

турбированию, перемещению или сформированы при участии насыпных слоев. Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в средних слоях профилей урбиквазисемов связано с различным возрастом их техногенных горизонтов. Даже на фоновых территориях стратифицированные и погребенные почвенные горизонты, которые ранее располагались на поверхности почвы, могут содержать пул  $^{137}\text{Cs}$ , поступавший в составе глобальных радиоактивных выпадений в предшествующие периоды, начиная с 1950-х годов. При этом поверхностные горизонты урбиквазисемов, сформированные в последние десятилетия, загрязнены этим радионуклидом в гораздо меньшей степени.

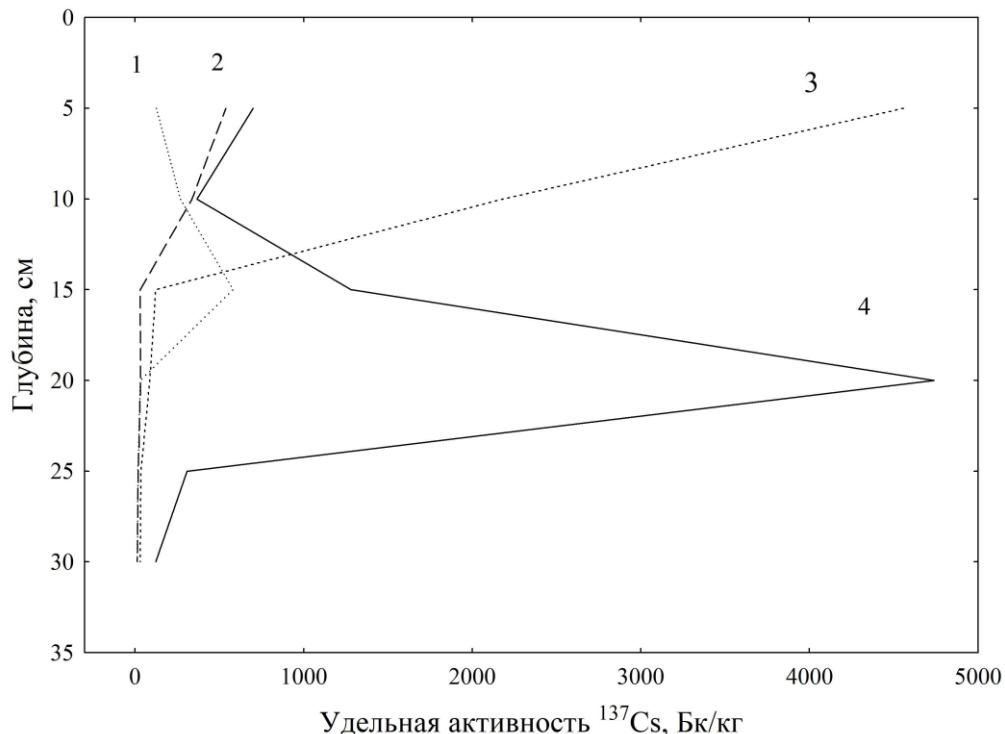


Рисунок. Распределение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в профилях почв урбоэкосистем: слабозагрязненных (№ 1, № 2), сильнозагрязненных (№ 3, № 4).

Таким образом, широкие диапазоны варьирования удельных активностей естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$ , выявленные в отдельных почвенных профилях, необходимо учитывать при планировании пробоотбора и проведении радиационных исследований в техногенных и урболандштафах. Распределение  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в профилях техно- и урбо-почв определяется не только литогенными и педогенными факторами, но и уровнями удельной активности этих ЕРН в техногенных материалах и включениях, выделенных в горизонтах UR, TCH. Радионуклид  $^{137}\text{Cs}$ , поступавший в составе глобальных и чернобыльских аэробиогенных выпадений на поверхность почв в различные годы, может трассировать погребенные горизонты в профилях техно- и урбо-почв с целью определения возраста их антропогенной трансформации при реконструкции ландшафтов.

УДК 631.482+631.483

ПРИРОДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ СТЕПНЫХ ПОЧВ

Лисецкий Ф.Н., Хуан Л.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород,  
e-mail: [liset@bsuedu.ru](mailto:liset@bsuedu.ru); [lhhuang0@163.com](mailto:lhhuang0@163.com)

Такие сопряженные типы почвенно-деградационных процессов, как агрофизическая и физико-химическая деградации, приводящие к снижению почвенного плодородия, обусловливают увеличение темпов эрозионно-дефляционных процессов, приводящих к

дегумусированию, деструктуризации и потере почвы. К ключевым индикаторам структурного состояния агропочв можно отнести соотношение агрегатов с определением агрономически ценной части, водоустойчивость почвенной структуры, а также пористость и механическая прочность агрегатов. Для оценки результатов длительной механической обработки агропочв проводится определение степени деструктуризации (деагрегации) по величине коэффициента структурности с выделением доли агрономически ценных структурных отдельностей (обычно 1-10 мм). Однако с точки зрения устойчивости к деградации физических свойств не все компоненты этой группы сформированы благодаря процессу стойкого физико-химического закрепления коллоидов, что можно установить, определяя водопрочность структуры. Под воздействием механической обработки пахотных почв происходит разрушение микроструктуры, что отражается в увеличении доли фракции менее 0,25 мм в 3-4 раза при мокром просеивании по сравнению с рассевом структурных отдельностей на ситах. Среди факторов, которые обусловливают формирование водоустойчивости структуры, помимо гранулометрического и минералогического состава почв, не меньшим влиянием характеризуется количество и качество почвенного органического вещества (ПОВ). Понимание механизмов сопряженного формирования водоустойчивой структуры и ПОВ в режиме ренатурирования постагрогенных почв и в эталонных (целинных) условиях может послужить научной основой оценки эффективности природоподобных почвовосстанавливающих агротехнологий для ситуаций, диагностирующих плохое или удовлетворительное состояние пахотного (посевного) слоя по содержанию водоустойчивых агрегатов (менее 30 % или 30-50 % соответственно).

Цель работы состояла в сравнительном анализе онтогенетических различных почв по их гумусному состоянию и водоустойчивости агрегатов с привлечением биогеохимических данных, определяющих эффективность механизмов структурообразования.

В целях сравнительного анализа физико-химических различий почв (по структуре, гумусному состоянию, биогеохимическому составу) в идентичных биоклиматических условиях было выбрано три почвенных объекта: 1) достоверно целинная почва (полноголоценовый эталон); 2) позднеголоценовая почва на культурном слое; 3) старозалежная почва со зрелой формацией ковыля.

Район исследования входит в состав Керченского гребне-сопочного степного ландшафта, который развивался в условиях засушливого климата (со среднегодовыми показателями суммы осадков 375-385 мм и температуры воздуха 10,4-11,0 °C) при коэффициенте увлажнения, равным 0,50, что определило формирование петрофитных разнотравно-злаковых степей на короткопрофильных щебнистых почвах чернозёмного типа.

Местоположение целинной почвы (Р. 1) у западной оконечности высокого (30 м) берега бухты Рифов Азовского моря обусловлено невозможностью сельскохозяйственного (кроме выпаса) освоения земель на узком гребне с близким залеганием и частичным выходом на поверхность известняков мэотического яруса неогена. Результатом длительного непрерывного педогенеза стало формирование карболитозёма тёмногумусового (дерново-карбонатной почвы) на маломощным элювием известняка под злаково-крымскопольинной ассоциацией.

Новообразованная среднесуглинистая почва (в 150 м от Р. 1) сформировалась над погребальной камерой, входившей в состав некрополя с погребениями в каменных ящиках, и имела мощность горизонта A 32 см, а общую мощность гумусового горизонта 48 см. Судя по разработанной автором региональной модели зависимости мощности гумусового горизонта в биоклиматических условиях распространения южных чернозёмов от времени, морфологической зрелости почвы с такими параметрами соответствует начало педогенеза, соотносимое с финальным этапом эпохи поздней бронзы.

В 5 км от Р. 1 на степном плато восточного берега оз. Чокрак с ковылем волосовидным (*Stipa capillata* L.) высотой до 95 см определена постагрогенная почва, которая по данным ДЗЗ в 80-х гг. XX в. эпизодически вовлекалась в пашню, а ее почвообразующей породой

выступают рыхлые донные отложения светло-коричневого цвета (10 YR 6/3) с содержанием 40 % оксидов кальция (верхний ярус карангатской морской террасы). Содержание макро- и микроэлементов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа в порошковых пробах. Величины качества почв ( $SQ_9$ ) и интегрального показателя концентрации тяжелых металлов и металлоидов ( $TMM_7$ ) были рассчитаны как среднее геометрическое значение. Оценку величины  $SQ_9$  определяли элементы биологического накопления (P, K, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu), а также металлы, которые (наряду с железом) играют значительную роль в образовании органоминеральных соединений (Ca, Al). Формула расчета  $TMM_7$  имела вид:  $TMM_7 = (V \times Cr \times Co \times As \times Sr \times Pb \times Ba)^{1/7}$ . Коэффициент элювирования (Кэл) отражает соотношение концентрации кремнезема к сумме оксидов натрия, калия, магния и кальция. Коэффициент подвижности (Кп) был адаптирован к условиям региона и рассчитывали по соотношению суммы содержания натрия, калия, магния и цинка к содержанию кремнезема. Для получения структурных отдельностей в диапазоне от 2 до 7 мм (2-3,15; 3,15-5; 5-7 мм) воздушно-сухая почва подвергали рассеву на ситах от компании *Fritsch GmbH* с квадратными ячейками. Устойчивость агрегатов к разрушающему действию воды определяли по количеству агрегатов, последовательно (с интервалом в 1 минуту) не распавшихся на протяжении 10 минут. Содержание ПОВ определяли методом Тюрина (ГОСТ 26213-91), подвижного (лабильного) органического вещества – по М.А. Егорову валового азота – по Кельдалю-Иодельбаузеру.

При выборе почвенных объектов предполагалось получить широкий размах величин содержания органического вещества, что позволило бы объяснить роль ПОВ в ожидаемых значительных различиях водопрочности агрегатов. В частности, характерные особенности целинной почвы (Р. 1) были следующие: в верхней части гор. А (0-15 см) коричневого цвета (10 YR 4/3) содержание ПОВ достигало 9,26 %, валового азота – 0,56 % при соотношении C : N = 9,6, лабильного гумуса – 2,9 % с содержанием углерода в нем 1,68 %. Для старозалежной (Р. 3) почвы в верхней части гор. А (0-15 см) серовато-коричневого цвета (10 YR 5/3) содержание ПОВ составило 4,85 %, валового азота – 0,32 % при соотношении C : N = 8,8, лабильного гумуса – 1,09 % с содержанием углерода в нем 0,63 %. Новообразованная почва (Р. 2) в верхней части гор. А (10 YR 5/2.5) уступает двум другим объектам изучения по содержанию ПОВ – 3,38 % и азота – 0,26 % (при соотношении C : N = 7,5), а также лабильного гумуса – 0,83 % с содержанием углерода в нем 0,48 %.

Сравнение второго эталона, расположенного в 2,3 км от Р. 1 – целинной почвы на мысе Зюк (горизонт А, 0-15 см темно-коричневого цвета (10 YR 3/3)), с породой в профиле на глубине 2,8 м (белым (10 YR 8/2) элювием рифовых (мшанковых) известняков мэотического яруса) позволило определить следующий ранжированный убывающий ряд концентраций литогенных элементов: Sr (5,4) > Ca (3,8) > Mg (3,3) > Na (2,1) > (Ni, Cu, S (1,3)) > As (1,2). Что касается объектов сравнения (табл. 1) по отношению к основным литогенным элементам, то новообразованная и залежная почвы в отличие от целинного варианта характеризуются более высоким содержанием натрия (в среднем в 1,9 раза) и магния (в 1,2 раза), а новообразованная – и кальция (в 1,3 раза), при доминирующей роли содержания стронция в целинной почве, что унаследовано от материнской породы. Из 24 определявшихся макро- и микроэлементов в почве второго эталона отмечено более высокое содержание в сравнении с породой (от 1,4 раза и более) 14 химических элементов, из которых те, что характеризуют биологическое накопление, формируют следующий ранжированный ряд: P, Fe (4,8) > K (4,2) > Zn (2,6) > Mn (1,4). Элементы биогенной аккумуляции являются продуктом продукционного процесса и в то же время создают потенциал плодородия, влияющий на приход свежего растительного вещества, прежде всего, в зоне ризосферы. Судя по величине интегрального показателя качества почв ( $SQ_9$ ), обеспеченность изучаемых почв элементами биологического накопления последовательно уменьшалась от целинной почвы к новообразованной и залежной.

Таблица 1

Содержание химических элементов в горизонте А и оценочные показатели изученных почв

№ почвы (Р. №)		1	1	2	3
Горизонт, слой	см	Ad (AU), 0-5	A (AU) 5-15	A (AU), 0-15	A (AUpa), 0-16
<b>Элементы (оксиды)-биофилы</b>					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,67	0,49	0,62	0,27
K <sub>2</sub> O	%	1,96	2,01	1,67	2,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,44	4,78	4,18	5,14
MnO	%	0,14	0,14	0,14	0,14
Zn	мг/кг	111,26	99,08	120,21	90,18
Ni	мг/кг	50,28	54,53	51,02	48,31
Cu	мг/кг	39,48	45,30	9,09	12,02
<b>Элементы, способствующие структурообразованию</b>					
CaO	%	9,61	12,29	14,95	6,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	9,20	10,87	8,10	10,25
<b>Элементы, использованные для расчетных формул</b>					
Na <sub>2</sub> O	%	2,02	2,86	5,65	4,34
MgO	%	1,50	1,87	2,01	2,03
SiO <sub>2</sub>	%	43,12	43,74	38,18	54,15
<b>Тяжелые металлы и металлоиды</b>					
Ba	мг/кг	287,73	310,65	370,08	388,30
Sr	мг/кг	232,83	278,35	174,05	155,07
Cr	мг/кг	57,80	74,07	67,95	106,00
V	мг/кг	77,75	88,91	54,91	97,17
As	мг/кг	6,18	7,03	22,28	23,57
Co	мг/кг	10,79	9,92	0,71	14,35
Pb	мг/кг	32,14	27,71	< LOD	< LOD
<b>Расчетные показатели</b>					
SQ <sub>9</sub>	—	6,3	6,5	5,4	4,8
Кэл	—	3,96	3,19	2,18	5,09
Кп	—	0,09	0,11	0,18	0,12
TMM <sub>7</sub>	—	49	53	23	41
Ŵ	%	—	97	80	86

Примечания: LOD – предел обнаружения. Ŵ – средневзвешенная (от 2 до 7 мм) величина водоустойчивости структуры.

Предпосылками формирования высокой степени оструктуренности целинной почвы выступали: высокое содержание ПОВ и лабильных форм гумуса, высокая обеспеченность кальцием, при среднем уровне обогащенности гумуса азотом (по величине С : N).

Концентрация ансамбля элементов биологического накопления отражает результаты селективной сорбции химических элементов и их аккумуляции в почве, особенно в корнеобитаемом слое. При этом важно отметить, что особенностью карболитозёма (Р. 1) являлась максимальная степень участия гумусовых веществ и элементов биогенной аккумуляции в структурообразовании из-за отсутствия профильной миграции гумуса.

Целинный стандарт по величинам качества почв (SQ<sub>9</sub>), как дерновинного, так и гумусово-аккумулятивного горизонтов, превосходит на 16 % и 25 % новообразованную и залежную почвы соответственно. Это, прежде всего, обусловлено аккумуляцией почвой, находящейся в оптимальных условиях почвообразования, таких элементов, как медь, фосфор, кальций, цинк, по сравнению с залежной почвой, и повышенным содержанием меди, алюминия, калия и железа по сравнению с новообразованной почвой.

Различия в онтогенетической зрелости новообразованной почвы по сравнению с полновозрастными вариантами (целина и залежь) диагностирует даже верхняя часть гор. А: это отражается в наименьшей величине коэффициента элювирования и в наибольшей величине коэффициента подвижности, меньшей концентрации тяжелых металлов и металлоидов. Но эта почва, судя по интегральной оценке элементов-биофилов, занимает промежуточное положение между целинной и залежной почвами, что корреспондируется с общей оценкой водоустойчивости агрегатов диаметром от 2 до 7 мм. Оценка эффективности гумусированности почвы в формировании водоустойчивой структуры, рассчитанная по соотношению величины  $\hat{W}$  к содержанию ПОВ ( $\hat{W} / \text{ПОВ, \%}$ ), показала, что этот показатель наибольше у новообразованной почвы ( $\hat{W} / \text{ПОВ} = 44 \%$ ), тогда как залежная и целинная почвы ей значительно уступают 18 % и 10 % соответственно. Это помимо более активного проявления педогенеза на этапе саморазвития объясняется наиболее благоприятной материнской породой (покровным суглинком), в отличие от двух других почв, обладающих той или иной степенью щебнистости.

В среднем по объектам водопрочность агрегатов с учётом их размерности уменьшалась в следующем порядке: 5-7 мм (87 %), 2-3 мм (86 %), 3-5 мм (83 %). Однако при рассмотрении последовательности изменения водопрочности агрегатов по мере изменения их диаметра установлены противоположные закономерности: если для новообразованной почвы (Р. 2) по мере роста диаметра агрегатов от 2 до 7 мм водопрочность агрегатов последовательно увеличивалась (с 69 % до 80 %), то для целинной почвы на известняке (Р. 1) напротив – водопрочность несколько уменьшалась (с 97 % до 95 %). У длительно залежной (со сроком ренатурации более 40 лет) щебнистой почвы на морских отложениях (Р. 3) водопрочность агрегатов диаметром 2-3 мм имела наибольшую величину (93 %) среди других размерностей, но снижалась по мере увеличения диаметра – до 86 % (5-7 мм) и 81 % (3-5 мм).

Об участии гумуса в структурообразовании свидетельствуют дифференцированные данные по содержанию гумуса в отдельных фракциях водопрочных агрегатах (3,0-0,25 мм). В настоящее время большинство исследователей сходятся во мнении, что по мере уменьшения величины агрегатов содержание гумуса неуклонно снижается, особенно при сравнении фракций 3-1, 1-0,5 и 0,5-0,25 мм. Эти результаты преимущественно относятся к пахотным почвам, а по водопрочным мезоагрегатам размерностями 3-5 мм и 5-7 мм, которые существенно представлены в целинных и старозалежных почвах, как и в нашем исследовании, данных недостаточно. При статистической обработке результатов по почвам степной зоны авторами было показано, что с увеличением диаметра водопрочным агрегатам корреляционная связь водоустойчивости и содержания гумуса повышается, однако наиболее убедительно эта обусловленность проявляется для фракции 2-3 мм. В заключение следует отметить, что на более низком иерархическом уровне агрегации – уровне микроагрегатов (< 0,25 мм), происходят своеобразные механизмы структурообразования и более длительное пребывание ПОВ, чем в макроагрегатах, а это требует использования других методов исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>

УДК 631.46

ЭМИССИЯ СО<sub>2</sub> ИЗ ПОЧВ РОССИИ: ОТ БАНКА ДАННЫХ К СОЗДАНИЮ ПЕРВОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА

Лопес де Гереню В.О.<sup>1</sup>, Курганова И.Н.<sup>1</sup>, Хорошаев Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, [vlopes@mail.ru](mailto:vlopes@mail.ru);

Превышая антропогенную эмиссию СО<sub>2</sub> более чем на порядок, эмиссия СО<sub>2</sub> из почв является одним из крупнейших потоков в глобальном цикле углерода. Академик Г.В. Добровольский в своих трудах неоднократно отмечал, что «...Выделение почвой