

УДК 631.48:546.6:574.4

ФАКТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ**Водяницкий Юрий Никифорович**

доктор биологических наук, профессор, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, **Россия**, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, 143030, yu.vodyan@mail.ru

Смагин Андрей Валентинович

доктор биологических наук, профессор, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, **Россия**, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы; институт Лесоведения РАН, 143030, Московская обл., Советская, 21, п/о Успенское, smagin@list.ru

Яковлев Александр Сергеевич

доктор биологических наук, профессор, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, **Россия**, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, 143030, yakovlev_a_s@mail.ru

Анализируются причины изменчивости содержания подвижных форм тяжелых металлов при оценке загрязнения почв. Отмечается возможность высокого (до 50-200%) варьирования показателей загрязнения одних и тех же участков в зависимости от гидротермических условий сезона, сроков отбора образцов, вариантов их хранения и подготовки к анализу. Проанализирована экспериментальная зависимость подвижности (выхода в раствор) водорастворимых веществ-электролитов от влажности почвы. Предложен вариант корректировки нормативов загрязнения в виде предельно допустимых концентраций подвижными формами с учетом влажности. Приводятся гипотезы, связанные с трансформацией минералов и химических соединений, при изъятии образцов из природных условий и переносе в среду с низкой влажностью и иным газовым составом, а также с низкой селективностью экстрагентов.

Ключевые слова: химическое загрязнение, количественная оценка, подвижные формы тяжелых металлов, факторы изменчивости, влажность, экологическое нормирование.

Статья поступила в печать 12.01.2016

VARIATION FACTORS OF MOBILE FORMS OF HEAVY METALS IN SOIL**Vodyanitsky Yu. N.**

doctor of biological science, professor, Lomonosov Moscow State University, (Russia), 119992, Moscow, GSP-2, Leninskye gory; E-mail: yu.vodyan@mail.ru;

Smagin A. V.

doctor of biological science, professor, Lomonosov Moscow State University, (Russia), 119992, Moscow, GSP-2, Leninskye gory; Institute of Forest Science the Russian Academy of Sciences, (Russia), 143030, Moscow region., Sovetskaya, 21, p/o Uspenskoe, E-mail: smagin@list.ru;

Yakovlev A. S.

doctor of biological science, professor, Lomonosov Moscow State University, (Russia), 119992, Moscow, GSP-2, Leninskye gory; E-mail: yakovlev_a_s@mail.ru;

The reasons of variability of mobile forms of heavy metals in the assessment of soil contamination are analyzed. It is noted the possibility of a high (up to 50-200%) varying estimates of pollution of the same areas, depending on hydrothermal conditions of the season, time of sampling options for their storage and preparation for analysis. The experimental dependence of the mobility (access to the solution) of water-soluble substances from the soil moisture electrolytes is analyzed. Option adjustments pollution standards in the form of maximum allowable concentrations of mobile forms, taking into account the humidity is proposed. Hypothesis related to transformation of minerals and chemical compounds, when removing samples from the natural environment and in the transfer medium with low moisture and other gaseous composition and with a low selectivity of the extractants are shown.

Keywords: chemical pollution, quantification, mobile forms of heavy metals, volatility factors, humidity, environmental regulation.

Received 12.01.2016

Введение. Актуальная проблема количественной оценки загрязнения почв, несмотря на длительную предысторию и активную проработку, остается незавершенной. Этот тезис подтверждается многочисленными результатами

оценки загрязнения почв тяжелыми металлами при обследовании санитарно-эпидемиологического состояния населенных пунктов, в строительных изысканиях, при экологическом мониторинге сельскохозяйствен-

ных и городских земель, регламентируемых законодательством РФ [1, 22, 36, 41, 46, 52].

При наличии, казалось бы, четко прописанных, гостированных процедур анализа и установленных на федеральном уровне нормативов загрязнения в виде ПДК и ОДК попытки выявить тенденции загрязнения, например, в столичном мегаполисе до сих пор не увенчались успехом из-за противоречивых результатов. Так, ряд источников сообщает об устойчивой тенденции загрязнения почвенного покрова городов России и, в частности, столичного мегаполиса, особенно в зонах повышенной техногенной нагрузки и центральных районах с наибольшим возрастом [36, 41]. Вместе с тем из официальных данных ГПБУ Мосэкомониторинга [52], лежащих в основе Государственных докладов о состоянии окружающей среды в столице, следует скорее обратная тенденция улучшения почв по состоянию загрязнения со снижением концентраций поллютантов (тяжелых металлов и металлоидов 1, 2 классов опасности) вплоть до 50–70 % за промежуток в 4 года (2004–2008 годы), что маловероятно с учетом длительности действия естественных механизмов самовосстановления почв за счет распределения и выноса из них загрязняющих веществ на фоне постоянного техногенного прессы [3, 4, 5, 6, 35].

Причин противоречий может быть несколько. Во-первых, сильная пространственная неоднородность загрязнения городских почв, усугубленная периодической заменой (реплантацией) почвогрунтов в процессе озеленения и комплексного благоустройства городской среды. Пространственное варьирование загрязнения вообще и статистическое обоснование повторностей при отборе проб, равно как и их представительности не только по территории, но и по глубине почвенной толщи, – предмет отдельного рассмотрения и также нерешенная до конца задача [41, 47]. Во-вторых, временное варьирование. В-третьих, влияние лабораторного высушивания образцов и снижение селективности реагентов. Двум последним аспектам и посвящена данная статья. Этим мы хотим обратить внимание на малоисследованные факторы изменчивости результатов количественной оценки загрязнения почв на примере наиболее динамичных и вместе с тем наиболее важных для оценки актуального загрязнения круговорота элементов, транспорта и потребления растительностью, токсичности, подвижных форм тяжелых металлов, исследуемых при мониторинге загрязнения и нормируемых в РФ [16, 17, 37].

Цель работы: попытаться объяснить феномен временной изменчивости содержания подвижных форм тяжелых металлов с позиций ряда факторов физической, химической и физико-химической природы, действующих в почвах.

Поскольку значительная часть этих факторов контролируется условиями увлажнения почвы, отдельное внимание в статье посвящено количественной оценке зависимости концентрации водорастворимых веществ от влажности и возможности ее использования при нормировании загрязнения. Статья в целом носит обзорно-аналитический характер, поэтому значительная часть данных представляет собой опубликованные ранее литературные источники по рассматриваемой проблеме.

Объекты и методы. Подвижные формы тяжелых металлов и металлоидов во всех анализируемых работах извлекались из почвы с использованием ацетатно-аммонийного буфера при pH 4.8 (ААБ) и определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно действующим МУ [29]. Собственные экспериментальные данные по зависимости электропроводности почвенных растворов от влажности получены для образцов ненарушенного сложения горизонтов А (0–10 см) дерново-подзолистых пахотных и старопахотных почв УОПЭЦ МГУ «Чашниково», представленных легким (№ 1), тяжелым (№ 2) и средним (№ 2, 3) суглинками [40, 42].

Удаление почвенного раствора осуществлялось посредством лабораторной центрифуги ЦУМ-1 в процессе определения водоудерживающей способности почв методом равновесного центрифугирования [38]. В отделяемом центрифугате на каждой стадии обезвоживания, с определенной влажностью и давлением почвенной влаги, оценивалась электропроводность с помощью портативного кондуктометра HANNA DIST WP4 с микронасадкой для измерения в малом объеме.

При математической обработке результатов использовался метод наименьших квадратов для нелинейной аппроксимации данных в виде опции Regression Wizard компьютерной среды S-Plot 9 версии, а также метод численного интегрирования функций, реализованный в виде макроса MS Excel [2, 4, 18].

Обсуждение результатов.

Причины временной изменчивости подвижных тяжелых металлов

Влияние исходной влажности почвы. Начнем обсуждение с наблюдений М. Г. Опекуновой за содержанием подвижных форм тяжелых металлов в течение 11 лет на фоновой

территории в Башкирском Зауралье в черноземных почвах [33]. Эта работа опубликована в малодоступном сборнике, поэтому воспроизведем здесь центральную таблицу, снабдив ее значениями коэффициента вариации v подвижных форм тяжелых металлов (таблица 1).

Варьирование по годам подвижных форм тяжелых металлов очень значительно, особенно для Cd, Pb, Ni (188–98 %), и в меньшей степени для Mn и Fe (45–68 %). По поводу природных причин различия в содержании подвижных форм тяжелых металлов в разные годы, М.Г. Опекунова пишет: «... большую роль играют погодные условия и прежде всего

количество выпавших осадков и влажность почв, так что по годам на одних и тех же пробных площадках отмечаются существенные различия в концентрации подвижных форм тяжелых металлов» [33]. Сильное варьирование она объясняет «... деятельностью почвенных организмов, феноритмическими изменениями поглощения химических элементов растениями и другими факторами». Можно согласиться с мнением автора о влиянии повышенной активности микроорганизмов при увлажнении почвы на рост подвижности тяжелых металлов, хотя, как будет видно дальше, это не единственное объяснение наблюдаемому явлению.

Таблица 1. Содержание подвижных соединений тяжелых металлов (мг/кг) и коэффициент их вариации v . По данным (Опекунова, 2011)

Год	Fe	Cu	Zn	Mn	Pb	Ni	Cd	Co
1999	0.29	1.8	2.6	23.7	0.2	0.1	0.01	0.10
2000	6.0	0.1	7.6	28.3	0.1	0.1	0.01	0.10
2001	7.4	0.5	7.6	52.1	0.4	0.7	0.70	0.10
2002	16.3	0.6	6.6	50.8	1.6	0.6	0.10	0.30
2003	18.0	0.7	5.8	48.0	0.9	0.5	0.20	0.20
2004	5.9	0.2	5.5	42.8	0.8	0.1	0.03	0.20
2005	15.2	1.0	8.1	29.1	2.0	0.3	0.03	0.10
2006	3.71	0.2	7.0	71.1	2.1	0.7	0.07	0.28
2007	2.2	1.5	6.3	19.6	3.1	0.3	0.03	0.01
2009	17.0	1.3	21.4	73.7	4.7	1.6	0.08	0.01
2010	11.8	0.4	0.6	23.5	<0.02	<0.015	<0.12	<0.01
v , %	68	76	73	45	101	98	188	81

Близкие результаты для черноземов обыкновенных в агроландшафтах Краснодарского края в течение 8-летнего мониторингового цикла получены в серии работ под руководством профессора И. С. Белюченко [7, 8, 9, 19]. Изучение динамики подвижного цинка, марганца, кобальта показывает, что их концентрация в почве сильно колеблется по сезонам. Содержание элементов достигает максимума в наиболее влажные и теплые периоды (весна, влажное лето), а минимальное в условиях дефицита влаги (засухи) и к концу вегетационного сезона (осень). Во всех опытах с масштабной площадной съемкой учитывается фактор пространственного варьирования, который оказывается менее значительным по сравнению с сезонной динамикой и трендами аккумуляции поллютантов. То же касается и вертикального распределения исследуемых элементов по профилю разрезов до глубин 100-200 см, что указывает на невозможность объяснения сезонного варьирования концентраций подвижных форм в верхнем слое только перераспределением (привносом или выносом) при вертикальном перемещении растворов.

Е.А. Карпова и В.Г. Минеев, обобщая закономерности поведения тяжелых металлов в

агроэкосистемах, также пишут, что «количество наиболее мобильных соединений элементов – показатель, динамично меняющийся во времени и зависящий от множества факторов» [24].

Подробные исследования на дерново-подзолистых почвах в Кировской обл. провела Л. Н. Шихова [45]. Она показала, что содержание подвижных соединений ТМ подвержено значительной временной вариабельности, обусловленной погодными воздействиями. Максимальная подвижность элементов отмечается в первой половине вегетационного сезона. Она обусловлена низким окислительно-восстановительным потенциалом из-за высокой влажности почвы и значительным содержанием лабильного органического вещества, повышающим подвижность тяжелых металлов. Минимальные количества Mn, Cu, Pb и Cr приходятся на конец сезона, Zn – на середину или конец сезона, Cd, Mo и Ni – на середину сезона. Хотя погодно-климатические условия года наблюдений (а иногда – и предыдущего года) могут также влиять на содержание подвижных соединений.

Лабораторные эксперименты по влиянию влажности на содержание подвижных форм

металлов провела И.О. Плеханова [34, 35]. Месячная инкубация дерново-подзолистой почвы при 60 и 100 % предельной полевой влагоемкости показала при повышенной влажности существенное (примерно в два раза) возрастание подвижности Co и Ni . Увеличение содержания подвижных форм кобальта и никеля автор также связывает с микробиологической активностью при переувлажнении почвы.

Изложенные факты нестабильности содержания подвижных форм тяжелых металлов и их зависимости от условий увлажнения почвы сочетаются с многочисленными аналогичными данными агрохимических исследований биофильных макро- и микроэлементов [14, 25, 32, 21, 44, 48]. Множество экспериментальных работ посвящено влиянию высушивания и термообработки образцов в лабораторных условиях на содержание подвижных форм элементов в почвах [3, 20, 23, 26, 28, 30, 32, 43, 48, 49, 51, 54, 55]. При этом в большинстве случаев отмечается тенденция увеличения содержания подвижных соединений. Наибольшее увеличение подвижности, экстрагируемости соединений при высушивании, по-видимому, свойственно почвам, которые в естественных условиях характеризуются повышенной влажностью [30].

Резюмируем, что содержание подвижных форм элементов, включая загрязняющие почву вещества, весьма сильно зависит от гидротермических условий в момент отбора, условий хранения и подготовки к анализу образцов, которые контролируют в первую очередь равновесие «жидкая-твердая фаза», то есть, собственно подвижность химического элемента или его способность переходить в почвенный раствор. На этот основной механизм могут накладываться дополнительные почвенные факторы, контролируемые влажностью, среди которых – биологическая активность с эмиссией диоксида углерода, химические реакции, трансформация минералов и т. д. Ввиду определяющей значимости для количественной оценки подвижных форм металлов в зависимости от влажности обратимся к анализу такой функции, полученной экспериментально.

Характеристика зависимости подвижности растворимых соединений от влажности почвы. Общий ход зависимости концентрации почвенных растворов в зависимости от влажности, полученной кондуктометрией, при последовательном увеличении отделяющей жидкую фазу центробежной силы для образцов показан на рисунке 1-А. Как видно это достаточно сложная функция с экстремумом, приходящимся на область 0.4-0.6 единиц от полной влагоемкости (влажности насыщения

почвы – W_s). При построении графика исходные данные [40, 42] в виде зависимости электропроводности отделяемых растворов от влажности дерново-подзолистых почв разной дисперсности были обработаны следующим образом: электропроводность нормировалась максимальной величиной, соответствующей экстремуму, а влажность (W) – максимально возможным значением в виде полной влагоемкости. В результате подобного нормирования были получены два безразмерных показателя – относительной концентрации (C/C_{max}) и степени насыщенности почвы влагой (W/W_s). При расчете C/C_{max} использовано положение о прямой пропорциональности содержания электролитов и электропроводности неконцентрированного раствора, лишённого скин-эффекта. Показатель W/W_s является базовым в теории физического состояния почв и служит мониторинговой характеристикой почвенных режимов [41]. Оба показателя изменяются в диапазоне от нуля до единицы.

Экстремальный характер полученной зависимости, согласно [39, 40], связан с действием двух противоположных эффектов: разбавления при увеличении влажности и «нерастворяющего объема» – при ее уменьшении и связывании воды поверхностными силами. В результате экстремум анализируемой функции соответствует почвенно-гидрологической константе максимальной молекулярной влагоемкости ($ММВ$), а крайние значения левой части – максимальной адсорбционной влагоемкости или нерастворяющему объёму, причем обе константы при этом зависят не только от дисперсности почвы, но и от концентрации и состава почвенного раствора [39, 40].

Проинтегрируем полученную экспериментальную зависимость распределения концентраций почвенных растворов от влажности. Результаты отражены на рисунке 1-Б. Физический смысл интеграла – общее относительное количество водорастворимых веществ во всем диапазоне варьирования показателя степени насыщенности почвы влагой, то есть потенциальное суммарное количество при извлечении методом центрифугирования по порциям, в зависимости от степени связности влаги в почве (размера пор, действия поверхностных сил). Как видно, интеграл в пределах от начала распределения до максимума концентраций (левая ветвь «а») распределения не превышает 0.1 относительных единиц, или 20–25 % от величины общего интеграла исследуемой функции. Это означает, что доля подвижных форм, выходящих в раствор при низких значениях влажности (до $ММВ$) в общем относительно, невелика. Для

сравнения: правая ветвь «b» распределения от *ММВ* до W_s при интегрировании дает величину интеграла 0.33–0.45 относительных единиц, или 75–80% от общего интеграла распределения, то есть существенно (до 3–4 раз) больший вклад. Отсюда, если почва в период отбора

проб была иссушена до состояния *ММВ*, содержание подвижных форм, растворимых при условии достижения термодинамического межфазного равновесия, должно быть в несколько раз меньше, чем в случае более увлажненной (выше *ММВ*) почвы.

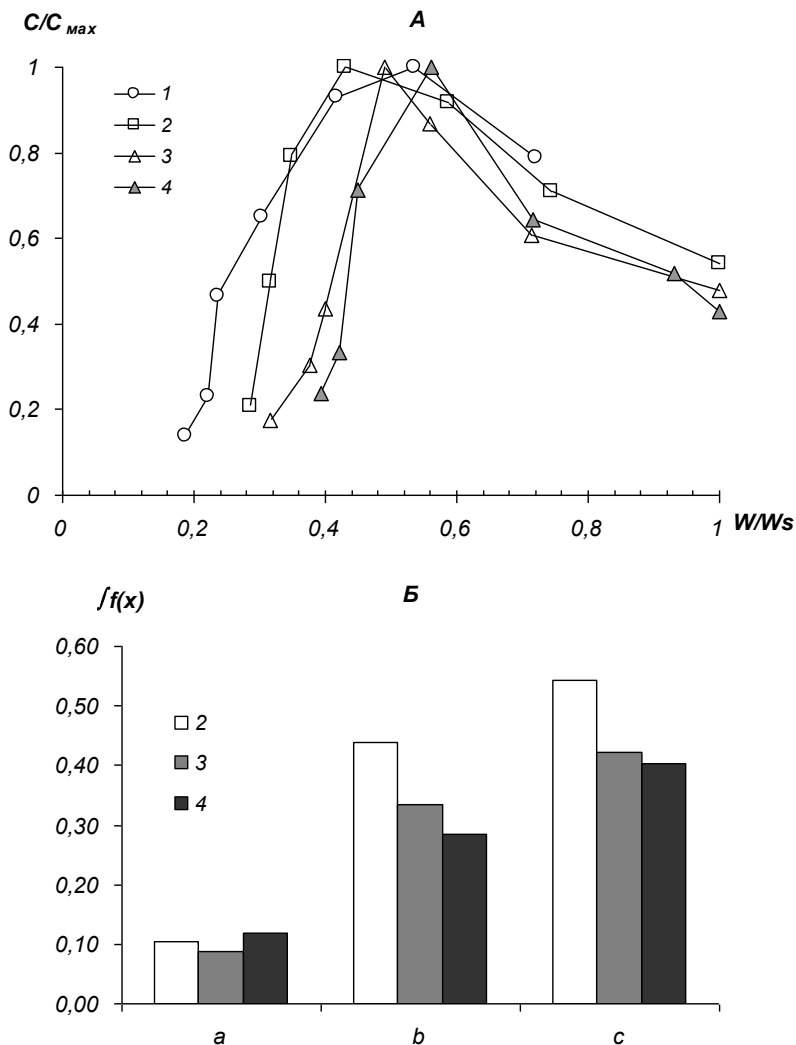


Рисунок 1. Зависимость относительной концентрации почвенных растворов от влажности и результаты ее численного интегрирования. А – общий вид: 1, 2-3, 4 – образцы дерново-подзолистых пахотных почв легко-, средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава; Б – интеграл $f(x)=C/C_{max}(W/W_s)$: 2-4 номера образцов (см выше), а – значение интеграла до максимума концентрации (левая часть распределения), б – то же после максимума (правая часть распределения, в – весь интеграл $f(x)$).

Однако если максимум концентраций приходится на область *ММВ*, то дальнейшее увеличение влажности так же будет снижать равновесные концентрации в почвенных растворах в связи с эффектом разбавления. В результате очень сильные разбавления, используемые при химических анализах, в частности при определении подвижных форм тяжелых металлов (вытяжки 1:10 и 1:20 – для органических субстратов), преследуя целью экстракцию веществ, извлекают в первую очередь те количества исходно находящиеся в растворе, а после высушивания в лаборатории до воз-

душно-сухого состояния – в виде растворимого осадка, которые были в почве в момент отбора проб при данной влажности. Дополнительный же выход в раствор со стороны твердой фазы также будет определяться исходным равновесием в момент отбора проб, поскольку если концентрации в растворе были большие, то и на твердой фазе было много веществ в адсорбированном или обменном виде, если же почва была пересушена до *ММВ* и концентрации в растворе низкие, нет оснований ожидать большого выхода при экстракции (извлечении) подвижных форм сильно разбавленными растворами (вы-

тяжками). Конечно, описанная выше картина весьма схематична и не учитывает множества нюансов, в частности силы действия самих вытяжек (ацетатно-аммонийного буфера для подвижных форм), кинетики процесса и т. д., но в целом она, на наш взгляд, проясняет возможные причины различий в выходе подвижной фракции тяжелых металлов и металлоидов в зависимости от влажности с чисто физических и физико-химических позиций, на которые, безусловно, будут накладываться и иные факторы, в первую очередь биологическая активность, контролируемая влажностью, и вызываемое ею повышение парциального давления CO_2 почвенных растворов, трансформация минералов, химические реакции.

Нормирование ПДК подвижных форм с учетом влажности почвы. Анализируя зависимость относительной концентрации от влажности (рисунок 1-А), несложно убедиться, что в диапазоне $0.3 < W/W_s < 1$, характерном для содержания подвижной жидкой влаги и основного содержания растворимых веществ в дерново-подзолистых суглинистых почвах, изме-

нения концентраций растворов редко превышают двукратную величину. Тот же вывод следует и из анализа цитируемых выше работ [33, 35, 45] для подвижных форм металлов, включая загрязняющие вещества. Очевидно, при нормировании желательнее внести коррективы в показатель ПДК подвижных тяжелых металлов, сделав его зависящим от влажности почвы и тем самым устранив влияние этого фактора на величину ПДК. Мы попытались предложить формулу модифицированного показателя ПДК, используя перечисленные выше опытные данные и участок экспериментальной зависимости относительной концентрации почвенных растворов от влажности для дерново-подзолистых суглинистых почв (рисунок 2). Чтобы нейтрализовать «влажностный эффект», следует нормировать содержание тяжелых металлов по влажности. Оптимальным для экспериментальных данных будет такое выражение, когда отношение между вариантами с разной влажностью окажется близким 1.

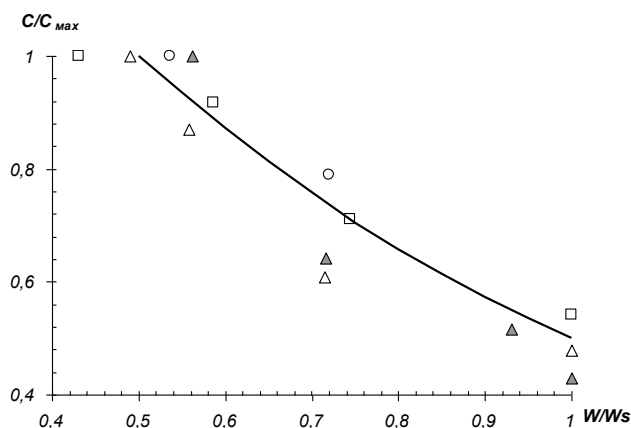


Рисунок 2. Аппроксимация участка зависимости относительной концентрации почвенных растворов от влажности моделью (1). Условные обозначения – номера образцов, см. рисунок 1.

Подобный результат мы получаем, используя выражение: $C_{TM} / (1 + a \cdot (W/W_s)^2)$, где C_{TM} – содержание данного тяжелого металла в мг/кг, a – эмпирический коэффициент. Такое выражение можно использовать в первом приближении для уточнения ПДК подвижных Co и Ni в дерново-подзолистых почвах.

Поскольку имеющийся, согласно рис. 1-А, максимум концентрации приходится на фиксированное значение влажности MMB , а установленный норматив ПДК должен быть связан именно с максимальным количеством загрязнителя, получаем следующую зависимость:

$$ПДК_w = (1 + a \cdot (MMB/W_s)^2) \cdot ПДК / (1 + a \cdot (W/W_s)^2).$$

Здесь $ПДК_w$ – величина нового, переменного норматива, зависящего от влажности. То-

гда, при подстановке в выражение влажности экстремума $W = MMB$, имеем необходимое условие: $ПДК_w = ПДК$. В насыщенном состоянии ($W = W_s$), согласно обсуждаемым выше данным и рис 1, редко достигается более чем двукратное изменение концентрации, что соответствует параметру $a=2$. Средняя величина MMB/W_s для исследуемых дерново-подзолистых почв, определенная графически по рисунок 1-А, составила 0.5 ± 0.06 единиц. Подставляя ее в полученное выше выражение при $a=2$, получаем постоянный коэффициент в числителе, равный 1.5. Тогда окончательная формула для переменного норматива ПДК, зависящего от влажности, будет выглядеть как:

$$ПДК_w = 1.5 \left[\frac{ПДК}{1 + 2(W/W_s)^2} \right] \quad (1)$$

Результаты аппроксимации участка исследуемой концентрационной зависимости от влажности полученным уравнением (вместо ПДК – относительные концентрации растворов) приведены в виде сплошной линии на рис. 2. Как видно, предложенная модель хорошо описывает реальные данные с коэффициентом детерминации $R^2=0.91$ и невысокой стандартной ошибкой аппроксимации $s=0.066$, близкой к стандартным отклонениям исследуемых величин. Это позволяет использовать полученное выражение для дерново-подзолистых суглинистых почв при нормировании подвижных форм тяжелых металлов в диапазоне наиболее вероятных изменений влажности от *ММВ* до полной влагоемкости. «Ужесточение» норматива при увеличении влажности и, соответственно, уменьшение в нём количества подвижных форм загрязняющих веществ оправдано транслокационным характером рассматриваемого показателя вредности и риском попадания в растительную продукцию, а также в сопредельные с почвой среды.

Нарушение селективности ААБ при экстракции тяжелых металлов из городских почв. Укажем на еще один вероятный фактор изменчивости оценки подвижных форм тяжелых металлов, специфичный для городских почв. У всех химических реактивов, ориентированных на экстракцию подвижных соединений из почвы, селективность невысокая [13]. Дополнительно селективность ААБ снижается при экстракции тяжелых металлов из городских почв. Во-первых, у городских почв в таежной зоне повышена степень карбонатности [15]. В таких почвах ААБ попутно растворяет карбонаты и переводит в раствор связанные с ними тяжелые металлы [50], что снижает селективность экстрагента, предназначенного для подвижных тяжелых металлов.

Вторая особенность городских почв – обогащенность магнетитом Fe_3O_4 [10, 53, 56]. Два реактива (ААБ и кислый оксалат аммония) близки по своему действию, потому и используются для растворения подвижных форм металлов, хотя кислый оксалат аммония рассматривают как более «жесткий» реагент по отношению к соединениям железа. Причина в различии прочности комплексов с Fe^{3+} : для оксалата константа устойчивости $K_{уст} = 9.4$, тогда как для ацетата – только 3.38 [27]. Другая причина – в разных константах устойчивости комплексов, но и в разных значениях рН в вытяжке Тамма и в ААБ. В результате при экстракции ацетатно-аммонийным буфером Fe из высоко

ожелезненной почвы не все оно сохраняется в растворе, а часть выпадает в осадок, что снижает селективность ААБ.

Кроме неселективности к железу, в городских почвах возможно нарушение селективности ААБ к тяжелым элементам. Дело в том, что техногенный магнетит почти всегда содержит примеси тяжелых элементов – сидерофилов, таких как As, Cr, Ni и др. [10, 11]. Растворение частиц техногенного магнетита ведет к переходу в раствор тяжелых элементов и завышению содержания их подвижных форм.

Поскольку у магнетита высокая магнитная восприимчивость χ , то загрязнение техногенным магнетитом Fe_3O_4 сильно повышает магнитную восприимчивость почвы [12, 53]. Во многих городах валовое содержание некоторых металлов-сидерофилов коррелирует с магнитной восприимчивостью почвы [53]. Связано это с тем, что в магнетите возможны разнообразные замещения железа: двухвалентное железо замещается Mn, Ti, Ni, а трехвалентное – V, Zn, Cu [13]. Кроме того, техногенный магнетит сорбирует Cr, As и др. Содержание этих тяжелых элементов в магнетите часто превышает 1%. Благодаря обилию нестехиометрического магнетита оказываются эффективными «магнитные критерии техногенности» загрязненных почв [56].

Наличие прямой статистической зависимости содержания подвижного тяжелого металла от магнитной восприимчивости почв будет указывать на поступление в раствор данного металла из растворяющихся частиц магнетита. Сопряженные данные о магнитной восприимчивости почв и содержании в них подвижных тяжелых металлов получены нами ранее для Перми [11, 12], а здесь приведем результаты статистических расчетов. Исследовано 30 образцов легкого гранулометрического состава с нейтральной и слабощелочной реакцией, представленных слабо загрязненными дерново-подзолистыми, средне загрязненными урбодерново-подзолистыми и сильно загрязненными урбоземами. Ориентировочно, магнитная восприимчивость верхнего слоя слабо загрязненных почв $\chi < 100 \cdot 10^{-8}$, средне загрязненных $100 \cdot 10^{-8} < \chi < 500 \cdot 10^{-8}$, сильно загрязненных – $\chi > 500 \cdot 10^{-8}$.

В таблице 2 приведены статистические показатели магнитной восприимчивости, содержания подвижных соединений тяжелых металлов в городских почвах Перми, а также коэффициенты корреляции χ с содержанием подвижных соединений тяжелых металлов. Содержание двух металлов (хрома и никеля) достоверно зависит от содержания магнетита в почве

– их коэффициенты корреляции с магнитной восприимчивости достоверно высоки: $R_{\chi-Cr} = 0.72$, $R_{\chi-Ni} = 0.85$. Очевидно, растворение магне-

тита приводит к обогащению реактива этими металлами.

Таблица 2. Статистические показатели магнитной восприимчивости χ и содержания подвижных соединений тяжелых металлов (Me) в городских почвах Перми по данным [11]

Показатель	χ	Fe	Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb
Минимум	50	80	21	1.5	3.1	0.6	0.3	1.1
Максимум	1065	1080	117.4	19.4	54.3	20.6	14.2	10.5
Среднее	235	293	58	5.8	17.0	3.4	2.7	4.7
Ст. отклон.	277	287	25	4.0	13.4	4.4	3.9	2.9
Коэфф. корр. χ -Me	-	0.14	-0.15	0.72*	0.17	0.85*	0.22	0.01

Примечание: * - достоверно при $P=0.95$.

Выводы

1. В почвах действует множество факторов, обуславливающих сильную временную изменчивость содержания подвижным форм тяжелых металлов. Выход из сложившейся ситуации видится в двух направлениях. Первое – разработка альтернативных критериев, методов и технологий мониторинга подвижных форм в полевых условиях, второе – совершенствование существующих нормативов оценки загрязнения подвижными формами тяжелых металлов.

2. Первостепенное значение в определении подвижных форм элементов имеют гидротермические условия и в первую очередь фактор влажности почвы, контролирующей физические, физико-химические, химические и биологические механизмы изменения подвижности по типу нелинейной функции с экстремумом (максимумом).

3. Действие фактора влажности на оценку загрязнения подвижными формами тяжелых металлов может быть учтено на нормативном уровне вводом дифференцированных по влажности ПДК_w с использованием их простой физически обоснованной зависимости от степени насыщенности почвы влагой (W/W_s) вида: $ПДК_w = 1.5 \cdot ПДК / (1 + 2(W/W_s)^2)$ (на примере подвижных Co и Ni в дерново-подзолистых суглинистых почвах).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко В. А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитенных ландшафтов / В. А. Алексеенко, А. В. Алексеенко. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. – 380 с.
2. Антоненко Д. А. Сложный компост и его влияние на свойства почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур: монография / Д. А. Антоненко, И. С. Белюченко, В. В. Гукалов, В. В. Корунчикова и др. / под ред. Белюченко И. С. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 180 с.

3. Белюченко И. С. Экология Кубани / И. С. Белюченко. – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2005. – 513 с.

4. Белюченко И. С. Отходы быта и производства как сырье для подготовки сложных компостов: монография / И. С. Белюченко. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 418 с.

5. Белюченко И. С. Интродукция растений как метод расширения видового состава культурных фитоценозов в южных районах СНГ / И. С. Белюченко, Б.А. Мустафаев // Экол. Вестник Сев. Кавказа. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 73–89.

6. Белюченко И. С. Влияние сложного компоста на агрегатный состав и водно-воздушные свойства чернозема обыкновенного / Белюченко И. С., Антоненко Д. А. // Почвоведение. – 2015. – № 7. – С. 858–864.

7. Белюченко И. С. Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании / И. С. Белюченко, А. В. Смагин, Л. Б. Попок, Л. Е. Попок // Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. – 312 с.

8. Белюченко И. С. Динамика содержания подвижного и валового цинка в системе агроландшафта / И. С. Белюченко, М. Л. Филлобок // Экол. вестник Сев.Кавказа. – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 66–77.

9. Белюченко И. С. Динамика валового и подвижного кобальта в системе агроландшафта (на примере изучения агроландшафта ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края) / И. С. Белюченко, М. В. Яценко // Экол. вестник Сев.Кавказа. – 2006. – Т. 2. – № 2. – С. 10–37.

10. Водяницкий Ю. Н. Минералы железа в городских почвах / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2010. – № 12. – С. 1519-1526.

11. Водяницкий Ю.Н. Растворение магнетита и изменение форм тяжелых металлов в городских почвах (модельный опыт) / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2013. – № 6. – С. 672-680.

12. Водяницкий Ю. Н. Загрязненность тяжелыми металлами и металлоидами почв г.

- Пермь / Ю. Н. Водяницкий, А. А. Васильев, Е. С. Лобанова // *Агрохимия*. – 2009. – № 4. – С. 60-68.
13. Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю. Н. Водяницкий, Д. В. Ладонин, А. Е. Савичев. – М.: МГУ. – 2012. – 305 с.
14. Воробьева Л. А. Влияние высушивания черноземов на содержание в них подвижного калия и урожай растений / Воробьева Л. А., Кривицкая Е. Ф. // *Агрохимия*. – , 1964. – №6. – С. 81-85.
15. Герасимова М. И. Антропогенные почвы / М. И. Герасимова, М. Н. Строганова, Н. В. Можарова, Т. В. Прокофьева. – Смоленск: Ойкумена, 2003. – 268 с.
16. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
17. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.
18. Глаголев М. В. Приложения МАТЛАВ для численных задач биологии, экологии и почвоведения / М. В. Глаголев, А. В. Смагин. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. – 200 с.
19. Гукалов В. Н. Динамика валового и подвижного марганца в системе агроландшафта (на примере изучения агроландшафта ОАО «Заветы Ильича» Ленинградского района Краснодарского края) / В. Н. Гукалов, И. С. Белюченко, М. М. Демченко // *Экол. вестник Сев. Кавказа*. – 2006. – Т. 2. – № 2. – С. 55-75
20. Деревянчук А. М. Влияние высушивания почв на количественное извлечение обменного калия по методу Масловой / А. М. Деревянчук // *Агрохимия*. – 1973. – №5. – С. 140-142.
21. Державин Л. М., Фрид А. С., Янишевский Ф. В. О мониторинге плодородия земель сельскохозяйственного назначения / Л. М. Державин, А. С. Фрид, Ф. В. Янишевский // *Агрохимия*, 1999. – № 12. – С. 19-30.
22. Добровольский Г. В. Почва, город, экология М.: Фонд "За экономическую грамотность" / Г. В. Добровольский, М. Н. Строганова, Т. В. Прокофьева и др. – 1997. – 320 с.
23. Захаров В. Н. Влияние тонины помола, высушивания и степени гомогенизации высушенных и влажных образцов почвы на точность определения в них содержания подвижных форм фосфора, калия и минерального азота / В. Н. Захаров. – *Агрохимия*. – 1993. – № 7. – С. 69-74.
24. Карпова Е. А. Тяжелые металлы в агроэкосистеме / Е. А. Карпова, В. Г. Минеев. – М. Университет. – 2015. – 251 с.
25. Крупкин П. И. Статистическая оценка результатов определения нитратного азота в свежих и сухих образцах / П. И. Крупкин, Э. И. Крупкина, Л. И. Чурикова // *Почвоведение*. – 1973. – №6. – С. 131-138.
26. Кушниренко Е. Ф. Влияние высушивания почв на содержание подвижных форм калия и фосфора // *Агрохимия*. – 1971. – №7. – С. 55-59.
27. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1971. – 420 с.
28. Ляхов А. И. Влияние высушивания и смачивания, замораживания и оттаивания на подвижность фосфора и калия в эродированных карбонатных черноземах / А. И. Ляхов, Н. С. Фещенко // *Бюл. ВНИИ удобрений и агропочвоведения*, 1984. – №71. – С. 53-57.
29. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (издание 2-ое). Мин-во с.-х. РФ. – М.: ЦИНАО, 1992. – 61 с. (сайт: <http://base.consultant.ru/>).
30. Макаров М. И. Влияние высушивания образцов горно-луговых альпийских почв на процессы трансформации соединений азота и углерода / М. И. Макаров, О. С. Мулякова, Т. И. Малышева, О. В. Меняйло // *Почвоведение*. 2013. № 7. С. 850-859.
31. Муравьев Е. И. Влияние фосфогипса на развитие растений сахарной свеклы в степной зоне Краснодарского края / Е. И. Муравьев, И. С. Белюченко, В. В. Гукалов, О. А. Мельник // *Экол. Вестник Сев. Кавказа*. – 2008. – Т. 4. – № 4. – С. 112-114.
32. Никифорова Л. И. Влияние высушивания, хранения и подготовки к анализу почвенных образцов на показатели агрохимических свойств почв / Л. И. Никифорова // *Агрохимия*. – 1987. – №3. – С. 109-126.
33. Опекунова М. Г. Оценка экологического состояния почв в районе воздействия горнорудных предприятий Южного Урала / М. Г. Опекунова // *Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России*. С-Пб.: 2011. – С. 440-442.
34. Плеханова И. О. Самоочищение агродерново-подзолистых супесчаных почв восточного Подмосковья при полиэлементном загрязнении в результате применения осадков сточных вод / И. О. Плеханова // *Почвоведение*. – 2009. – № 6. – С. 719-725.
35. Плеханова И.О. Трансформация соединений тяжелых металлов в почвах при ув-

лажнении / И. О. Плеханова // Автореф. дисс. докт. биол. наук. М.: МГУ. 2008. – 49 с.

36. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н. С. Касимова. М.: Молодая гвардия, 2015. – 661 с.

37. СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы.

38. Смагин А. В. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования / А. В. Смагин, Н. Б. Садовникова, Мизури Маауи Бен-Али // Почвоведение. – 1998. – №11. – С. 1362-1370.

39. Смагин А. В. Теория и методы оценки физического состояния почв / А. В. Смагин // Почвоведение. – 2003. – №3. – С. 328-341.

40. Смагин А. В. Почвенно-гидрологические константы: физический смысл и количественная оценка на базе равновесного центрифугирования / А. В. Смагин // Доклады по экологическому почвоведению. – 2006. – Вып. 1. – № 1. – С. 31-56.

41. Смагин А. В. Экологическая оценка почвенных ресурсов и технологии их воспроизводства (на примере г. Москвы) / А. В. Смагин, С. А. Шоба, О. А. Макаров. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2008. – 360 с.

42. Смагин А. В. Теория и практика конструирования почв / А. В. Смагин. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2012. – 544 с.

43. Савченко Е. Г. Воздействие высушивания и нагревания почв на подвижность питательных веществ / Е. Г. Савченко // Почвоведение. – 2004. – № 3. – С. 322-331.

44. Христенко А. А. Динамика содержания подвижных соединений фосфора в почвах / А. А. Христенко // Агрохимия. – 2001. – №10. – С. 16-22.

45. Шихова Л. Н. Содержание и динамика тяжелых металлов в почвах Северо-Востока Европейской части России / Л. Н. Шихова. – Автореф. дисс. докт. с/х н. С.-Петербург. – 2005. – 46 с.

46. Экологические функции городских почв. М.: Маджента, 2004. – 228 с.

47. Яковлев А. С. Управление качеством городских почв / А. С. Яковлев, Т. В. Решетина, А. П. Сизов и др. – М.: МАКС Пресс, 2010. – 96 с.

48. Barlett R. J. Studing dried, stored, soil samples - some pitfalls / R. J. Barlett, B. R. James // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. – V.44. – P. 721-724.

49. Buondonno A. Titratable acidity of organo-mineral complexes as affected by mode of preparation, drying and stability of aggregates / A. Buondonno, A. Violante // Canad. Journal of Soil Sci. – 1991. – V. 71. – №3. – P. 285-291.

50. Filgueiras A. V. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental soil samples / A. V. Filgueiras, I. Lavilla, C. Bendicho // J. Environmental Monitoring, 2002. – V. 4. – P. 823–850.

51. Harris M. M. Effects of Microwave Drying on Exchangeable Cations in Forest Soils / M. M. Harris, L. O. Safford // Soil Science. – 1994. – V. 157. – №4. – P. 232-237.

52. <http://mosecom.ru/> (сайт ГПБУ Мосэкомониторинг)

53. Magiera T. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia industrial region, Poland / T. Magiera, Z. Strzyszcz, M. Rachwal // Forest Ecol. Manag. – 2007. – V. 248. – P. 36–42.

54. Payne G. G. Influence of various drying techniques on the extractability of plant nutrients from selected Florida soils / G. G. Payne, J. E. Rechcigl // Soil Science. – 1989. – № 4. – P. 275–283.

55. Tome J. B. Microwave oven-drying of soil samples for chemical testing in Brazil / J. B. Tome // Comm. Soil Sci. Plant Anal. – 1995. – V. 26. – №3&4. – P. 515–529.

56. Williams R. D. Locating soil boundaries using magnetic susceptibility / R. D. Williams, J. R. Cooper // Soil Sci. – 1990. – V. 150. – P. 889–895.

REFERENCES

1. Alekseenko V. A. Himicheskie jelementy v geohimicheskikh sistemah. Klarki pochv selitebnyh landshaftov / V. A. Alekseenko, A. V. Alekseenko. Rostov n/D: Izd-vo Juzhnogo federal'nogo universiteta, 2013. – 380 s.

2. Antonenko D. A. Slozhnyj kompost i ego vlijanie na svojstva pochvy i produktivnost' sel'skohozjajstvennyh kul'tur: monografija / D. A. Antonenko, I. S. Beljuchenko, V. V. Gukalov, V. V. Korunchikova i dr. / pod red. Beljuchenko I. S. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – 180 s.

3. Beljuchenko I. S. Jekologija Kubani / I. S. Beljuchenko. – Krasnodar: Izd-vo Kub-GAU, 2005. – 513 s.

4. Beljuchenko I. S. Othody byta i proizvodstva kak syr'e dlja podgotovki slozhnyh kompostov: monografija / I. S. Beljuchenko. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – 418 s.

5. Beljuchenko I. S. Introdukcija rastenij kak metod rasshirenija vidovogo sostava kul'turnyh fitocenozov v juzhnyh rajonah SNG / I. S. Beljuchenko, B.A. Mustafaev // Jekol. Vestnik Sev. Kavkaza. – 2013. – Т. 9. – № 4. – S. 73–89.

6. Beljuchenko I. S. Vlijanie slozhnogo komposta na agregatnyj sostav i vodnovozdushnye svojstva chernozema obyknovennogo /

Beljuchenko I. S., Antonenko D. A. // Pochvovedenie. – 2015. – № 7. – S. 858–864.

7. Beljuchenko I. S. Analiz dannyh i matematicheskoe modelirovanie v jekologii i prirodopol'zovanii / I. S. Beljuchenko, A. V. Smagin, L. B. Popok, L. E. Popok // Krasnodar: Izd-vo KubGAU, 2015. – 312 s.

8. Beljuchenko I. S. Dinamika sodержanija podvizhnogo i valovogo cinka v sisteme agrolandshafta / I. S. Beljuchenko, M. L. Filobok // Jekol. vestnik Sev.Kavkaza. – 2006. – Т. 2. – № 1. – S. 66–77.

9. Beljuchenko I. S. Dinamika valovogo i podvizhnogo kobal'ta v sisteme agrolandshafta (na primere izuchenija agrolandshafta OAO «Zavety Il'icha» Leningradskogo rajona Krasnodarskogo kraja) / I. S. Beljuchenko, M. V. Jacenko // Jekol. vestnik Sev.Kavkaza. – 2006. – Т. 2. – № 2. – S. 10–37.

10. Vodjanickij Ju. N. Mineraly zheleza v gorodskih pochvah / Ju. N. Vodjanickij // Pochvovedenie. – 2010. – № 12. – S. 1519–1526.

11. Vodjanickij Ju. N. Rastvorenije magnetita i izmenenie form tjazhelyh metallov v gorodskih pochvah (model'nyj opyt) / Ju. N. Vodjanickij // Pochvovedenie. – 2013. – № 6. – S. 672–680.

12. Vodjanickij Ju. N. Zagrjaznennost' tjazhelymi metallami i metalloidami pochv g. Perm' / Ju. N. Vodjanickij, A. A. Vasil'ev, E. S. Lobanova // Agrohimiya. – 2009. – № 4. – S. 60–68.

13. Vodjanickij Ju. N. Zagrjaznenie pochv tjazhelymi metallami / Ju. N. Vodjanickij, D. V. Ladonin, A. E. Savichev. – M.: MGU. – 2012. – 305 s.

14. Vorob'eva L. A. Vlijanie vysushivaniya chernozemov na sodержanie v nih podvizhnogo kalija i urozhaj rastenij / Vorob'eva L. A., Krivickaja E. F. // Agrohimiya. – 1964. – № 6. – S. 81–85.

15. Gerasimova M. I. Antropogennye pochvy / M. I. Gerasimova, M. N. Stroganova, N. V. Mozharova, T. V. Prokof'eva. – Smolensk: Ojkumena, 2003. – 268 s.

16. Gigienicheskie normativy GN 2.1.7.2041-06. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) himicheskikh veshhestv v pochve.

17. Gigienicheskie normativy GN 2.1.7.2511-09. Orientirovochno dopustimye koncentracii (ODK) himicheskikh veshhestv v pochve.

18. Glagolev M. V. Prilozhenija MATLAB dlja chislennyh zadach biologii, jekologii i pochvovedenija / M. V. Glagolev, A. V. Smagin. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2005. – 200 s.

19. Gukalov V. N. Dinamika valovogo i podvizhnogo marganca v sisteme agrolandshafta

(na primere izuchenija agrolandshafta OAO «Zavety Il'icha» Leningradskogo rajona Krasnodarskogo kraja) / V. N. Gukalov, I. S. Beljuchenko, M. M. Demchenko // Jekol. vestnik Sev. Kavkaza. – 2006. – Т. 2. – № 2. – S. 55–75

20. Derevjanchuk A. M. Vlijanie vysushivaniya pochv na kolichestvennoe izvlechenie obmennogo kalija po metodu Maslovoj / A. M. Derevjanchuk // Agrohimiya. – 1973. – № 5. – S. 140–142.

21. Derzhavin L. M., Frid A. S., Janishevskij F. V. O monitoringe plodorodija zemel' sel'skohozjajstvennogo naznachenija / L. M. Derzhavin, A. S. Frid, F. V. Janishevskij // Agrohimiya, 1999. – № 12. – S. 19–30.

22. Dobovol'skij G. V. Pochva, gorod, jekologija M.: Fond "Za jekonomicheskiju gramotnost'" / G. V. Dobovol'skij, M. N. Stroganova, T. V. Prokof'eva i dr. – 1997. – 320 s.

23. Zaharov V. N. Vlijanie toniny pomola, vysushivaniya i stepeni gomogenizacii vysushennyh i vlazhnyh obrazcov pochvy na tochnost' opredelenija v nih sodержanija podvizhnyh form fosfora, kalija i mineral'nogo azota / V. N. Zaharov. – Agrohimiya. – 1993. – № 7. – S. 69–74.

24. Karpova E. A. Tjazhelye metally v agrojekosisteme / E. A. Karpova, V. G. Mineev. – M. Universitet. – 2015. – 251 s.

25. Krupkin P. I. Statisticheskaja ocenka rezul'tatov opredelenija nitratnogo azota v svezhih i suhih obrazcah / P. I. Krupkin, Je. I. Krupkina, L. I. Churikova // Pochvovedenie. – 1973. – № 6. – S. 131–138.

26. Kushnirenko E. F. Vlijanie vysushivaniya pochv na sodержanie podvizhnyh form kalija i fosfora // Agrohimiya. – 1971. – № 7. – S. 55–59.

27. Lur'e Ju. Ju. Spravochnik po analiticheskoi himii / Ju. Ju. Lur'e. – M.: Himija, 1971. – 420 s.

28. Ljahov A. I. Vlijanie vysushivaniya i smachivaniya, zamorazhivaniya i ottaivaniya na podvizhnost' fosfora i kalija v jerodirovannyh karbonatnyh chernozemah / A. I. Ljahov, N. S. Feshhenko // Bjul. VNII udobrenij i agropochvovedenija, 1984. – № 71. – S. 53–57.

29. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniju tjazhelyh metallov v pochvah sel'hozogodij i produkcii rastenievodstva (izdanie 2-oe). Min-vo s.–h. RF. – M.: CINAО, 1992. – 61 s. (sajt: <http://base.consultant.ru/>).

30. Makarov M. I. Vlijanie vysushivaniya obrazcov gorno-lugovyh al'pijskikh pochv na processy transformacii soedinenij azota i ugljeroda / M. I. Makarov, O. S. Muljakova, T. I. Malysheva, O. V. Menjajlo // Pochvovedenie. 2013. № 7. S. 850–859.

31. Murav'ev E. I. Vlijanie fosfo-gipsa na razvitie rastenij saharnoj svekly v stepnoj zone Krasnodarskogo kraja / E. I. Murav'ev, I. S. Beljuchenko, V. V. Gukalov, O. A. Mel'nik // *Jekol. Vestnik Sev. Kavkaza*. – 2008. – Т. 4. – № 4. – S. 112–114.
32. Nikiforenko L. I. Vlijanie vysushivaniya, hranenija i podgotovki k analizu pochvennyh obrazcov na pokazateli agrohimičeskich svojstv pochv / L. I. Nikiforenko // *Agrohimiya*. – 1987. – №3. – S. 109-126.
33. Opekunova M. G. Ocenka jekologičeskogo sostojanija pochv v rajone vozdejstvija gornorudnyh predpriyatij Juzhnogo Urala / M. G. Opekunova // *Resursnyj potencial pochv – osnova prodovol'stvennoj i jekologičeskoj bezopasnosti Rossii*. S-Pb.: 2011. – S. 440-442.
34. Plehanova I. O. Samoočishhenie agrodernovo-podzolistykh supeschanyh pochv vostočnogo Podmoskov'ja pri polijelementnom zagrjaznenii v rezul'tate primenenija osadkov stočnyh vod / I. O. Plehanova // *Pochvovedenie*. – 2009. – № 6. – S. 719-725.
35. Plehanova I.O. Transformacija soedinenij tjazhelyh metallov v pochvah pri uvlazhnenii / I. O. Plehanova // *Avtoref. diss. dokt. biol. nauk*. M.: MGU. 2008. – 49 s.
36. Regiony i goroda Rossii: integral'naja ocenka jekologičeskogo sostojanija / pod red. N. S. Kasimova. M.: Molodaja gvardija, 2015. – 661 s.
37. SanPiN 2.1.7.1287-03. Sanitarno-jepidemiologičeskie trebovanija k kachestvu pochvy.
38. Smagin A. V. Opredelenie osnovnoj gidrofizičeskoj harakteristiki pochv metodom centrifugirovanija / A. V. Smagin, N. B. Sadovnikova, Mizuri Maauia Ben-Ali // *Pochvovedenie*. – 1998. – №11. – S. 1362-1370.
39. Smagin A. V. Teorija i metody ocenki fizičeskogo sostojanija pochv / A. V. Smagin // *Pochvovedenie*. – 2003. – №3. – S. 328-341.
40. Smagin A. V. Pochvenno-gidrologičeskie konstanty: fizičeskij smysl i količestvennaja ocenka na baze ravnovesnogo centrifugirovanija / A. V. Smagin // *Doklady po jekologičeskomu pochvovedeniju*. – 2006. – Vyp. 1. – № 1. – S. 31-56.
41. Smagin A. V. Jekologičeskaja ocenka pochvennyh resursov i tehnologii ih vosproizvodstva (na primere g. Moskvy) / A. V. Smagin, S. A. Shoba, O. A. Makarov. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2008. – 360 s.
42. Smagin A. V. Teorija i praktika konstruirovanija pochv / A. V. Smagin. – M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2012. – 544 s.
43. Savchenko E. G. Vozdejstvie vysushivaniya i nagevanija pochv na podvizhnost' pitatel'nyh veshhestv / E. G. Savchenko // *Pochvovedenie*. – 2004. – № 3. – S. 322-331.
44. Hristenko A. A. Dinamika sodержanija podvizhnyh soedinenij fosfora v pochvah / A. A. Hristenko // *Agrohimiya*. – 2001. – №10. – S. 16-22.
45. Shihova L. N. Soderžanie i dinamika tjazhelyh metallov v pochvah Severo-Vostoka Evropejskoj časti Rossii / L. N. Shihova. – Avtoref. diss. dokt. s/h n. S.-Peterburg. – 2005. – 46 s.
46. Jekologičeskie funkcii gorodskih pochv. M.: Madzhenta, 2004. – 228 s.
47. Jakovlev A. S. Upravlenie kachestvom gorodskih pochv / A. S. Jakovlev, T. V. Reshetina, A. P. Sizov i dr. – M.: MAKS Press, 2010. – 96 s.
48. Barlett R. J. Studing dried, stored, soil samples - some pitfalls / R. J. Barlett, B. R. James // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. – V.44. – P. 721-724.
49. Buondonno A. Titratable acidity of organo-mineral complexes as affected by mode of preparation, drying and stability of aggregates / A. Buondonno, A. Violante // *Canad. Journal of Soil Sci.* – 1991. – V. 71. – №3. – P. 285-291.
50. Filgueiras A. V. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental soil samples / A. V. Filgueiras, I. Lavilla, C. Bendicho // *J. Environmental Monitoring*, 2002. – V. 4. – P. 823–850.
51. Harris M. M. Effects of Microwave Drying on Exchangeable Cations in Forest Soils / M. M. Harris, L. O. Safford // *Soil Science*. – 1994. – V. 157. – №4. – P. 232-237.
52. <http://mosecom.ru/> (sajt GPBU Mosjekomonitoring)
53. Magiera T. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia industrial region, Poland / T. Magiera, Z. Strzyszcz, M. Rachwal // *Forest Ecol. Manag.* – 2007. – V. 248. – P. 36–42.
54. Payne G. G. Influence of various drying techniques on the extractability of plant nutrients from selected Florida soils / G. G. Payne, J. E. Rechcigl // *Soil Science*. – 1989. – № 4. – P. 275–283.
55. Tome J. B. Microwave oven-drying of soil samples for chemical testing in Brazil / J. B. Tome // *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* – 1995. – V. 26. – №3&4. – P. 515–529.
56. Williams R. D. Locating soil boundaries using magnetic susceptibility / R. D. Williams, J. R. Cooper // *Soil Sci.* – 1990. – V. 150. – P. 889–895.

