического состояния почв Республики Татарстан как региона с развитыми промышленными и сельскохозяйственными отраслями.

**Цель работы:** характеристика почв Республики Татарстан по содержанию и уровню загрязнения тяжелыми металлами в условиях различных типов землепользования.

### **Задачи исследования:**

1. Характеристика содержания и коэффициента подвижности тяжелых металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Cr, Zn, Mn) в гумусовых горизонтах основных типов почв Республики Татарстан.
2. Анализ влияния сельскохозяйственного типа землепользования на содержание и коэффициент подвижности тяжелых металлов в почвах.
3. Анализ пространственного распределения тяжелых металлов на территории республики.
4. Изучение влияния почвенных свойств на содержание и коэффициент подвижности тяжелых металлов в основных типах почв при различных типах землепользования.
5. Оценка уровня загрязнения почв Республики Татарстан тяжелыми металлами.

**Научная новизна.** Впервые проведено комплексное почвенно-геохимическое обследование почвенного покрова территории Республики Татарстан на предмет содержания и подвижности железа и 8 тяжелых металлов: кадмия, кобальта, хрома, меди, марганца, никеля, свинца и цинка. Установлены зависимости накопления тяжелых металлов в широком диапазоне значений почвенных свойств, оценено влияние сельскохозяйственного типа землепользования на содержание и коэффициент подвижности тяжелых металлов в региональном масштабе. Созданы карты пространственного распределения и дана оценка уровня загрязнения почв Республики Татарстан тяжелыми металлами.

**Теоретическая и практическая значимость.** Представленные в работе результаты отражают актуальное состояние почвенного покрова Республики Татарстан в отношении содержания и пространственного распределения тяжелых металлов в почвах. Установлены зависимости валового содержания и коэффициента подвижности тяжелых металлов от почвенных свойств с учетом типов почв и типов землепользования. Выделены геохимические ассоциации тяжелых металлов,

выполнена обобщённая оценка источников их поступления в верхние почвенные горизонты на региональном масштабе. Установленные региональные фоновые концентрации тяжелых металлов в почвах являются основой для экологического нормирования и оценки качества почв республики. Геоинформационная база почвенно-геохимических данных, содержащая сведения о почвах природных и урбанизированных территорий Республики Татарстан, а также результаты оценки моно- и полиэлементного загрязнения почвенного покрова по содержанию тяжелых металлов, могут быть использованы в системе регионального экологического мониторинга и при решении вопросов, связанных с землеустройством и определением направлений использования различных категорий земель.

**На защиту выносятся:**

1. Характеристика содержания и пространственного распределения тяжелых металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Cr, Zn, Mn) в почвах Республики Татарстан.
2. Закономерности влияния почвенно-геохимических условий на содержание и подвижность тяжелых металлов в гумусовых горизонтах почв в условиях различных типов землепользования.
3. Оценка моно- и полиэлементного загрязнения почв Республики Татарстан тяжелыми металлами.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследования были представлены автором в виде устных и заочных докладов на 8 конференциях: Итоговой научной конференции сотрудников ИПЭН АН РТ (Казань, 2017, 2018 гг.); III республиканской молодежной экологической научной конференции, посвященной 10-летию Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (Казань, 2018 г.); XXIV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» (Москва, 2017 г.); Итоговой конференции аспирантов и молодых ученых ИПЭН АН РТ (Казань, 2017 г.); IV международной научно-практической конференции «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов» (Волгоград, 2014 г.); XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2014» (Москва, 2014 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано **12** работ, включая: **5** статей в журналах из списка ВАК; **3** статьи в журналах, индексируемых Scopus, **2** свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение; **2** статьи в журналах, индексируемых РИНЦ.

**Личный вклад автора в работу.** Автор лично участвовал в полевых экспедициях Института проблем экологии и недропользования АН РТ по геохимическому обследованию почв Республики Татарстан в 2013-2014 гг. Автором были сформулированы цель и задачи исследования, проведен статистический и геостатистический анализ полученных материалов, проанализированы и обобщены полученные результаты, сделаны итоговые выводы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 114 страницах, содержит 21 таблицу, 16 рисунков. Список литературы включает 148 наименования, в том числе 65 работ зарубежных авторов.

**Благодарности.** Автор глубоко признателен руководству Института проблем экологии и недропользования АН РТ за помощь и поддержку при проведении исследований.

Автор искренне благодарен своему научному руководителю, к.б.н. Борису Рубеновичу Григорьяну, чей жизненный путь был трагически прерван летом 2017 г.

Автор благодарит к.б.н. Д.В. Иванова за ценные советы и помощь в завершении работы. Автор также выражает благодарность к.б.н. В.И. Кулагиной за плодотворную консультацию в различных вопросах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

В главе рассмотрены естественные и антропогенные источники железа и тяжелых металлов (ТМ) в почвах. Дана краткая характеристика девяти рассматриваемых в работе элементов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Cr, Zn, Mn, Fe). Дана почвенно-геохимическая характеристика ТМ: рассмотрены их основные фазы-носители, приведены данные об их приуроченности к отдельным почвенным компонентам. Рассмотрены методы региональной оценки и мониторинга содержания ТМ в почвах, а также особенности оценки геохимического фона при региональных исследованиях и способы расчёта антропогенного привноса и индексов загрязнения почв металлами. Выполнен обзор результатов почвенно-геохимических исследований на территории Республики Татарстан. Приведены данные по содержанию ТМ в почвообразующих породах различных физико-географических районах республики, систематизированы результаты региональных исследований почвенного покрова по содержанию валовых и подвижных форм металлов.

### **ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Регион исследования.** Исследование проводилось на территории Республики Татарстан (РТ), расположенной в центре Европейской части России. Общая площадь республики составляет 67847 кв. км. Климат региона умеренно континентальный с небольшими различиями между отдельными физико-географическими районами. Средняя годовая температура воздуха составляет 2–3.1°C, годовая сумма осадков – 460–540 мм. Рельеф – возвышенная ступенчатая равнина, расчлененная густой сетью речных долин (Атлас..., 2005). Структура почвенного покрова, согласно классификации почв СССР 1977 г., представлена следующими основными генетическими типами почв: подзолистые (17%), серые лесные (32.4%), черноземы (39.7%), а также локальные пятна дерново-карбонатных почв (3.1%).

**Почвенные данные.** Полевое обследование почвенного покрова РТ проводилось в 2013-2014 гг. Общее количество точек геохимического опробования почв – 1170 (рис. 1). Отбор проб проводился на расстоянии не менее 200 м от ближайшей дороги. В каждой точке методом конверта отбиралась одна смешанная проба из верхних горизонтов почв. Тип землепользования присваивался в зависимости от места отбора проб: естественный – гумусовые горизонты луговых и лесных почв, сельскохозяйственный – пахотные горизонты, урбанизированный – верхние горизонты почв на территории крупных городов республики (Казань, Набережные Челны, Альметьевск, Зеленодольск).

В почвенных образцах определяли: содержание гумуса по И.В. Тюрину (ГОСТ 26213-91), гранулометрический состав (ГОСТ 12536-2014), рН водной вытяжки (ГОСТ 26423-85). Определение валового содержания Cd, Co, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Mn и Fe проводилось путем экстракции 5М HNO<sub>3</sub> (РД 52.18.191-89). Извлечение подвижных форм металлов выполнено ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4.8 (РД 52.18.289-90). За коэффициент подвижности принималось соотношение

подвижных форм металлов к их валовому содержанию. Используемая экстракция металлов из почв 5-молярной азотной кислотой не всегда позволяет оценивать полученные значения как валовые. Однако применение данной вытяжки характерно для природоохранных служб РФ при оценке уровня загрязнения почв и донных отложений металлами, что делает полученные значения актуальными с практической точки зрения.

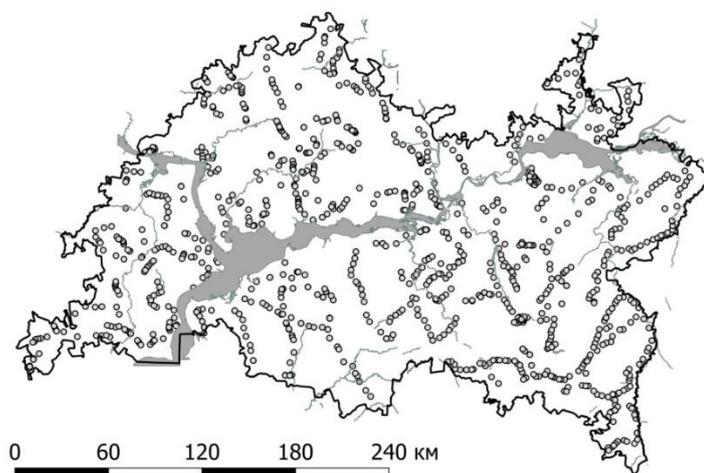


Рис. 1. Расположение точек отбора проб почв на территории РТ

**Оценка геохимического фона и уровней загрязнения почв.** Оценка фоновых уровней – необходимый этап в изучении загрязнения природных сред, включая почвы, тяжелыми металлами. В работе использовался статистический (непрямой) метод медианного абсолютного отклонения, устойчивый к нарушениям нормальности распределения значений (Esmaeili et al., 2014). В этом случае диапазон фоновых значений оценивается как  $Me \pm 2MAD$  ( $MAD = Me(|X_i - Me(X)|)$ ).

Для оценки степени загрязнения почв отдельными металлами использовали однофакторный индекс загрязнения (Li et al., 2008). Для оценки суммарного полиэлементного загрязнения использовались два показателя: 1) составной индекс Немеро  $P_N$  (Nemerow Comprehensive Index); 2) составной геометрический индекс загрязнения Саета ( $Z_c$ ), который позволяет оценить опасность загрязнения, поскольку при его расчете учитывается токсичность ТМ (Водяницкий, 2008).

**Пространственная интерполяция.** Для оценки пространственной вариабельности содержания ТМ в почвах РТ использован геостатистический подход. Для пространственной интерполяции использовался метод ординарного кригинга с коррекцией сглаживающего эффекта, предложенный в работе Rezaee et al. (2011). Данный алгоритм позволяет достичь глобальной точности прогноза без потери локальной точности.

**Деревья регрессии.** Для оценки влияния почвенных свойств на содержание и подвижность тяжелых металлов в гумусовых горизонтах использовался метод деревьев регрессии. Деревья регрессии хорошо подходят для моделирования сложных, в том числе нелинейных, взаимодействий между исследуемым параметром и независимыми переменными (James et al., 2013).

**Метод главных компонент.** С помощью метода главных компонент изучены геохимические ассоциации тяжелых металлов в гумусовых горизонтах почв РТ и выявлены латентные факторы, определяющие их вариабельность на региональном масштабе. Метод главных компонент (PCA) широко используется для извлечения

небольшого количества независимых факторов (главных компонент) из всех доступных переменных для анализа их взаимодействий (Doabi et al., 2017).

**Использованное ПО.** Статистический анализ данных проводился с помощью пакета R (R Core..., 2017). Вариограммный анализ и пространственная интерполяция выполнены при помощи пакета «gstat» (Pebesma, 2004), метод деревьев регрессии - при помощи пакета «tree» (Ripley, 2016). Финальное оформление карт реализовано в геоинформационной системе QGIS (QGIS Development..., 2016).

### ГЛАВА 3. МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

#### Содержание и коэффициент подвижности металлов в почвах.

Непараметрический дисперсионный анализ по Краскелу-Уоллису показал наличие значимых различий между основными типами почв республики, как по валовому содержанию, так и по коэффициенту подвижности всех рассматриваемых металлов (табл. 1).

Таблица 1. Содержание и коэффициент подвижности металлов в гумусовых горизонтах по типам почв

Типы почв	min	Me	max	min	Me	max
	<b>Cd вал. (мг/кг)</b>				<b>Cd подв./Cd вал.</b>	
П	0.15	0.41	0.94	0.000	0.231	0.667
Л	0.04	0.38	1.30	0.000	0.175	0.963
Ч	0.04	0.30	1.98	0.020	0.185	0.889
Дк	0.08	0.34	1.08	0.000	0.188	0.974
Адн	0.05	0.27	1.41	0.000	0.266	0.800
Алн	0.10	0.36	1.35	0.022	0.190	0.476
У	0.13	0.55	1.20	0.023	0.188	0.956
<b>Pb вал. (мг/кг)</b>			<b>Pb подв./Pb вал.</b>			
П	1.2	10.1	18.4	0.000	0.080	0.510
Л	0.7	11.7	20.7	0.000	0.060	0.860
Ч	0.8	11.0	22.8	0.000	0.060	0.340
Дк	3.1	11.6	20.5	0.000	0.070	0.450
Адн	3.0	10.0	17.7	0.000	0.090	0.550
Алн	5.3	11.5	20.4	0.000	0.090	0.270
У	3.1	18.0	65.6	0.010	0.090	0.450
<b>Co вал. (мг/кг)</b>			<b>Co подв./Co вал.</b>			
П	1.4	9.2	26.4	0.000	0.009	0.103
Л	2.4	11.5	37.5	0.000	0.009	0.103
Ч	3.4	10.3	22.4	0.001	0.009	0.074
Дк	5.1	11.3	41.9	0.000	0.007	0.036
Адн	1.9	9.6	27.7	0.001	0.014	0.127
Алн	3.3	10.1	23.9	0.001	0.008	0.075
У	0.3	7.2	11.8	0.001	0.022	0.213
<b>Cu вал. (мг/кг)</b>			<b>Cu подв./Cu вал.</b>			
П	0.3	8.1	17.9	0.004	0.025	0.500
Л	4.0	16.9	74.4	0.000	0.009	0.170
Ч	4.0	21.4	89.3	0.000	0.004	0.036
Дк	5.3	24.0	123.8	0.000	0.006	0.051
Адн	0.6	15.6	40.0	0.003	0.020	0.228
Алн	6.2	19.6	31.0	0.005	0.016	0.049
У	2.1	29.1	143.2	0.000	0.012	0.222
<b>Ni вал. (мг/кг)</b>			<b>Ni подв./Ni вал.</b>			
П	2.0	16.7	37.3	0.001	0.045	0.259
Л	8.3	30.6	139.6	0.003	0.024	0.146

Ч	6.2	47.8	142.4	0.004	0.012	0.066
Дк	11.8	51.0	131.4	0.002	0.013	0.130
Адн	3.8	31.5	77.3	0.002	0.025	0.143
Алн	9.4	34.7	78.1	0.004	0.027	0.070
У	0.8	41.5	90.8	0.004	0.017	0.429
<b>Сг вал. (мг/кг)</b>				<b>Сг подв./Сг вал.</b>		
П	1.8	19.6	61.6	0.001	0.012	0.270
Л	6.1	26.7	89.2	0.000	0.006	0.288
Ч	5.6	29.8	67.5	0.000	0.004	0.041
Дк	8.0	34.9	93.1	0.000	0.006	0.052
Адн	4.9	23.8	53.3	0.000	0.009	0.077
Алн	6.2	29.6	84.0	0.001	0.008	0.122
У	6.7	26.7	65.6	0.000	0.014	0.126
<b>Zn вал. (мг/кг)</b>				<b>Zn подв./Zn вал.</b>		
П	7.4	36.6	82.7	0.011	0.066	0.382
Л	13.9	43.7	85.3	0.002	0.021	0.173
Ч	19.1	43.3	62.2	0.000	0.007	0.089
Дк	20.0	46.7	73.0	0.000	0.011	0.073
Адн	6.1	37.5	62.5	0.008	0.031	0.216
Алн	17.9	47.4	80.0	0.008	0.028	0.115
У	12.1	48.0	244.2	0.003	0.080	0.870
<b>Mn вал. (мг/кг)</b>				<b>Mn подв./Mn вал.</b>		
П	104	563	909	0.009	0.050	0.285
Л	252	597	3114	0.004	0.036	0.314
Ч	80	645	1574	0.002	0.038	0.314
Дк	352	803	3344	0.008	0.049	0.334
Адн	50	440	811	0.024	0.118	0.303
Алн	171	529	2016	0.010	0.091	0.445
У	60	569	1131	0.030	0.096	0.283
<b>Fe вал. (мг/кг)</b>				<b>Fe подв./Fe вал.</b>		
П	775	12470	31970	$47.86 \cdot 10^{-6}$	$0.96 \cdot 10^{-3}$	$65.72 \cdot 10^{-3}$
Л	5655	18210	89830	$14.55 \cdot 10^{-6}$	$0.22 \cdot 10^{-3}$	$10.07 \cdot 10^{-3}$
Ч	6557	18560	81580	$1.83 \cdot 10^{-6}$	$0.10 \cdot 10^{-3}$	$5.58 \cdot 10^{-3}$
Дк	8564	18910	73750	$12.66 \cdot 10^{-6}$	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$3.44 \cdot 10^{-3}$
Адн	2300	16880	52550	$39.55 \cdot 10^{-6}$	$0.46 \cdot 10^{-3}$	$25.13 \cdot 10^{-3}$
Алн	8761	18020	47970	$40.36 \cdot 10^{-6}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$7.20 \cdot 10^{-3}$
У	2428	15710	44100	$24.01 \cdot 10^{-6}$	$0.49 \cdot 10^{-3}$	$4.30 \cdot 10^{-3}$

*Примечание:* П – подзолистые; Л – серые лесные; Ч – черноземы; Дк – дерново-карбонатные; Адн – аллювиальные дерновые насыщенные; Алн – аллювиальные луговые насыщенные; У – урбаноземы.

Среди приведенных результатов видны вполне ожидаемые общие закономерности. Так, подзолистые почвы, ввиду высокой интенсивности процессов выщелачивания и лессиважа, наименее обогащены металлами (табл. 1). Наибольшее содержание и закрепление металлов наблюдается в гумусовых горизонтах черноземов и дерново-карбонатных почв: у первых – в основном за счет высокой эффективности гумусовых геохимических барьеров (что сильнее всего проявляется для Cu, Ni – органомфильных элементов), у вторых – высоким содержанием карбонатов, формирующих карбонатные геохимические барьеры (Водяницкий, 2008). Несмотря на свою очевидность, данные результаты позволяют говорить о ненарушенности естественного баланса привноса-выноса ТМ из верхнего почвенного слоя в региональном масштабе.

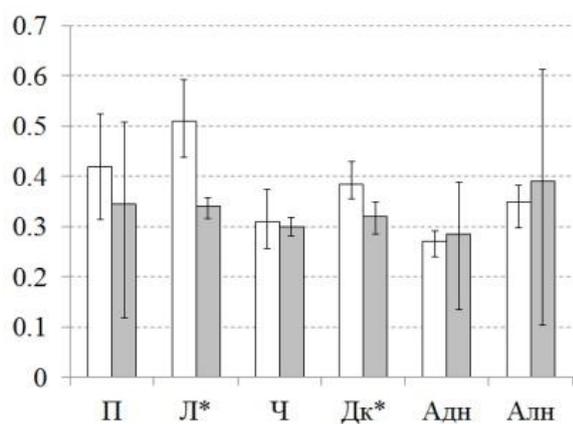
Между тем уже на основании данных результатов можно уверенно говорить о значительном экзогенном привносе Pb. В условиях повышенной антропогенной нагрузки содержание данного элемента в городских почвах значительно превышает естественные зональные и азональные типы почв. Элементы Cd, Cu, Cr и Zn также показывают наибольшие концентрации в городских почвах. Однако различия урбаноземов с другими типами почв статистически не значимы, и требуется дальнейшая оценка степени загрязнения почв данными ТМ.

**Региональные фоновые уровни тяжелых металлов.** При установлении региональных фоновых уровней ТМ были использованы геохимические данные, полученные по зональным типам почв (подзолистые, серые лесные, черноземы), не затронутым сельскохозяйственной деятельностью. Дерново-карбонатные, аллювиальные почвы, а также урбаноземы исключены из расчетов для устранения возможных геохимических аномалий, связанных с выходом карбонатных пород, привносом с аллювиальными отложениями и антропогенным влиянием. Региональные фоновые концентрации металлов в почвах РТ составляют ( $Me \pm 2MAD$ , мг/кг): Cd –  $0.44 \pm 0.24$ , Pb –  $11.5 \pm 3.2$ , Co –  $10.4 \pm 3.6$ , Cu –  $16.4 \pm 7.8$ , Ni –  $29.8 \pm 18.8$ , Cr –  $23.3 \pm 12.7$ , Zn –  $43.3 \pm 12.8$ , Mn –  $652.4 \pm 228.4$ , Fe –  $15275.4 \pm 5178.3$ .

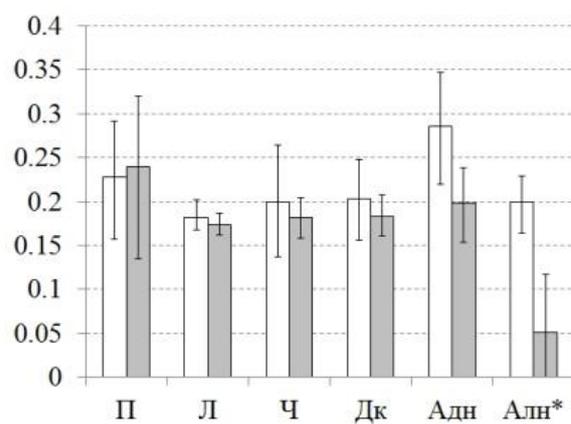
**Влияние типа землепользования.** Тип землепользования является важным фактором, определяющим поступление и дальнейшее поведение ТМ в почвах. Влияние характера землепользования на содержание и доступность металлов обусловлено изменениями физико-химических свойств ненарушенных и антропогенно-измененных почв, а также трансформацией их водного и воздушного режимов в результате сельскохозяйственной обработки и при иных видах использования земель. В почвах агроэкосистем накопление ТМ часто связано с антропогенным поступлением вследствие интенсивного применения удобрений и пестицидов.

Результаты сравнения естественного и сельскохозяйственного типов землепользования показывают отсутствие значимых свидетельств антропогенного привноса Cd, Mn и Zn, связанного непосредственно с агрономической деятельностью: их содержание в пахотных горизонтах либо статистически не отличается, либо меньше, чем в гумусовых горизонтах естественных почв. При этом для отдельных типов почв выявлено статистически значимое превышение содержания в пахотном слое по сравнению с гумусовым слоем естественных почв: Co – в подзолистых и серых лесных, Cr – в черноземах, подзолистых, дерново-карбонатных и серых лесных, Pb – в черноземах, Cu и Ni – в подзолистых почвах, что может быть следствием как экзогенного привноса данных элементов, так и изменения физико-химических свойств в результате распашки. На последнее, в частности, указывают различия в коэффициентах подвижности металлов: результаты сравнения пахотных почв с естественными показали, что различия между ними либо не значимы, либо коэффициент подвижности меньше при сельскохозяйственном использовании отдельных типов почв (рис. 2).

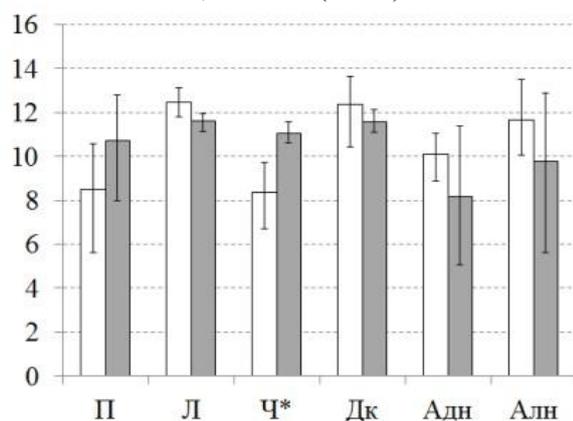
Среднее содержание ТМ в естественных почвах, нормализованное по нижней границе рассчитанных фоновых значений ( $Mean(Me_i)/(Median_i - 2MAD_i)$ ), уменьшается в следующем порядке: Ni > Cr > Fe > Cu > Pb > Zn > Co > Mn > Cd. В сельскохозяйственных почвах порядок уменьшения нормализованного содержания ТМ несколько изменен вследствие трансформации режима аккумуляции-выщелачивания: Cr > Ni > Fe > Cu > Co > Zn > Pb > Mn > Cd.



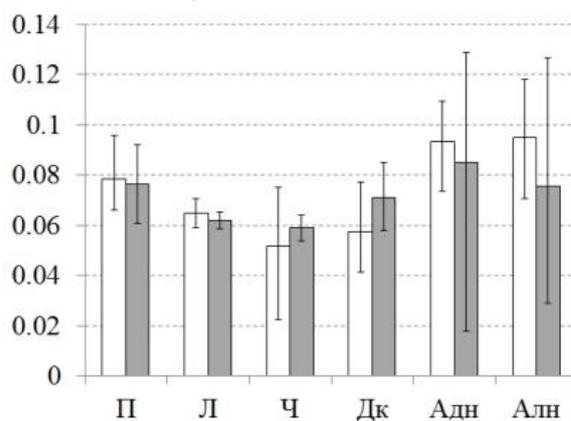
а) Cd вал. (мг/кг)



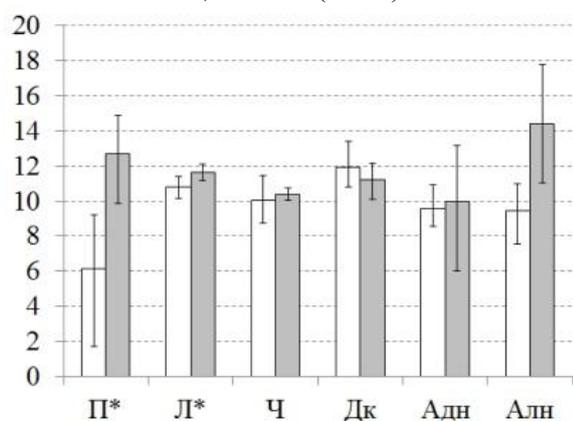
б) Cd подв./Cd вал.



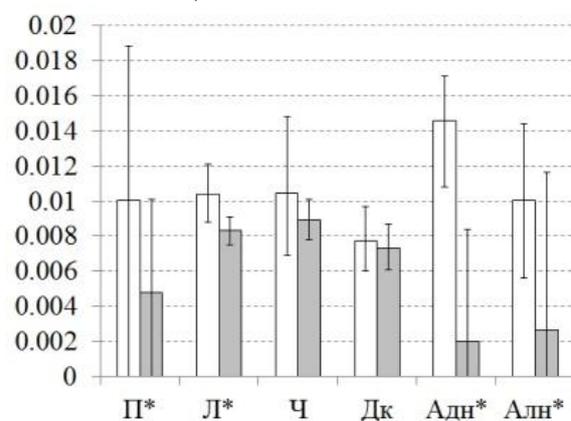
в) Pb вал. (мг/кг)



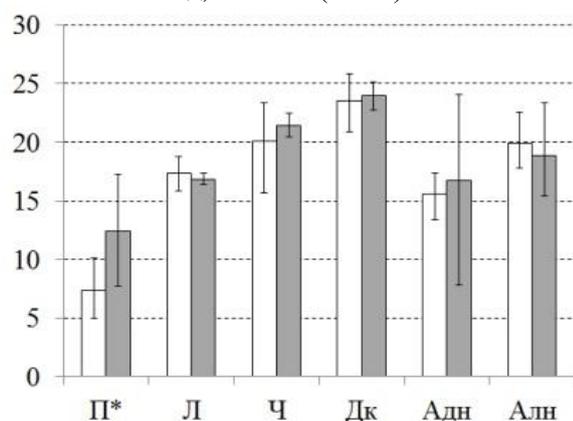
г) Pb подв./Pb вал.



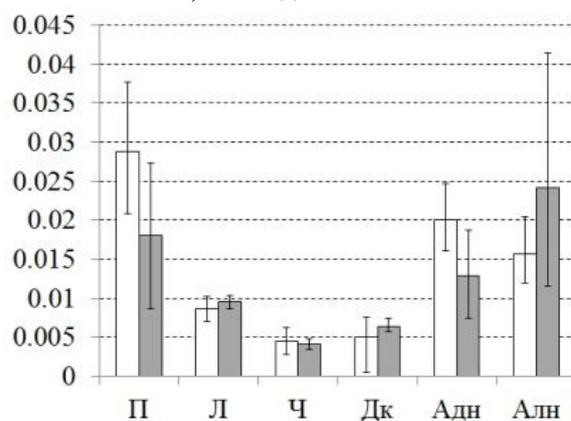
д) Co вал. (мг/кг)



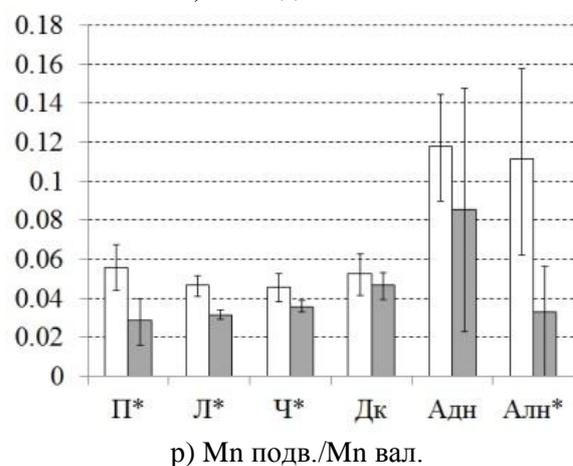
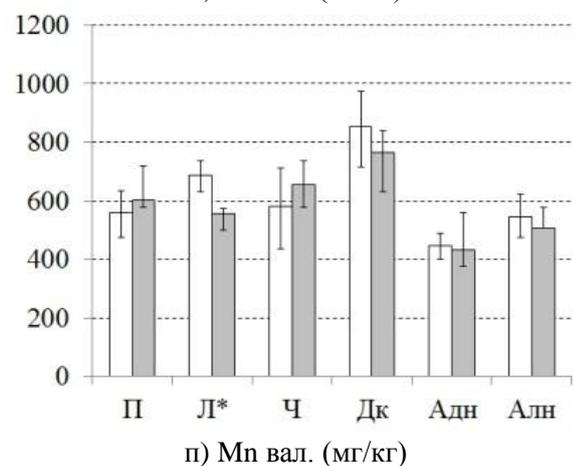
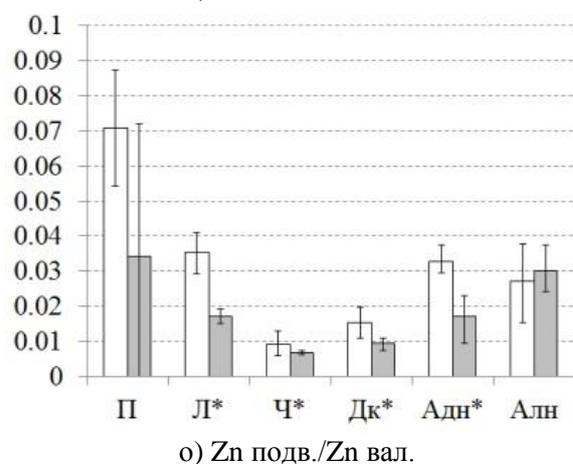
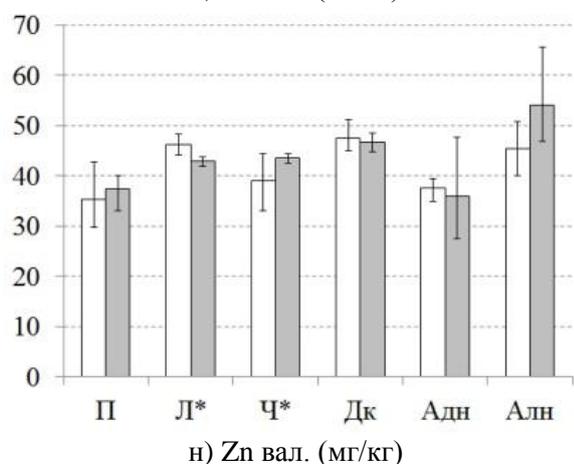
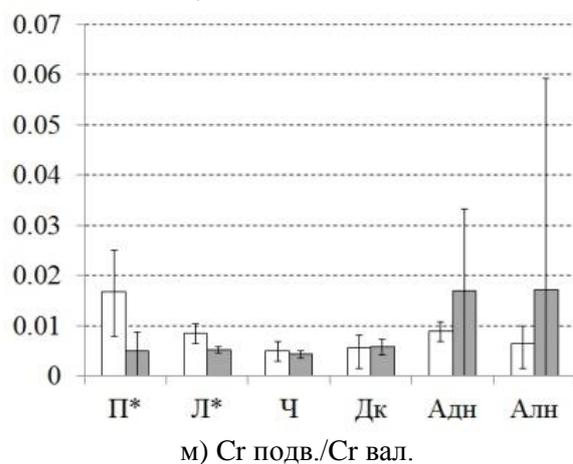
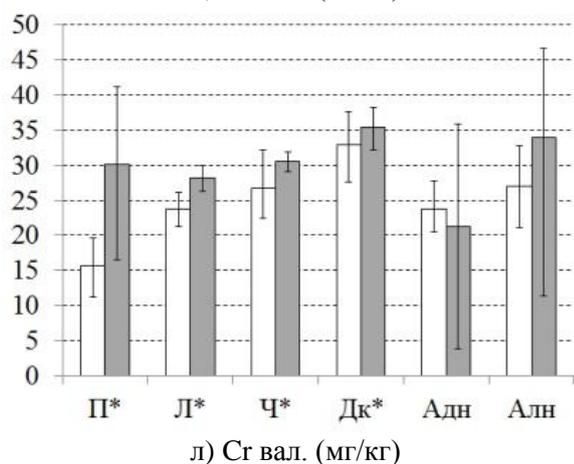
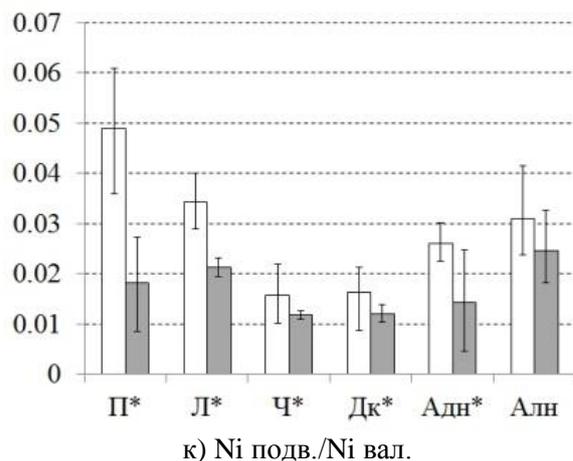
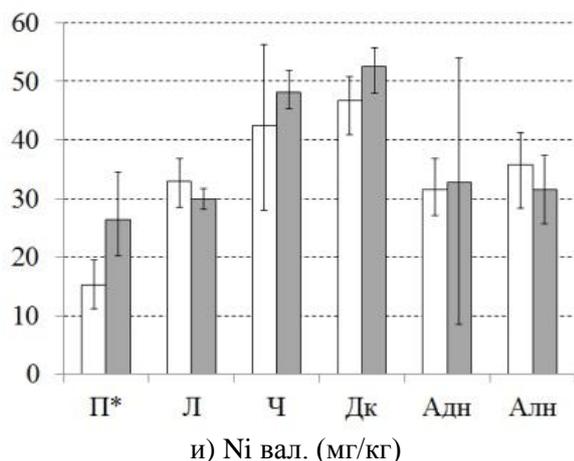
е) Co подв./Co вал.



ж) Cu вал. (мг/кг)



з) Cu подв./Cu вал.



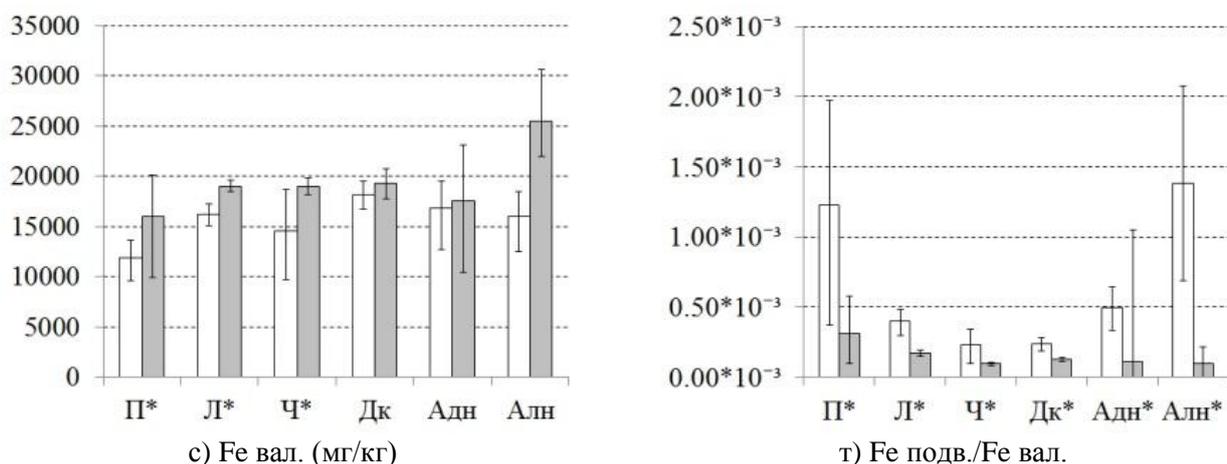
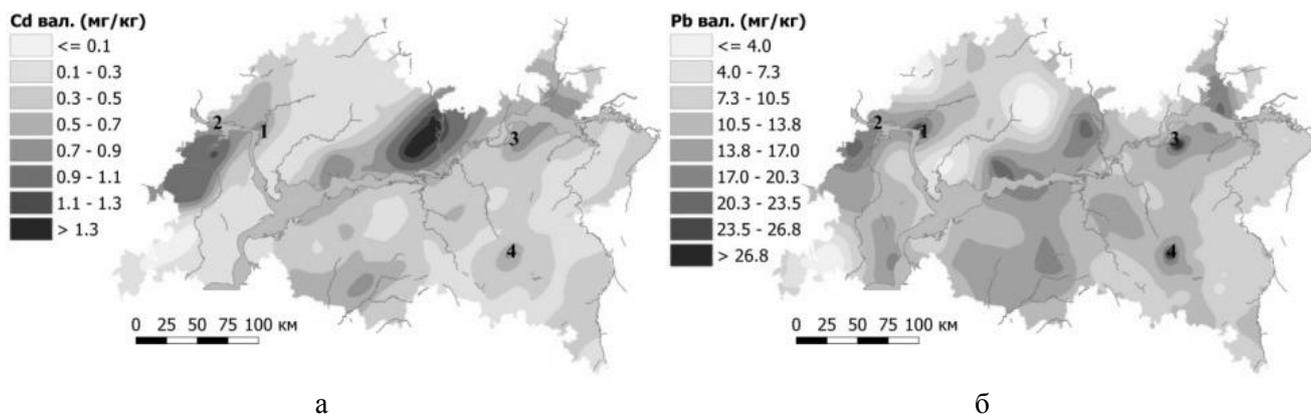


Рис. 2. Медианные значения валового содержания и подвижности металлов в почвах при естественном (белый цвет) и сельскохозяйственном (серый цвет) ТЗ; Типы почв, для которых различия между двумя типами землепользования статистически значимы согласно критерию Манна-Уитни (при  $\alpha=0.05$ ) на рисунке обозначены звездочкой \*.

**Оценка пространственного распределения металлов в почвах.** Карты пространственного распределения ТМ в почвах РТ представлены на рисунке 3. На территории республики выделяются несколько геохимических зон, формирующих пространственное распределение металлов. Первая геохимическая зона, расположенная в восточной части почвенно-климатического региона Предкамье, показывает повышенные значения содержания Cd (0.5-1.4 мг/кг), Co (15-37 мг/кг), Cr (30-68 мг/кг) и Zn (60-104 мг/кг) в верхнем почвенном слое (рис. 3а,в,е,ж). Вторая геохимическая зона приурочена к Бугульминской и Восточно-Закамской почвенно-климатическим регионам. В данной зоне наблюдаются повышенное содержание Cr (30-50 мг/кг), Mn (825-2043 мг/кг) и Ni (45-98 мг/кг) (рис. 3е,з,д). По содержанию железа наблюдаются две зоны повышенного содержания: вся территория Предволжья, где его концентрации варьируют в пределах 19500-67600 мг/кг; и север Предкамья, где содержание железа в верхнем почвенном слое составляет 19500-53300 мг/кг (рис. 3и). Дополнительно прогнозные карты распределения Cd, Cu, Pb и Zn показывают антропогенную модель распределения данных элементов, образуя зоны повышенного содержания вокруг промышленных центров республики (рис. 3а,г,б,ж).



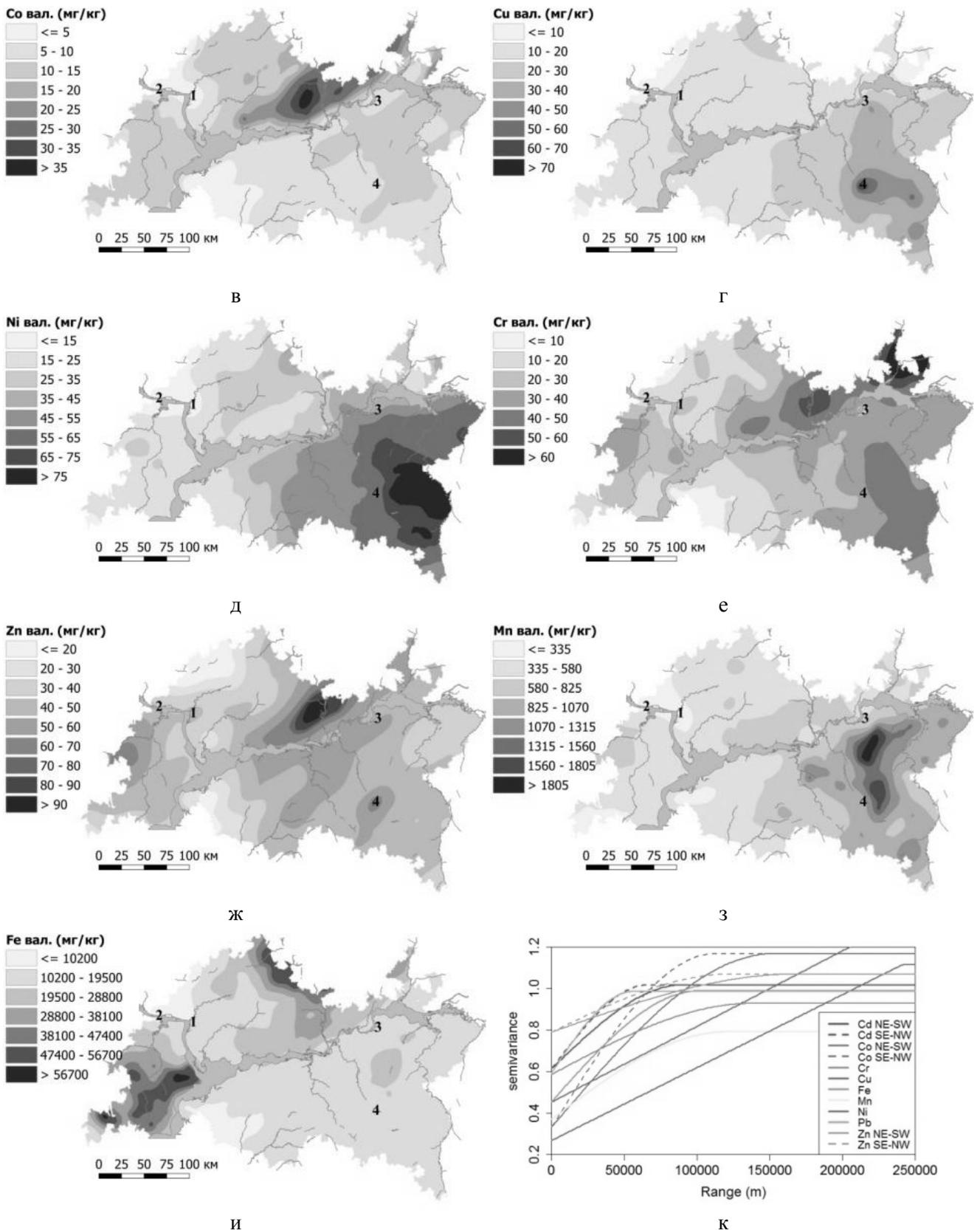
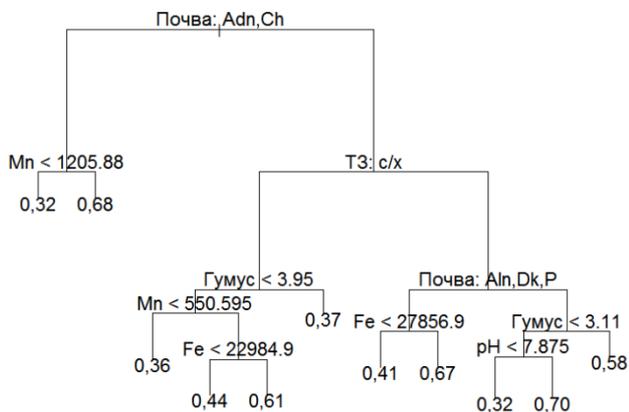


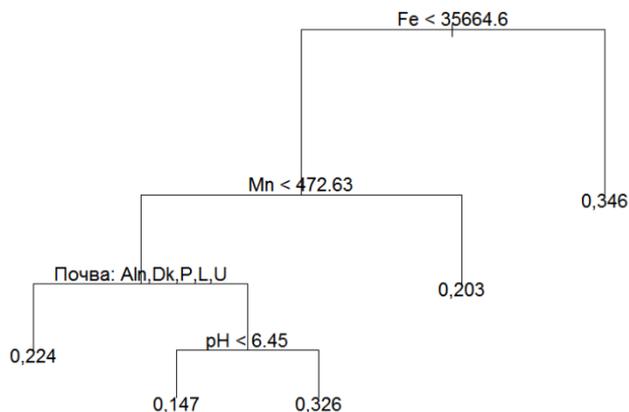
Рис. 3. Пространственное распределение ТМ в почвах РТ (а-и) и подогнанные модели вариограмм (к). Цифрами на картах обозначено расположение городов: 1 – Казань, 2 – Зеленодольск, 3 – Набережные Челны, 4 – Альметьевск.

## ГЛАВА 4. ПОВЕДЕНИЕ И ИСТОЧНИКИ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ

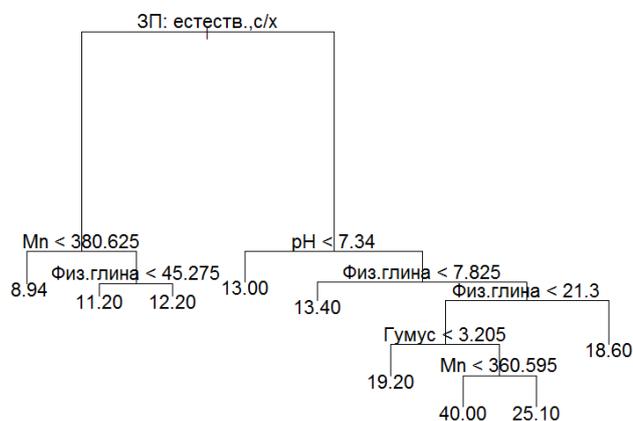
**Структура почвенно-геохимических связей.** С помощью метода деревьев регрессии оценена структура почвенно-геохимических связей, определяющих содержание и подвижность ТМ в гумусовых горизонтах почв РТ (рис. 4).



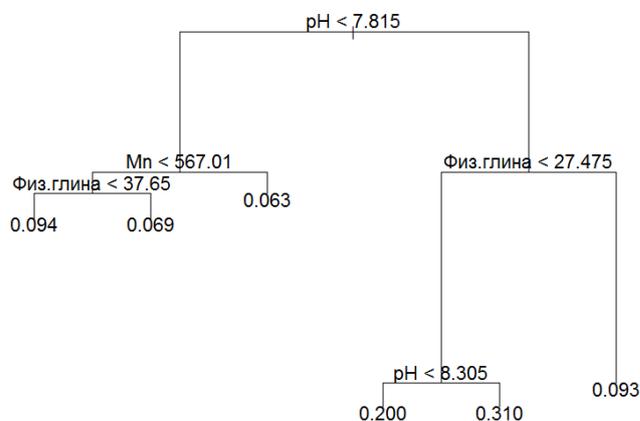
а) Cd вал.



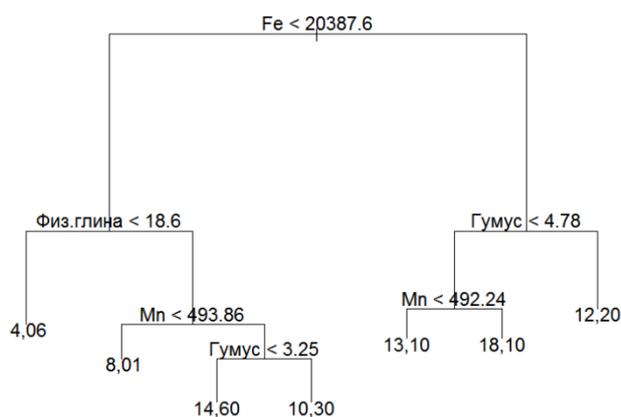
б) Cd подв./Cd вал.



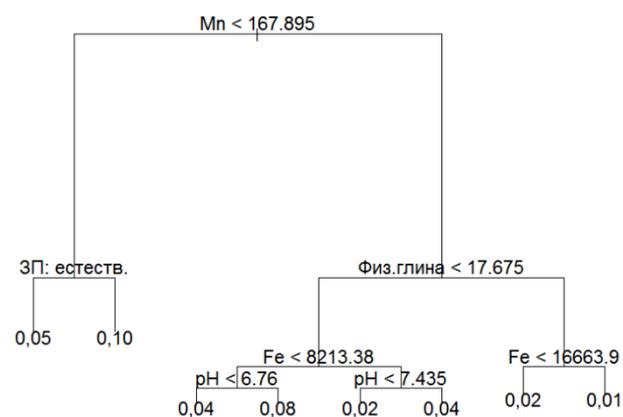
в) Pb вал.



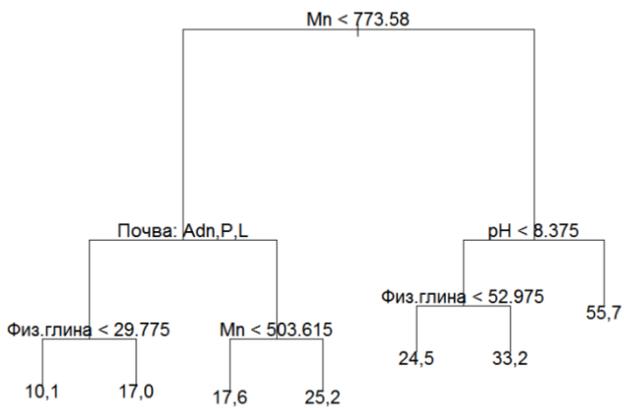
г) Pb подв./Pb вал.



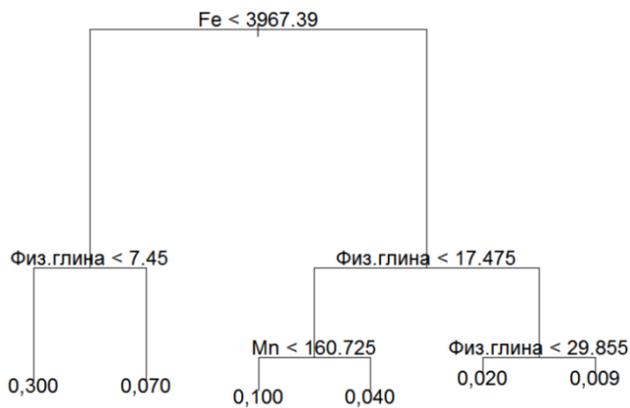
д) Co вал.



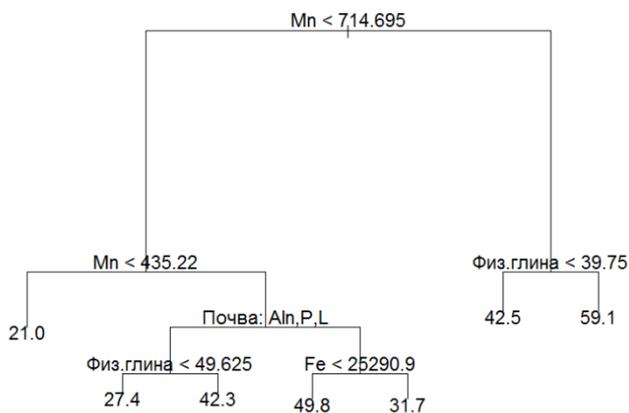
е) Co подв./Co вал.



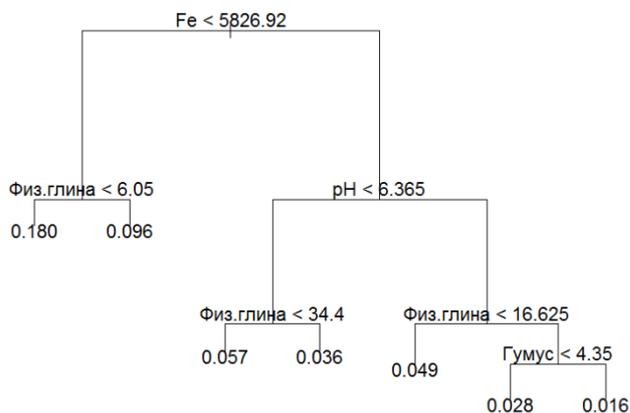
ж) Cu вал.



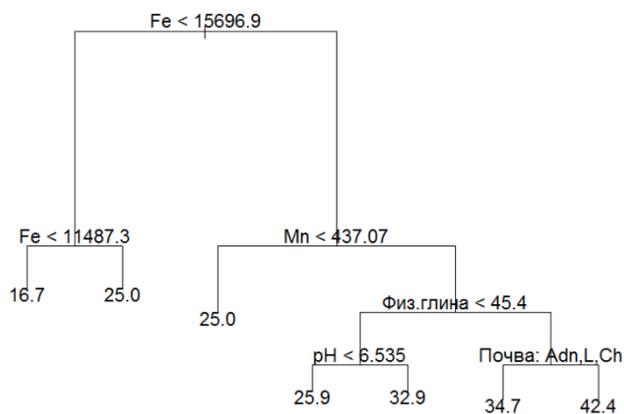
з) Cu подв./Cu вал.



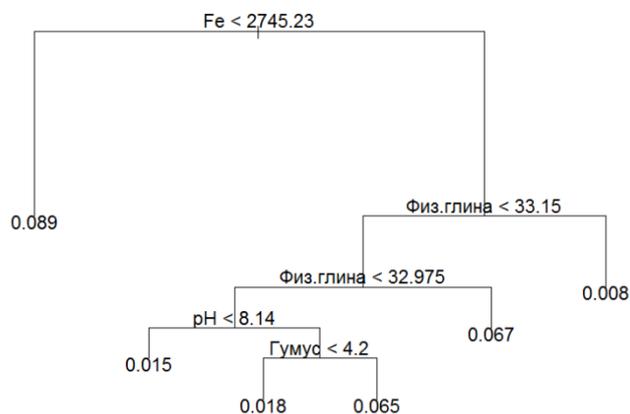
и) Ni вал.



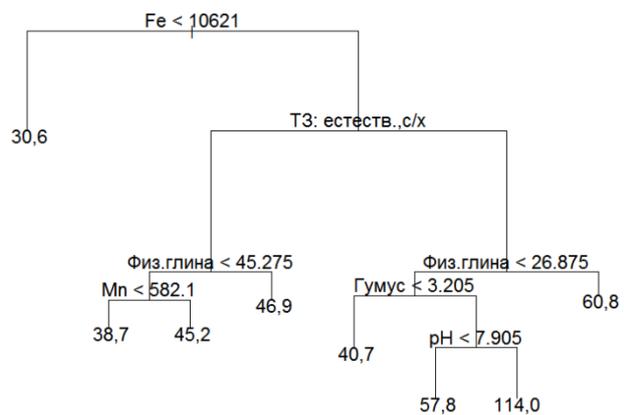
к) Ni подв./Ni вал.



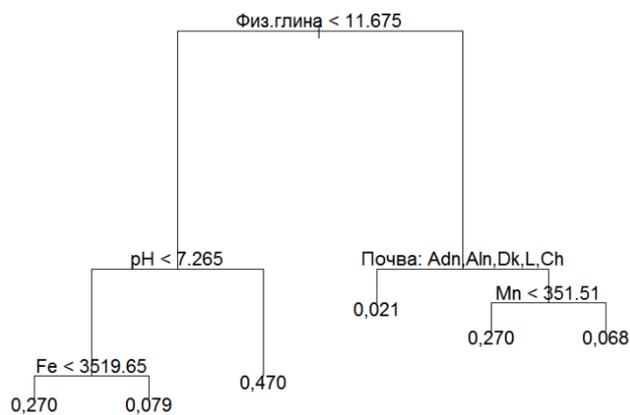
л) Cr вал.



м) Cr подв./Cr вал.



н) Zn вал.



о) Zn подв./Zn вал.

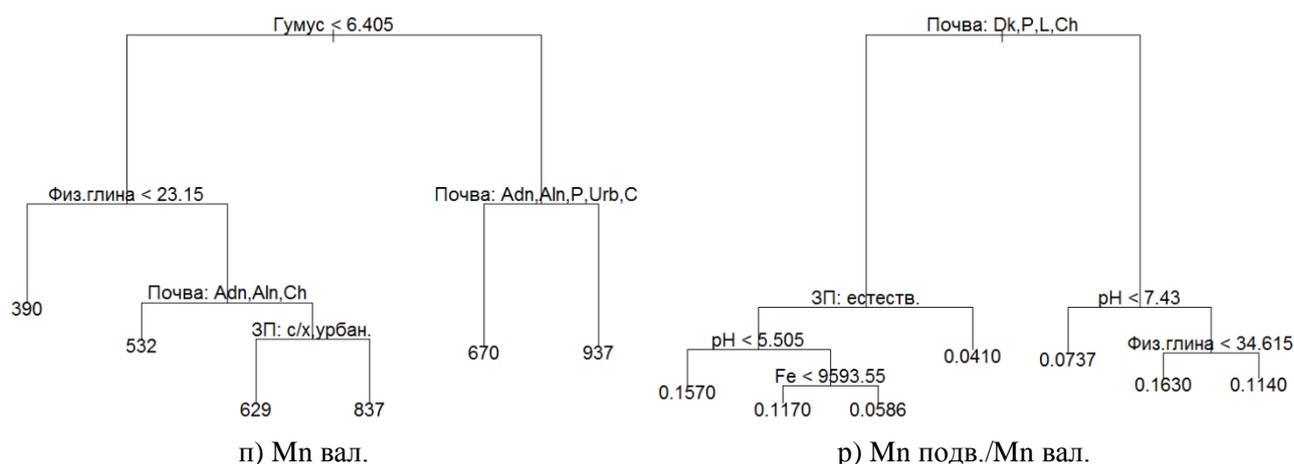


Рис. 4. Структура почвенно-геохимических взаимодействий ТМ.

Поведение и содержание *кадмия* в исследованных почвах сильно варьирует в зависимости от почвенного типа (рис. 4а,б). В аллювиальных дерновых почвах и черноземах наблюдаются манганофильные свойства кадмия. В аллювиальных луговых насыщенных, дерново-карбонатных и подзолистых почвах естественного типа землепользования кадмий проявляет сидерофильные свойства. В серых лесных почвах и урбаноземах содержание кадмия возрастает с увеличением содержания органического вещества и повышением рН. В почвах сельскохозяйственного типа землепользования кадмий проявляет сочетание органофильных, сидерофильных и манганофильных свойств (рис. 4а). Зависимость коэффициента подвижности кадмия от почвенных свойств показывает рост подвижности кадмия с увеличением содержания железа (рис. 4б). В то же время наблюдается обратная зависимость от валового содержания марганца. Полученные результаты могут быть следствием низких концентраций кадмия, особенно его обменных и карбонатных форм. В то же время некоторыми авторами отмечается более тесная ассоциация кадмия с Mn, чем Fe (Водяницкий, 2008; Орешкин и др., 1990).

Валовое содержание *свинца* в почвах зависит от антропогенной нагрузки, определяемой типом землепользования. В естественных и сельскохозяйственных почвах главными параметрами, определяющими его концентрацию, являются содержание физической глины и Mn (рис. 4в). Такая зависимость позволяет заключить, что содержание свинца в данных почвах главным образом обусловлено естественными источниками. В городских почвах концентрация свинца повышается с увеличением содержания физической глины, органического вещества и соединений марганца – основных сорбентов тяжелых металлов в верхнем слое почв. Подвижность свинца во всех типах почв зависит от актуальной кислотности: в кислой среде подвижность свинца падает при утяжелении гранулометрического состава и повышении содержания соединений Mn; при повышении рН подвижность свинца главным образом ограничивается содержанием физической глины (рис. 4г).

Структура геохимических отношений *кобальта* в почвах РТ характеризуется общим видом для всех типов почв (рис. 4д). В почвах с низким уровнем гумусированности, содержание кобальта показывает прямую зависимость от содержания марганца. Содержание соединений марганца также является важным фактором, определяющим соотношение  $Co_{\text{подв.}}/Co_{\text{вал.}}$  в гумусовых и пахотных горизонтах (рис. 4е). Также коэффициент подвижности кобальта ограничивается содержанием соединений железа и физической глины.

Валовое содержание *меди* в гумусовых горизонтах возрастает вместе с содержанием марганца и физической глины, причем гранулометрический состав играет более важную роль в нейтральных и кислых почвах (рис. 4ж). Подвижность меди в первую очередь ограничивается содержанием соединений железа и гранулометрическим составом почвы: коэффициент подвижности достигает минимума уже в легкосуглинистых почвах (рис. 4з). Несмотря на подтверждение биофильности меди многими авторами, в почвах РТ не наблюдается значимой зависимости содержания и подвижности меди от содержания гумуса. Ряд работ отмечает противоречивость данных о влиянии почвообразовательных процессов на распределение меди и отсутствие четкой связи между количеством меди и содержанием в почве гумуса (Химия тяжелых ..., 1985).

Структура геохимических связей *никеля* в почвах схожа с таковой для меди (рис. 4и). Содержание никеля в гумусовых горизонтах повышается с увеличением содержания марганца. Подвижность никеля, как и в случае меди, определяется его сидерофильностью и гранулометрическим составом почвы; значение последнего усиливается в кислых почвах (рис. 4к).

Будучи сидерофилом по геологической классификации, *хром* сохраняет свои свойства и в гумусовых горизонтах независимо от типа почвы (Гольдшмит, 1930). Аддитивно на валовое содержание хрома влияет содержание марганца и гранулометрический состав (рис. 4л). Коэффициент подвижности хрома снижается с увеличением содержания валовых форм железа и утяжелением гранулометрического состава; органическое вещество играет небольшую роль в закреплении хрома в верхних горизонтах (рис. 4м).

В гумусовых горизонтах *цинк* проявляет сидерофильные свойства. При этом сродство цинка к различным фазам-носителям различается в зависимости от типа землепользования. В легких естественных и сельскохозяйственных почвах, помимо зависимости от содержания железа, проявляется также аддитивная зависимость от содержания марганца. В то же время в образцах почв, отобранных на территории городов, помимо прямой зависимости от содержания физической глины, цинк проявляет органофильные свойства (рис. 4н). В песчаных почвах цинк высокоподвижен, а в почвах с более тяжелым гранулометрическим составом его подвижность дополнительно ограничивается содержанием соединений марганца (рис. 4о).

Содержание *марганца* в гумусовых горизонтах показывает прямую зависимость от содержания органического вещества и гранулометрического состава (рис. 4п). Дополнительно накладываются региональные факторы почвообразования, отражающиеся в различиях содержания марганца в гумусовом горизонте между отдельными типами почв. Коэффициент подвижности марганца в аллювиальных и городских почвах в первую очередь ограничивается реакцией среды и содержанием физической глины (рис. 4р). В естественных зональных почвах подвижность марганца выше, чем в сельскохозяйственных, и определяется актуальной кислотностью и содержанием соединений железа.

Приведенные результаты являются дополнительным свидетельством антропогенного происхождения Pb и Zn в городских почвах. Для остальных металлов урбанизированный тип землепользования не является значимым фактором, определяющим их содержание в верхнем почвенном слое. Анализ показал отсутствие регионального антропогенного привноса в почвы тяжелых металлов, связанного непосредственно с сельскохозяйственной деятельностью. Приведенные ранее

различия между естественными и агро- почвами, согласно результатам моделирования регрессионных деревьев, являются следствием изменения свойств пахотных горизонтов.

**Многофакторный анализ и оценка источников металлов.** С помощью метода главных компонент изучены геохимические ассоциации тяжелых металлов в гумусовых горизонтах почв РТ и выявлены латентные факторы, определяющие их вариабельность в региональном масштабе. Результаты PCA показывают, что девять металлов в естественных и сельскохозяйственных почвах РТ могут быть описаны с помощью трех главных компонент, включающих 26%, 20% и 20% общей дисперсии, соответственно. На рисунке 5 представлены графики, отображающие ассоциации тяжелых металлов, спроецированных на главные компоненты. Тяжелые металлы с наибольшими загрузками на RC1 – Cu, Ni и Mn. Представленные ранее результаты моделирования регрессионных деревьев также показали сильную зависимость содержания никеля и меди от содержания марганца. Элементы Co, Cr и Fe с наибольшими загрузками на RC3 представляют отдельную геохимическую группу. Компонента RC2 преимущественно описывает вариабельность Cd, Pb и Zn.

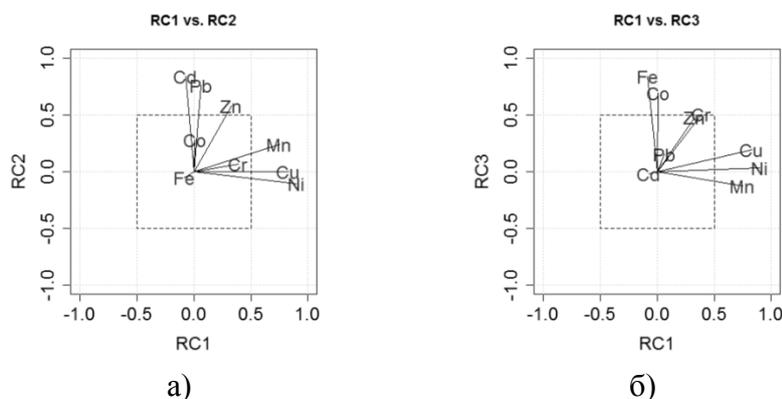


Рис. 5. Графическое представление первых трех главных компонент.

Для интерпретации выявленных латентных факторов RC1, RC2 и RC3 было применено сочетание статистических и геостатистических методов. С помощью аддитивного моделирования изучена зависимость и степень нелинейности интенсивности выявленных факторов от почвенных показателей (рис. 6).

Модель зависимости RC1 от почвенных свойств объясняет 33% дисперсии данных. Линейная зависимость RC1 от гранулометрического состава, а также статистически достоверная зависимость от pH позволяет сделать вывод, что RC1 обусловлена литогенным фактором поступления элементов в почвы (рис. 6б, 6в). Вместе с тем выраженная линейная зависимость RC1 от содержания органического вещества объясняется биогенной природой Cu, Ni и Mn, что в свою очередь обуславливает накопление данных элементов в гумусовых горизонтах (рис. 6а). Помимо анализа зависимости интенсивности компоненты RC1 от почвенных свойств, информативен анализ ее пространственной структуры. На рисунке 7а представлены направленные экспериментальные вариограммы фактора RC1 (горизонтальный толерантный угол равен  $\pm 20^\circ$ ). Экспериментальная вариограмма RC1 характеризуется выраженной анизотропией – в направлении северо-восток – юго-запад вариограмма достигает плато на расстоянии примерно в 100 км, при этом в перпендикулярном направлении наблюдается выраженный тренд, что выражается в ее параболической форме (рис. 7а). Направление тренда вариограммы совпадает с градиентом изменения

климатических условий республики при движении с северо-запада на юго-восток. Также вариограмма компоненты RC1 обладает низким значением наггета, что говорит о сильной пространственной зависимости на малых расстояниях. Совокупность приведенных результатов позволяет сделать вывод, что компонента RC1 отражает естественный литогенный фактор поступления тяжелых металлов, на который накладываются региональные факторы почвообразования.

В отличие от RC1, интенсивность RC3 возрастает только с ростом содержания физической глины (рис. бж,з,и). Данная зависимость обладает слабой нелинейностью. Структура экспериментальной вариограммы показывает небольшую анизотропию: в направлении юг-север полудисперсия возрастает сильнее, чем в перпендикулярном направлении запад-восток (рис. 7в). Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что RC3 отражает исключительно литогенный фактор наследования данных элементов.

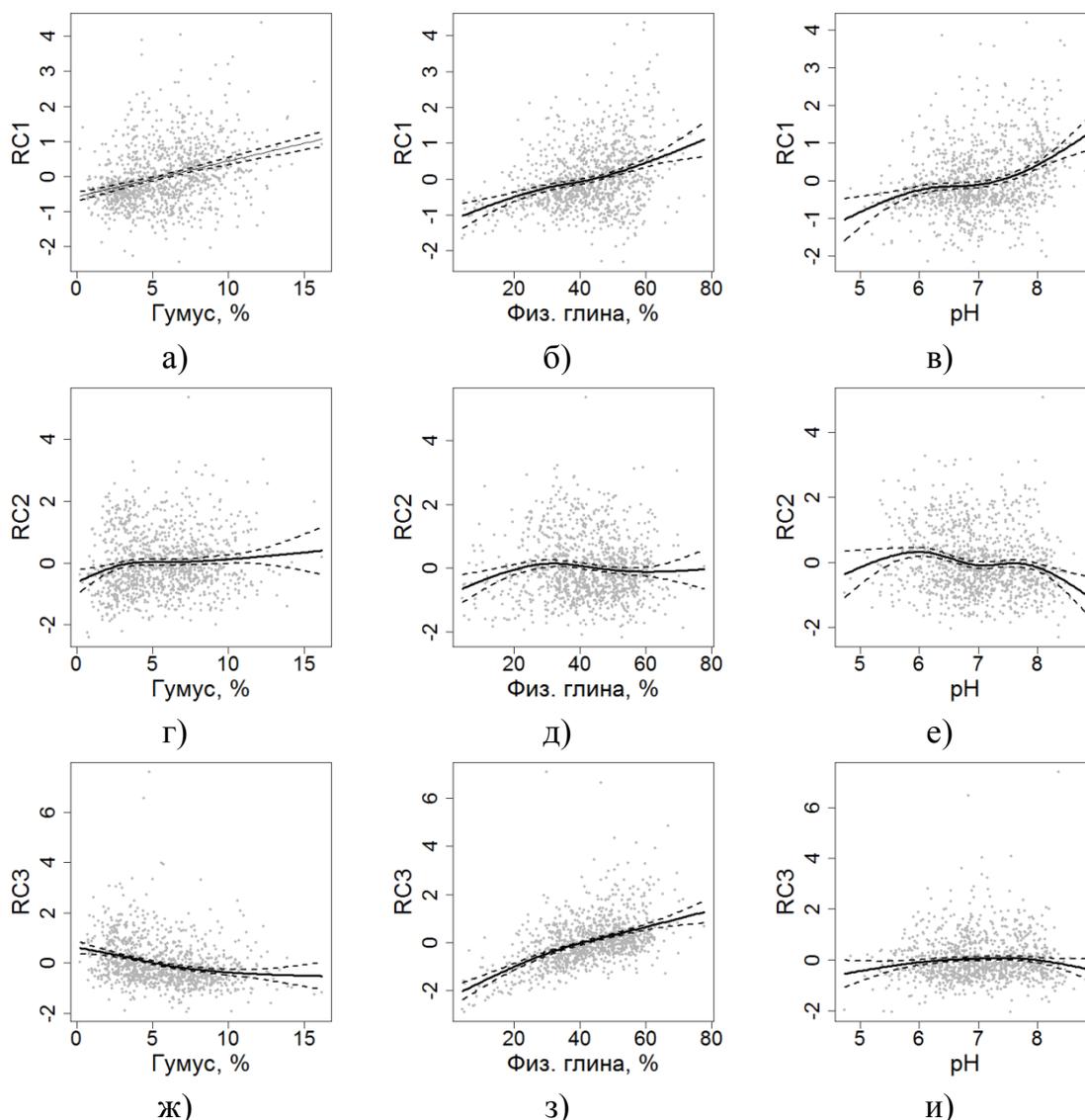


Рис. 6. Зависимость между содержанием гумуса, ГМС и pH и значениями первых трех главных компонент естественных и сельскохозяйственных почв.

Модель описывает всего около 6% вариабельности компоненты RC2. Тем не менее, наблюдается статистически значимая зависимость данной компоненты от почвенных свойств, причем данная зависимость имеет выраженный нелинейный характер. Так, интенсивность RC2 возрастает до 3-5% содержания гумуса в верхних

почвенных горизонтах, и дальнейшее повышение гумусированности слабо сказывается на увеличении значений RC2 (рис. 6г). Также интенсивность компоненты RC2 возрастает при утяжелении гранулометрического состава почв – от песчаных до легкосуглинистых, дальнейшее повышение содержания физической глины (выше 35%) не имеет выраженного эффекта (рис. 6д). Экспериментальная вариограмма компоненты RC2 изотропна, но, по сравнению с вариограммами RC1 и RC3, обладает меньшим радиусом автокорреляции (рис. 7б). Совокупность результатов анализа пространственной структуры компоненты RC2, а также характер зависимости RC2 от почвенных свойств, указывают, что данная компонента отражает антропогенный привнос тяжелых металлов на региональном масштабе.

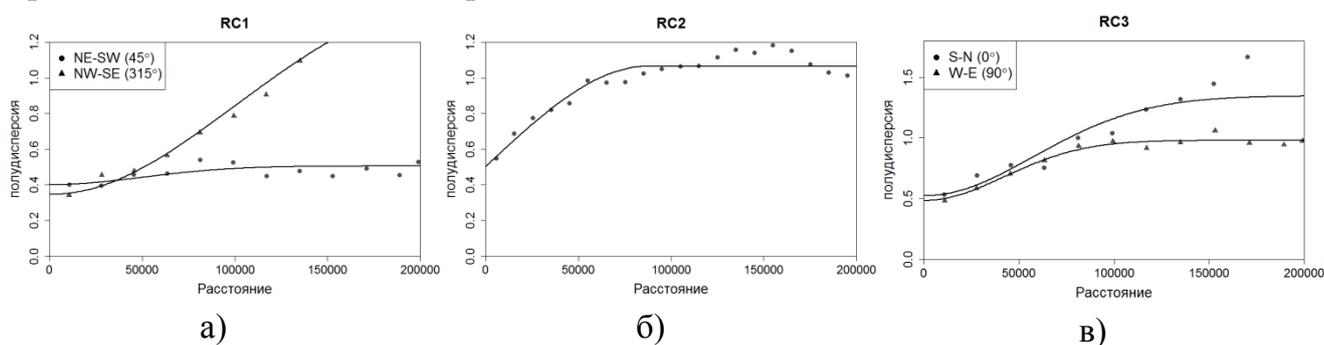


Рис. 7. Экспериментальные вариограммы трех главных компонент.

## ГЛАВА 5. РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

**Моноэлементная оценка загрязнения.** Для оценки наличия загрязнения почв отдельными тяжелыми металлами были рассчитаны коэффициенты концентрации данных элементов. За базовый уровень содержания металла в почве взят верхний порог рассчитанных фоновых содержаний ( $Me+2MAD$ ). Согласно рассчитанным моноэлементным коэффициентам концентрации, естественные и сельскохозяйственные почвы Республики Татарстан характеризуются как незагрязненные относительно региональных фоновых значений. Так, количество почвенных образцов с  $P_i > 2$  не превышает 5% ни для одного из тяжелых металлов.

В почвах крупных городов высокие значения  $P_i$  наблюдаются для трех тяжелых металлов: Cu, Pb и Zn. По степени загрязнения медью города ранжированы в следующем порядке: Набережные Челны ( $\bar{P}_i=1.12$ ,  $max(P_i)=3.35$ ) < Казань ( $\bar{P}_i=1.21$ ,  $max(P_i)=4.84$ ) < Альметьевск ( $\bar{P}_i=1.63$ ,  $max(P_i)=5.92$ ). Значительное превышение фоновых значений цинка наблюдалось в городах Альметьевск ( $\bar{P}_i=1.30$ ,  $max(P_i)=4.35$ ) и Набережные Челны ( $\bar{P}_i=0.92$ ,  $max(P_i)=3.15$ ). Превышение содержания свинца наблюдалось только в почвах г. Казань ( $\bar{P}_i=1.36$ ,  $max(P_i)=3.66$ ), во всех остальных городах свинцовый индекс загрязнения не превышал 2 единиц.

**Полиэлементная оценка загрязнения.** Рассчитанный составной индекс загрязнения Немеро для образцов гумусовых горизонтов представлен на рисунке 7а. Согласно индексу  $P_N$ , 54.4% обследованных естественных почв и 60.1% сельскохозяйственных почв характеризуются как незагрязненные ( $P_N < 1$ ); 43.4% естественных почв и 37.3% сельскохозяйственных почв потенциально загрязнены относительно региональных фоновых значений тяжелых металлов ( $1 < P_N < 2$ ). Количество образцов с  $P_N > 2$  составляет менее 3% от всех обследованных почв естественного и сельскохозяйственного типов землепользования.

Распределение значений индекса Немеро для городских почв отражает высокую антропогенную нагрузку: 60.8% образцов урбаноземов, отобранных на территории

городов имеют индекс  $1 < P_N < 2$  и характеризуются как потенциально загрязненные; 8.9% образцов городских почв загрязнены тяжелыми металлами (табл. 2).

Таблица 2. Значения полиэлементных индексов загрязнения

Индекс	Естественные		Сельскохозяйств.		Урбаниз.	
	Размах	Средн.	Размах	Средн.	Размах	Средн.
$P_N$	0.28 - 2.85	1	0.36 - 8.99	1	0.46 - 4.35	1.3
$Z_c$	0.0 - 6.0	0.13	0.0 - 9.3	0.2	0.0 - 9.3	0.62

Вместе с тем согласно рассчитанному составному индексу Саета, учитывающему токсичность тяжелых металлов, значения  $Z_c$  не достигли порогового значения ни для одного из почвенных образцов (рис. 7б). Таким образом, все случаи загрязнения, выявленные с помощью моноэлементных индексов загрязнения и полиэлементного индекса Немеро, характеризуются как не опасные.

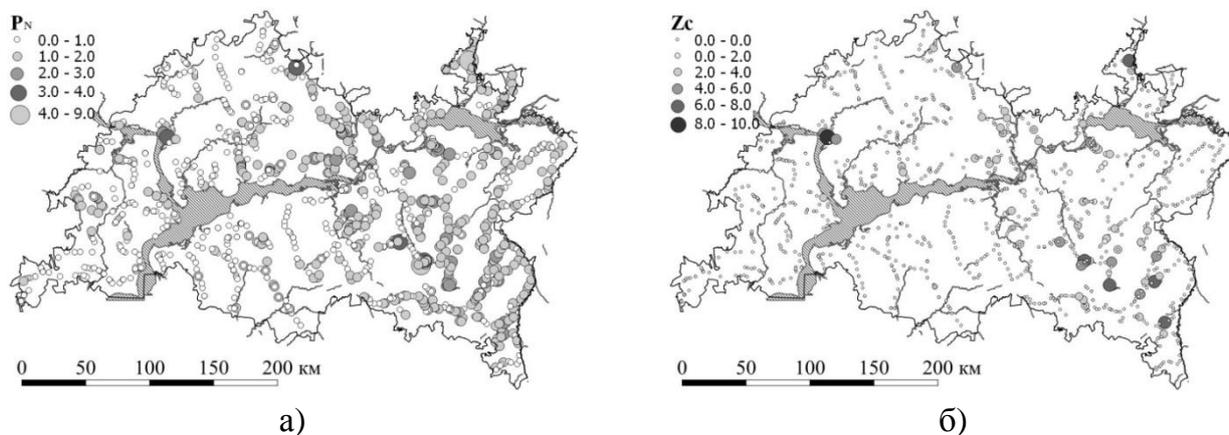


Рис. 8. а) Составной индекс Немеро и б) Составной индекс Саета

## ВЫВОДЫ

1. Различия по содержанию и подвижности железа и восьми тяжелых металлов (кадмий, кобальт, медь, хром, марганец, никель, свинец, цинк) в гумусовых горизонтах основных зональных и азональных типов почв отражают ненарушенность естественного баланса привноса-выноса элементов в верхних почвенных горизонтах и обусловлены совокупностью факторов почвообразования, свойственных тому или иному почвенному генетическому типу. Содержание свинца, меди и цинка в урбанизированных почвах значительно превышает их содержание в зональных и азональных типах почв, что обусловлено повышенной антропогенной нагрузкой на территории городов. Региональные фоновые уровни железа и тяжелых металлов для Республики Татарстан, рассчитанные на основе зональных типов почв естественного типа землепользования, составляют: Cd –  $0.44 \pm 0.24$  мг/кг, Pb –  $11.5 \pm 3.2$  мг/кг, Co –  $10.4 \pm 3.6$  мг/кг, Cu –  $16.4 \pm 7.8$  мг/кг, Ni –  $29.8 \pm 18.8$  мг/кг, Cr –  $23.3 \pm 12.7$  мг/кг, Zn –  $43.3 \pm 12.8$  мг/кг, Mn –  $652.4 \pm 228.4$  мг/кг, Fe –  $15275.4 \pm 5178.3$  мг/кг.

2. Отсутствуют значимые различия по содержанию Cd, Mn и Zn между почвами естественного и сельскохозяйственного типов землепользования. Для отдельных типов почв выявлено статистически значимое превышение содержания Co (для подзолистых и серых лесных почв), Cr (в случае черноземов, подзолистых, дерново-карбонатных и серых лесных почв), Pb (в черноземах), Cu и Ni (в подзолистых почвах) в пахотном слое по сравнению с гумусовым слоем естественных почв, что обусловлено снижением коэффициентов подвижности в результате

сельскохозяйственной обработки и соответствующего изменения физико-химических свойств почв.

3. Построены карты пространственного распределения металлов в гумусовых горизонтах почв Республики Татарстан, отражающие современное геоэкологическое состояние почвенного покрова. На территории Республики Татарстан выделяется несколько геохимических зон повышенного содержания отдельных элементов: (1) восточная часть Предкамья, где наблюдается повышенное содержание Cd, Co, Cr и Zn; (2) Бугульминский и Восточно-Закамский физико-географические регионы, где наблюдаются повышенное содержание Cr, Mn и Ni. Повышенное содержание в почвах железа наблюдается в двух геохимических зонах: вся территория Предволжья и север Предкамья.

4. Изучена геохимическая структура зависимости содержания и коэффициента подвижности тяжелых металлов от почвенных свойств (содержание гумуса, актуальная кислотность, гранулометрический состав, содержание железа и марганца) в условиях различных типов землепользования. Установлено антропогенное происхождение Pb и Zn в городских почвах. Зависимость содержания и коэффициента подвижности Co, Cr, Cu, Mn и Ni от почвенных компонентов и свойств не различается в почвах естественного, сельскохозяйственного и урбанизированного типов землепользования. Региональная вариабельность железа и тяжелых металлов на территории республики определяется тремя факторами: (1) литогенный фактор наследования тяжелых металлов, (2) литогенный фактор поступления тяжелых металлов, на который накладываются региональные факторы почвообразования, (3) антропогенный привнос тяжелых металлов.

5. Естественные и сельскохозяйственные почвы Республики Татарстан характеризуются как незагрязненные относительно региональных фоновых значений, что также подтверждает отсутствие загрязнения тяжелыми металлами, связанного непосредственно с сельскохозяйственной деятельностью, которую можно было бы детектировать на данном масштабе обследования. Локальные загрязнения медью наблюдаются на территории г. Набережных Челнов, Казани и Альметьевска; цинком – на территории Альметьевска и Набережных Челнов; свинцом загрязнены почвы г. Казани. Вместе с тем ни для одного образца, отобранного для данной работы, уровень загрязнения не характеризовался как опасный.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК***

1. Рязанов С.С., Иванов Д.В., Кулагина В.И., Сахабиев И.А. Содержание и подвижность кадмия, кобальта и цинка в гумусовых горизонтах почв Республики Татарстан // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2017. – № 4 (40). – С. 6-24.

2. Рязанов С.С., Сахабиев И.А. Региональная характеристика пространственной изменчивости содержания никеля, кобальта и хрома в верхних горизонтах почв Республики Татарстан // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2018. – № 1. – С. 133-140.

3. Рязанов С.С., Иванов Д.В., Кулагина В.И. Содержание и подвижность меди, хрома и никеля в гумусовых горизонтах почв Республики Татарстан // Уч. зап. Петрозаводского гос. университета. – 2018. – № 8 (177). – С. 105-113.

4. Рязанов С.С., Григорьян Б.Р., Сахабиев И.А. Содержание и подвижность свинца в почвах Республики Татарстан в условиях различных типов землепользования // Журнал СФУ. Биология. – 2019. - № 12(1). – С. 101-116.

5. Ryazanov S.S., Sahabiev I.A. Comparison of terrain-based drift models to improve the quality of soil predictive mapping at a field scale // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2016. – № 4 (36). – С. 21–33.

6. Ryazanov S., Sahabiev I., Grigoryan B. Regional Geo-Statistical Operation Model of Soil Humus-content, Acidity and Structure Distribution with Geo-Morphometric Data Use // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). – 2015. – V 10. – № 24. – P. 44696-44704.

7. Sahabiev I.A., Ryazanov S.S., Kolcova T.G., Grigoryan B.R. Selection of a Geostatistical Method to Interpolate Soil Properties of the State Crop Testing Fields using Attributes of a Digital Terrain Model // Eurasian Soil Science. – 2018. – V. 3. – Iss. 3. – P. 255-267.

8. Sahabiev I.A., Giniyatullin K.G., Ryazanov S.S. Digital soil mapping as a basis for climatically oriented agriculture a thematic on the territory of the national crop testing fields of the Republic of Tatarstan, Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – V. 107.012122.2018.

#### ***Свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение***

9. Рязанов С.С., Сахабиев И.А., Григорьян Б.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610708 "Почвенный покров". Правообладатель: ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.01.2016.

10. Рязанов С.С., Сахабиев И.А., Григорьян Б.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610788 "Морфология почв". Правообладатель: ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.01.2016.

#### ***Публикации в тематических сборниках и трудах конференций***

11. Сахабиев И.А., Рязанов С.С. Исследование пространственной изменчивости свойств почв с применением геостатистического подхода // Российский журнал прикладной экологии. – 2015. – № 2. – С. 32-37.

12. Симбатова А.Т., Рязанов С.С., Сахабиев И.А. Моделирование пространственного распределения органического вещества почв: обзор современных подходов // Российский журнал прикладной экологии. – 2016. – № 2. – С. 48-54.

13. Рязанов С.С., Сахабиев И.А. Программный комплекс полевого и лабораторного описания почвенного покрова // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов: Мат-лы IV междунар. научно-практ. конф. - Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2014. – 335 с.

14. Рязанов С.С. База данных для полевых и лабораторных почвенных исследований // Мат-лы Междунар. молодежного научн. форума "ЛОМОНОСОВ-2014". – М.: МАКС Пресс, 2014.

15. Симбатова А. Т., Рязанов С. С. Пространственный прогноз вариабельности органического вещества в почвах Предволжья Республики Татарстан // XXIV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» . – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 214-215.

16. Мурадимова А. Р., Рязанов С. С. Цифровое картографирование почвенного покрова Предволжья Республики Татарстан // XXIV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017». – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 208-209.