

ИНДЕКС ФОРМ ГУМУСА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2016 г. И. Н. Коркина, Е. Л. Воробейчик

Институт экологии растений и животных УрО РАН, 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

e-mail: korkina@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 05.05.2016 г.

Для условий южной тайги Среднего Урала апробирована Европейская морфофункциональная классификация форм гумуса, базирующаяся на детальном описании морфологии органогенных горизонтов. По мере приближения к Среднеуральскому медеплавильному заводу в елово-пихтовых лесах зоогенные формы мюль-типа сменяются незоогенными формами мор-типа. Смещение спектра форм гумуса в градиенте загрязнения четко сопряжено с увеличением мощности (запаса) лесной подстилки и снижением обилия крупных почвенных сапрофагов. Высокая информативность и малая трудоемкость измерений по сравнению с другими методами оценки биологической активности почвы позволяет рекомендовать индекс форм гумуса (порядковый номер формы в их упорядоченном общем перечне) в качестве инструмента для экологического мониторинга и оценки состояния среды.

Ключевые слова: деструкция органического вещества, формы гумуса, почва, лесная подстилка, почвенная фауна, дождевые черви, промышленное загрязнение, тяжелые металлы, медеплавильный завод, Средний Урал.

DOI: 10.7868/S0367059716060081

Представление о трех типах гумуса (мюль, модер, мор) восходит к работам П.Е. Мюллера второй половины XIX в., выделявшего их по морфологии органогенных горизонтов, отражающей активность разных групп почвенной биоты. В России развитие получили классификации лесных подстилок – только одной части системы лесного гумуса. В их основу положены разные критерии, например морфологические (Сапожников, 1984) или морфогенетические (Богатырев и др., 2004). Однако недостаточная операциональность диагностических признаков и отсутствие единой обобщающей схемы ограничивают их широкое применение. Заметим, что в русскоязычной литературе термин “гумус” чаще всего используют более узко (для совокупности органических соединений, исследуемых химическими методами), а морфологические типы гумуса, включающие как собственно гумусовые вещества, так и растительные остатки на разных стадиях деструкции, рассматривают реже (Чертов и др., 2007).

Диагностика типов гумуса долгое время также оставалась плохо формализованной, а разные национальные школы расходились в терминологии и принципах классификации. Новый импульс старая идея получила с появлением Европейской морфофункциональной классификации форм гумуса (Zanella et al., 2011a), основанной на детальном описании морфологии органогенных гори-

зонтов. Система построена на двух уровнях: на первом формы гумуса выделяют по признакам гидроморфизма почв, на втором – по признакам, отражающим их биологическую активность.

В ряду основных типов гумуса мюль → модер → мор снижаются активность почвенных беспозвоночных в переработке растительных остатков, средняя скорость разложения опада и запас питательных элементов в почве, смещается локализация преимущественного накопления углерода (от органоминеральных горизонтов к подстилке). Основную роль в формировании форм мюль-типа играют эндо- и эпигейные виды дождевых червей, модер-типа – эпигейные виды червей, энхитреиды и микроартроподы, а также грибы. Мор-тип формируется при отсутствии крупных сапрофагов, а основная роль в разложении опада принадлежит почвенным грибам. Формы гумуса можно диагностировать по характеру фрагментации опада, изменению его цвета, наличию, размеру и форме экскрементов беспозвоночных, оструктуренности органогенных горизонтов и другим признакам.

Для прикладного использования классификации предложен индекс форм гумуса (Humus index), представляющий собой порядковый номер формы в их упорядоченном общем перечне. Индекс позволяет перевести описательную (качественную) информацию о формах гумуса в коли-

чественную (порядковую) шкалу (Ponge, Chevalier, 2006). На примере изучения восстановления леса после рубок было показано, что индекс тесно связан с морфологическими (мощность и цвет гумусового горизонта) и химическими (кислотность, содержание обменных оснований, органического углерода и общего азота) свойствами почв, а также с продуктивностью и разнообразием растительности (Ponge et al., 2002; Ponge, 2003; Ponge, Chevalier, 2006). Исходя из этого было предложено использовать индекс как относительно быстрый способ оценки состояния экосистем.

Загрязнение выбросами металлургических предприятий часто имеет драматические последствия для почвы и почвенной биоты. Поэтому логично предположить, что под действием загрязнения индекс форм гумуса также будет сильно и закономерно изменяться. Если это так, то этот показатель достоин включения в арсенал методов экологического мониторинга.

Хотя хорошо известно, что загрязнение тяжелыми металлами и/или кислотными выпадениями тормозит деструкцию органического вещества (Freedman, Hutchinson, 1980; Воробейчик, 1991; Воробейчик, Пищулин, 2011), в том числе приводит к увеличению мощности лесной подстилки (Strojan, 1978; Coughtrey et al., 1979; Воробейчик, 1995), информация о смене форм гумуса в условиях загрязнения фрагментарна и противоречива. Одни авторы отмечали отсутствие изменений форм гумуса (Belotti, Babel, 1993), даже при исчезновении дождевых червей (Dijkstra, 1998), другие наблюдали такую смену (Gillet, Ponge, 2002; Filzek et al., 2004). Это обуславливает необходимость дальнейшего накопления информации о влиянии загрязнения на формы гумуса.

Удобным экспериментальным полигоном для апробации и “калибровки” индекса может быть импактный регион, где хорошо выражен градиент загрязнения от точечного источника выбросов (Воробейчик, Козлов, 2012). Территорию возле Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) можно отнести к таким полигонам: загрязнение очень сильное (возле завода фоновые концентрации металлов превышены на два порядка, кислотность увеличена на единицу pH), реакции почвенной биоты очень контрастные (по мере приближения к заводу исчезает несколько ключевых групп) (см. табл. 2). Кроме того, для этого полигона достаточно много информации о реакции на загрязнение почвы (Кайгородова, Воробейчик, 1996; Мещеряков, Прокопович, 2003), лесной подстилки (Воробейчик, 1995), почвенной фауны (Воробейчик и др., 2007, 2012; Кузнецова, 2009) и микрофлоры (Воробейчик, 1991; Воробейчик, Пищулин, 2011; Сморгалов, Воробейчик, 2016; Mikryukov et al., 2015).

Цель нашей работы – анализ изменения форм гумуса в градиенте загрязнения выбросами медеплавильного завода. Проверяемая гипотеза заключается в предположении перехода по мере приближения к источнику выбросов форм мюль-типа к мор-типу. Также обсуждаются перспективы использования индекса форм гумуса как интегрального индикатора активности почвенной биоты на загрязненных территориях, сравнивая его с другими показателями. Заметим, что хотя Европейская классификация прошла проверку в широком диапазоне природных условий Европы (Zanella et al., 2011a), для гарантии ее валидности каждый раз необходима апробация в новых районах. Насколько нам известно, в России индекс форм гумуса ранее не использовался.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район воздействия СУМЗа (г. Ревда, 50 км к западу от г. Екатеринбург) расположен в южной тайге. До недавнего времени СУМЗ был одним из крупнейших источников атмосферного загрязнения в России. В 1980-х годах его выбросы достигали 150–225 тыс. т поллютантов в год; основные компоненты – SO₂ и тяжелые металлы (Cu, Pb, Zn, Cd, Hg и др.). Хотя к настоящему времени выбросы почти прекратились, вблизи завода сохраняется угнетенное состояние растительности (Воробейчик и др., 2014) и почвенной фауны (Воробейчик, Нестеркова, 2015).

Работы проведены в ельниках-пихтарниках в импактной (на удалении 1 и 2 км к западу от завода), буферной (4 и 7 км) и фоновой (30 км) зонах загрязнения. На этих участках сформированы дерново-подзолистые почвы и буроземы оподзоленные тяжелосуглинистые. Почвенные прикопы глубиной около 20 см (по 3–8 на удаление, всего 28) закладывали случайным образом, включая приствольные участки и места с педотурбациями. Расстояние между прикопами в пределах удаления в среднем составляло 100–200 м.

Диагностику форм гумуса проводили в полевых условиях согласно Европейской реферативной базе форм гумуса (Zanella et al., 2011b). Основные диагностические признаки: 1) стратификация на горизонты по доле слаборазложившихся растительных остатков (органические горизонты OL, OF, OH, формирующие лесную подстилку) или общему содержанию органического вещества (маркирует нижнюю границу подстилки); 2) тип трансформации опада (зоогенный или незоогенный); 3) размер области перехода между подстилкой и органоминеральным горизонтом; 4) структура органоминеральных горизонтов (оструктуренные горизонты по размеру зернистых и комковатых агрегатов считают биомикро-, биомезо- или биомикро-структурированными, а неоструктуренные – либо рыхлосвязанными, либо массивными незоогенны-

ми). Формам гумуса были присвоены следующие индексы: Eumull – 1, Mesomull – 2, Oligomull – 3, Dysmull – 4, Hemimoder – 5, Eumoder – 6, Dysmoder – 7, Hemimor – 8, Humimor – 9, Eumor – 10, Hydromor – 10 (аналог Eumor для гидроморфных форм).

Зоны загрязнения сравнивали по критерию Краскела-Уоллиса. Величину эффекта (разница между импактной и фоновой зонами) оценивали параметром Клиффа (степень совпадения двух частотных распределений; равен нулю при полном совпадении и ± 1 – при полном несовпадении). Для сравнения с другими показателями (данные для расчета извлечены из исходных публикаций) рассчитанную для них величину эффекта по Коэну конвертировали в параметр Клиффа (Rogmann, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В градиенте загрязнения формы гумуса меняются от мюль-типа (форма Mesomull) до мор-типа (Eumor), т.е. представлен весь спектр вариантов в ряду биологической активности почвы (за исключением самой зоогенной формы Eumull) (табл. 1). Спектры форм импактной и фоновой зон не пересекаются, различия индексов между зонами значимы ($H(2, n = 28) = 21.3, p < 0.0001$).

В фоновой зоне превалируют формы мюль-типа, характеризующиеся быстрым разложением опада при участии крупных сапрофагов, вовлечением частично гумифицированного органического вещества в состав агрегатов органоминерального горизонта, зоогенная структура которого хорошо выражена. В более увлажненных участках встречается близкая к мюль-типу форма Hemimoder. В 7 км от завода найдено большое разнообразие форм гумуса – от зоогенных форм мюль-типа до низко активной формы мор-типа. По мере приближения к заводу формы мюль- и модер-типов полностью исчезают. На удалении 4 км обнаружена только форма мор-типа Humimor, в которой признаки зоогенной трансформации опада проявляются лишь в нижней части подстилки.

Формы гумуса импактной зоны также относятся к мор-типу, причем преобладает крайний вариант (Eumor), характеризующийся накоплением слабо разложившихся растительных остатков, отсутствием их зоогенной трансформации и признаков зоогенной структуры в органоминеральном горизонте. Более того, здесь присутствуют гидроформы гумуса (Hydromor), характерные для переувлажненных почв, хотя по особенностям рельефа их нельзя было ожидать на этой территории. Другими словами, различия импактной и фоновой зон столь велики, что затрагивают даже первый уровень классификации, выделяемый

по признакам гидроморфизма. Возможные причины нарушения гидрологического режима загрязненной территории, вызвавшие активизацию оглеения почв, обсуждались ранее (Кайгородова, Воробейчик, 1996).

Хотя переход от одной формы гумуса к другой подразумевает смену всего комплекса деструкторов, ключевую роль в их дифференциации играют крупные сапрофаги. Резкое падение численности дождевых червей и энхитреид на расстоянии 4 км от завода (Воробейчик и др., 2007, 2012) совпадает с исчезновением в этой зоне мюль- и модер-типов, а их элиминация в импактной зоне – с достижением индексом максимальных значений, свидетельствующих о крайне низкой биологической активности почвы (табл. 2). Увеличение индекса по мере приближения к заводу четко совпадает с ростом мощности и запаса лесной подстилки, снижением трофической активности почвенных сапрофагов и показателей функционирования почвенной микрофлоры (скорость деструкции целлюлозы, удельная дыхательная активность подстилки). Таким образом, можно констатировать четкую сопряженность изменения в градиенте загрязнения индекса форм гумуса и других параметров сапротрофного комплекса почвенной биоты.

В буферной (4 км) и импактной (2 км) зонах в нескольких случаях была отмечена несогласованность признаков в сопряженных горизонтах (см. табл. 1). Так, строение органических горизонтов свидетельствовало о принадлежности к форме Humimor, тогда как органоминеральный горизонт по форме агрегатов был биомезоструктурирован, что не характерно для мор-типа. В таких случаях определяющим для диагностики мы принимали признаки органических горизонтов и характер перехода между подстилкой и органоминеральным горизонтом. На наш взгляд, наличие в одном профиле диагностических признаков разных форм гумуса может быть связано с неодинаковым временем формирования и стирания свойств после изменения внешних условий. При загрязнении подстилка трансформируется относительно быстро, а почвенные агрегаты в органоминеральном горизонте стабильны и сохраняют свою форму длительное время, выступая свидетельством прежней активности почвенной фауны. В импактной зоне почвы трансформированы более глубоко: органоминеральный горизонт теряет структуру, что полностью соответствует мор-типу.

По информативности (оцениваемой по величине эффекта) индекс форм гумуса несколько не уступает другим способам оценки биологической активности почвы, а даже их превосходит (см. табл. 2, во всех случаях доверительный интервал величин эффекта не включал ноль). По сравнению с другими методами почвенной биологии диагностика форм гумуса малозатратна, поскольку

Таблица 1. Формы гумуса лесных почв в разных зонах загрязнения

Удаление от завода, км	Последовательность горизонтов (мощность, см)		О/А, мм	Форма гумуса (индекс)
	органические	органо-минеральные		
Фоновая зона				
30	OL(1)	meA(9)	3–5	Mesomull (2)
30	OL(1–2)/OFzo(disc)	meA(6)	<3	Oligomull (3)
30	OL(2)/OFzo(disc)	meA(8)	<3	Oligomull (3)
30	OL(0.5)/OFzo(1.5)	meA(8)	3–5	Dysmull (4)
30	OL(0.5–1)/OH(1–2)	meA(8)	>5	Hemimoder (5)
30	OL(2)/OH(2)	meA(6–8)	>5	Hemimoder (5)
Буферная зона				
7	OL(0.5)/OFzo(1)	miA(1.5)/meA(6)	3–5	Dysmull (4)
7	OL(0.5)/OFzo(1)/OH(1.5)	miA(1)/meA(8)	3–5	Dysmoder (7)
7	OL(1)/ OFnzo(disc) /OFzo(1)/OH(disc–2)	miA(6–8)	>5	Dysmoder (7)
7	OL(1)/OFnzo(1)/OFzo(1)	miA(1)/ meA(6)	3–5	Hemimor (8)
7	OL(1)/OFnzo(2)/OFzo(disc)	miA(1)/ meA(8)	<3	Humimor (9)
4	OL(0.5–1)/OFnzo(4)/OFzo(disc)	meA(6) + msA	<3	Humimor (9)
4	OL(2)/OFnzo(2)/OFzo(1)	meA(6) + msA	<3	Humimor (9)
4	OL(2)/OFnzo(2)/OFzo(2–disc)	meA(3) + msA	<3	Humimor (9)
4	OL(1)/OFnzo(4)/OFzo(1)	msA(5) + meA	<3	Humimor (9)
4	OL(1)/OFnzo(2)/OFzo(1)/OH(1)	meA(6) + msA	<3	Humimor (9)
4	OL(1)/OFnzo(2.5–3)/OH(0.5–1)	meA(6) + miA	>5	Humimor (9)
4	OL(2)/OFnzo(2)/OFzo(1)/OHdisc	meA(7)	<3	Humimor (9)
4	OL(1)/OFnzo(2)/OFzo(1)	meA(7)	<3	Humimor (9)
Импактная зона				
2	OL(4)/OFnzo(0.5–2)/OH(0.5)	meA(5) + msAg	<3	Humimor (9)
2	OL(0.5)/OFnzo(2.5)/OFzo(disc)/OH(1)	meA(6)	<3	Humimor (9)
2	[OL(7)]	miA(6) + msA	<3	Eumor (10)
2	[OL(13)]/[OFnzo(1)]	meA(disc) /msAg(6)	<3	Eumor (10)
2	OL(1)/OFnzo(1)/OHg(1)	msAg(6)	<3	Eumor (10)
2	OL(1)/OFnzo(3)	meAg(2) + msA	<3	Eumor (10)
1	OFnzo(2)	msAg(4)	<3	Eumor (10)
1	OL(1)/OFnzo(3.5)/OHg(1)	msAg(3) + miA	3–5	Hydromor (10)
1	OL(0.5)/OFnzo(2.5)/OHg(2)	msAg(8) + miA	<3	Hydromor (10)

Примечание. О/А – размер области перехода между органическим (О) и органоминеральным (А) горизонтами; признаки зоогенной трансформации растительных остатков: zo – есть, pzo – нет; disc – не образует сплошного слоя; me – биомезоструктурированный, mi – биомикроструктурированный, ms – массивный; [] – погребенный под моховой подушкой слой; “+” – сочетание разной структуры в пределах одного горизонта (на первом месте стоит преобладающая по занимаемому объему структура); g – гидроморфные признаки (в горизонте А – оглеенность). Жирным шрифтом отмечены признаки, которые не соответствуют выделенной форме гумуса.

Таблица 2. Параметры почвенной биоты и некоторые свойства почв в ельниках-пихтарниках в разных зонах загрязнения

Параметр (год регистрации)	Зона загрязнения (удаление от завода, км)				Величина эффекта				Источник информации
	фоно- вая (20–30)	буфер- ная (6–7)	буфер- ная (4–5)	импакт- ная (1–3)	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>CI_L</i>	<i>CI_U</i>	
Концентрация Си в подстилке, мкг/г (2004)	44.6	561.4	1153.9	2808.6	4/4	1.00	0.82	1.00	Воробейчик и др., 2012
pH _{водный} подстилки (2004)	5.6	5.2	4.9	4.6	4/4	–1.00	–1.00	–0.78	Воробейчик и др., 2012
Индекс форм гумуса (2015)	3	7	9	10	6/9	1.00	0.12	1.00	Настоящая работа
Численность, экз/м ² :									
дождевых червей (2004)	261	212	39	0	5/5	–0.96	–1.00	–0.45	Воробейчик и др., 2007
энхитреид (2004)	168	125	30	0	5/5	–0.99	–1.00	–0.64	Воробейчик и др., 2007
коллембол (2002–2004)	35 333	41177	59624	12376	9/9	–0.94	–1.00	–0.63	Кузнецова, 2009
Трофическая активность сапрофагов, %/15 дней (bait-lamina test) (2006)	42.5	–	11.2	6.7	15/15	–1.00	–1.00	–0.99	Воробейчик и др., 2007
Мощность подстилки, см (1990)	2.0	2.9	5.3	5.2	5/12	1.00	0.98	1.00	Воробейчик, 1995
Запас подстилки, кг/м ² (2003)	1.4	–	3.6	7.2	10/10	1.00	0.98	1.00	Воробейчик, Пищулин, 2009
Скорость деструкции целлюлозы, %/день (2005)	0.53	–	0.37	0.25	15/15	–0.83	–0.96	–0.54	Воробейчик, Пищулин, 2011
Удельная дыхательная активность подстилки, мг СО ₂ /г/час (2011–2013)	0.20	0.10	0.14	0.05	9/9	–0.90	–0.99	–0.52	Сморкалов, Воробейчик, 2016

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных. Для индекса форм гумуса приведена медиана (для фоновой зоны – левая медиана), для остальных параметров – среднее арифметическое; *N* – количество повторностей (пробных площадей) в фоновой (числитель) и импактной (знаменатель) зонах, *D* – параметр Клиффа, *CI_L* и *CI_U* – нижняя и верхняя границы 95%-ного доверительного интервала для *D*.

ку не требует ни дорогостоящего оборудования (как при измерении почвенного дыхания), ни расходных материалов (как при измерении скорости деструкции или трофической активности сапрофагов). По трудоемкости (не более 30–40 мин на один прикол в полевых условиях, в ряде случаев – с дополнительными лабораторными измерениями pH и органического углерода) она не идет ни в какое сравнение, например, с ручной разборкой почвенных монолитов для определения численности почвенной мезофауны. В силу “автоматического” усреднения во времени индекс форм гумуса – значительно более надежная оценка по сравнению с одномоментно измеряемой численностью почвенных беспозвоночных или подверженной мешающим влияниям мощностью лесной подстилки.

Некоторую сложность может представлять то, что индекс измеряется в порядковой шкале, од-

нако подбор корректных методов анализа данных позволяет ее легко преодолеть. Так, для характеристики средней тенденции следует использовать медиану (а не среднее арифметическое), для оценки варьирования – размах (а не среднеквадратическое отклонение), для анализа связи – коэффициент Кендалла (а не Пирсона) и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная для условий Западной Европы классификация форм гумуса вполне применима для лесных почв географически удаленного Среднего Урала, что существенно расширяет потенциальную сферу ее применения. Наша исходная гипотеза полностью подтвердилась: загрязнение почвы тяжелыми металлами сильно влияет на состояние органического вещества, смещая спектр форм гумуса от зоогенного мюль-типа к незоогенному мор-типу. Основной причиной такого

смещения следует считать снижение роли в переработке растительного опада крупных почвенных сапрофагов (в первую очередь дождевых червей).

Хотя явно необходима более широкая апробация индекса форм гумуса на разнообразном наборе ситуаций (разные биотопы, почвы, пространственные масштабы, типы загрязнения), уже сейчас можно рекомендовать его в силу высокой информативности и малой трудоемкости измерения в качестве инструмента для оценки состояния почвенной биоты в условиях промышленного загрязнения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-05-00686) и Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-12-4-26). Мы признательны к.б.н. В.С. Микрюкову за помощь в анализе данных, д.б.н. А.В. Тиуну и к.б.н. С.Ю. Кайгородовой — за полезные комментарии к тексту рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богатырев Л.Г., Демин В.В., Матышак Г.В., Сапожникова В.А.* О некоторых аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение. 2004. С. 17–29.
- Воробейчик Е.Л.* Изменение интенсивности деструкции целлюлозы под воздействием техногенной нагрузки // Экология. 1991. № 6. С. 73–76.
- Воробейчик Е.Л.* Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения // Экология. 1995. № 4. С. 278–284. [*Vorobeichik E.L.* Changes in thickness of forest litter under chemical pollution // *Rus. J. Ecol.* 1995. V. 26. № 4. P. 252–258.]
- Воробейчик Е.Л., Ермаков А.И., Гребенников М.Е.* и др. Реакция почвенной мезофауны на выбросы Среднеуральского медеплавильного комбината // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель. Екатеринбург, 2007. С. 128–148.
- Воробейчик Е.Л., Ермаков А.И., Золотарев М.П., Тунева Т.К.* Изменение разнообразия почвенной мезофауны в градиенте промышленного загрязнения // *Rus. Entomol. J.* 2012. V. 21. № 2. С. 203–218.
- Воробейчик Е.Л., Козлов М.В.* Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: методология исследований, экспериментальные схемы, распространенные ошибки // Экология. 2012. № 2. С. 83–91. [*Vorobeichik E.L., Kozlov M.V.* Impact of point polluters on terrestrial ecosystems: Methodology of research, experimental design, and typical errors // *Rus. J. Ecol.* 2012. V. 43. № 2. P. 89–96.]
- Воробейчик Е.Л., Нестеркова Д.В.* Техногенная граница распространения крога в районе воздействия медеплавильного завода: смещение в период сокращения выбросов // Экология. 2015. № 4. С. 308–312. [*Vorobeichik E.L., Nesterkova D.V.* Technogenic boundary of the mole distribution in the region of copper smelter impacts: Shift after reduction of emissions // *Rus. J. Ecol.* 2015. V. 46. № 4. P. 377–380.]
- Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г.* Влияние отдельных деревьев на pH и содержание тяжелых металлов в лесной подстилке в условиях промышленного загрязнения // Почвоведение. 2009. № 8. С. 927–937. [*Vorobeichik E.L., Pishchulin P.G.* Effect of individual trees on the pH and the content of heavy metals in forest litters upon industrial contamination // *Eurasian Soil Sci.* 2009. V. 42. № 8. P. 861–873.]
- Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г.* Влияние деревьев на скорость деструкции целлюлозы в почвах в условиях промышленного загрязнения // Почвоведение. 2011. № 5. С. 597–610. [*Vorobeichik E.L., Pishchulin P.G.* Effect of trees on the decomposition rate of cellulose in soils under industrial pollution // *Eurasian Soil Sci.* 2011. V. 44. № 5. P. 547–560.]
- Воробейчик Е.Л., Трубина М.Р., Хантемирова Е.В., Бергман И.Е.* Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448–458. [*Vorobeichik E.L., Trubina M.R., Khantemirova E.V., Bergman I.E.* Long-term dynamic of forest vegetation after reduction of copper smelter emissions // *Rus. J. Ecol.* 2014. V. 45. № 6. P. 498–507.]
- Кайгородова С.Ю., Воробейчик Е.Л.* Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Экология. 1996. № 3. С. 187–193. [*Kaigorodova S.Y., Vorobeichik E.L.* Changes in certain properties of grey forest soil polluted with emissions from a copper-smelting plant // *Rus. J. Ecol.* 1996. V. 27. № 3. P. 177–183.]
- Кузнецова Н.А.* Население почвообитающих коллембол в градиенте загрязнения хвойных лесов выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // Экология. 2009. № 6. С. 439–448. [*Kuznetsova N.A.* Soil-dwelling Collembola in coniferous forests along the gradient of pollution with emissions from the Middle Ural copper smelter // *Rus. J. Ecology.* 2009. V. 40. № 6. P. 415–423.]
- Мещеряков П.В., Прокопович Е.В.* Экологические условия формирования гумусовых веществ в зоне влияния СУМЗа // Экология. 2003. № 4. С. 314–317. [*Meshcheryakov P.V., Prokopovich E.V.* Ecological conditions of humic substances formation in the impact zone of the Middle Ural copper-smelting plant // *Rus. J. Ecology.* 2003. V. 34. № 4. P. 277–280.]
- Сапожников А.П.* Лесная подстилка — номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 5. С. 96–105.
- Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л.* Механизм стабильности эмиссии CO₂ из лесной подстилки в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 2016. № 1. С. 34–43.
- Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А.* и др. Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 96 с.
- Betotti E., Babel U.* Variability in space and time and redundancy as stabilizing principles of forest humus profiles // *Eur. J. Soil Biology.* 1993. V. 29. P. 17–27.
- Coughtrey P., Jones C., Martin M., Shales S.* Litter accumulation in woodlands contaminated by Pb, Zn, Cd and Cu // *Oecologia.* 1979. V. 39. P. 51–60.
- Freedman B., Hutchinson T.C.* Effects of smelter pollutants on forest leaf litter decomposition near a nickel-copper smelter at Sudbury, Ontario // *Can. J. Bot.* 1980. V. 58. № 15. P. 1722–1736.

- Dijkstra E.* A micromorphological study on the development of humus profiles in heavy metal polluted and non-polluted forest soils under Scots pine // *Geoderma*. 1998. V. 82. P. 341–358.
- Filzek P., Spurgeon D., Broll G.* et al. Pedological characterization of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works // *Ecotoxicology*. 2004. V. 13. P. 725–737.
- Gillet S., Ponge J.F.* Humus forms and metal pollution in soil // *Eur. J. Soil Sci.* 2002. V. 53(4). P. 529–539
- Mikryukov V.S., Dulya O.V., Vorobeichik E.L.* Diversity and spatial structure of soil fungi and arbuscular mycorrhizal fungi in forest litter contaminated with copper smelter emissions // *Water Air Soil Pollut.* 2015. V. 226. N 4. Article 114. P.1–14.
- Ponge J.F.* Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity // *Soil Biol. Biochem.* 2003. V. 35. P. 935–945.
- Ponge J.F., Chevalier R.* Humus Index as an indicator of forest stand and soil properties // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 233. P. 165–175.
- Ponge J.F., Chevalier R., Lousot P.* Humus Index: an integrated tool for the assessment of forest floor and topsoil properties // *Soil Sci. Soc. America J.* 2002. V. 66(6). P. 1996–2001.
- Rogmann J.J.* Ordinal Dominance Statistics (orddom): An R Project for Statistical Computing package to compute ordinal, nonparametric alternatives to mean comparison (Vers.3.1). 2013. <http://cran.r-project.org/>
- Strojan C.L.* Forest leaf litter decomposition in the vicinity of a zinc smelter // *Oecologia*. 1978. V. 32. P. 203–212.
- Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F.* et al. European morpho-functional classification of humus forms // *Geoderma*. 2011a. V. 164. P. 138–145.
- Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F.* et al. European Humus Forms Reference Base. 2011b. P. 1–56. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00541496v2>