

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.46

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СВОЙСТВ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ  
НА ШАХТНЫХ ОТВАЛАХ В ПОДМОСКОВНОМ УГОЛЬНОМ БАССЕЙНЕ<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. А. Юдина<sup>а</sup>, И. Н. Семенов<sup>а, \*</sup>, А. В. Шарапова<sup>а</sup>, С. А. Леднев<sup>а</sup>, Т. В. Королева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 19.03.2022 г.

После доработки 24.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Охарактеризованы свойства почв в районе добычи высокосернистых бурых углей (север Среднерусской возвышенности, Тульская область), прекращенной в конце XX в. Рассмотрены три ключевых участка, вмещающих по одному техногенному объекту: конический нерекультивированный отвал, спланированный отвал и рекультивированный отвал. Для поверхностного слоя почв этих участков (0–10 см) составлена серия карт распределения температуры, pH, удельной электропроводности водной вытяжки, содержания гранулометрических фракций, почвенного органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) и химических элементов (Al, Ca, Fe, Mg, Mn и S). На коническом отвале преобладают средне-суглинистые токсилитостраты (Spolic Technosols), темный поверхностный слой которых характеризуется сильнокислой реакцией ( $\text{pH } 3.2 \pm 0.5$ ) и повышенной относительно фоновых почв удельной электропроводностью ( $1.72 \pm 0.07$  дСм/м). На участках, сложенных прогоревшим материалом, распространены осветленные и менее прогретые (на  $1^\circ\text{C}$ ) литостраты (Technosols), обладающие меньшей кислотностью (на 0.7 ед. pH,  $p = 0.022$ ) и меньшим содержанием электролитов (в 2.4 раза,  $p = 0.022$ ). Тяжелосуглинистые почвы спланированного отвала представлены (токси)литостратами и пелоземами гумусовыми (Regosols). На уровне тенденции можно отметить, что задернованные почвы содержат больше физической глины ( $p < 0.05$ ), имеют повышенные значения pH и содержания Al, Fe, Mn и S, а также Ca ( $p < 0.001$ ) и пониженную удельную электропроводность относительно нездернованных почв при незначимых отличиях по содержанию  $C_{\text{орг}}$ . Тяжелосуглинистые реплантоземы (Anthrosols) фитомелиорированного отвала имеют нейтральную реакцию среды за счет использования материала природных почв и слабо дифференцированы по обследованным показателям за исключением повышенного содержания S и пониженного – Ca в почвах склонов ( $p < 0.01$ ), что, вероятно, вызвано влиянием сернокислых стоков.

**Ключевые слова:** загрязнение почв, угледобыча, кислые фильтрационные воды, чернозем (Chernozems), техногенные поверхностные образования (Technosols), ГИС-анализ, токсилитостратоземы (Regosols over Phaeozems), темноцветные почвы, объекты накопленного вреда, карбоновые полигоны

**DOI:** 10.31857/S0032180X22100161

## ВВЕДЕНИЕ

Угольная промышленность оставляет углеродный след на всех этапах энергоемкого жизненного цикла угля как используемой субстанции [23, 27, 42, 44]. После ратификации Парижского соглашения России необходимо декарбонизировать производство, сократив с 2016 по 2030 гг. выбросы  $\text{CO}_2$  на 25–40% от уровня 2005 г. [24]. Нереккультивированные отвалы угледобычи являются пассивными источниками  $\text{CO}_2$ . Однако при реализации полного цикла рекультивации, включающей фитомелиорацию, эти объекты могут вы-

ступать своеобразными карбоновыми полигонами (фермами), снижающими углеродный след.

За все время эксплуатации из 180 шахт Подмосквового угольного бассейна (ПУБ) извлечено более 1.2 млрд т угля и изъято из сельскохозяйственного оборота около 1000 га пахотных земель. Суммарный объем складированного в отвалы материала составляет 100 млн  $\text{м}^3$ . Каждый отвал (более 150) содержит 300–600 тыс.  $\text{м}^3$  токсичных, потенциально кислых за счет окисления сульфидов промышленных отходов [8, 15]. Помимо этого, рядом с заброшенными и нереккультивированными отвалами появились делювиально-пролювиальные шлейфы (toeslope talus), образованные эрозионной деятельностью кислых фильтрационных вод (acid mine drainage).

<sup>1</sup> К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22100161.

Так как российский закон “О недрах” 1992 г., согласно которому постулируется завершение жизненного цикла угледобывающего предприятия рекультивацией всех нарушенных земель, обнародован после закрытия основного массива шахт ПУБ, большинство отвалов так и осталось нерекультивированным [4]. Отсутствие рекультивации этих объектов накопленного вреда негативно влияет на экосистемы, удаленные на расстояние от 3 до 50 км от них [6, 8, 21, 26, 43]. Трансформация вскрышных и вмещающих пород, содержащих большое количество химически активных восстановленных веществ [32, 41], под действием экзогенных процессов меняет ландшафтно-геохимические условия [3, 12, 14]. Однако для оценки темпов самозарастания отвалов и разработки эффективных проектов рекультивации необходимо исследовать, насколько высока пространственная неоднородность этих объектов, и на какой стадии посттехногенного саморазвития они находятся на данный момент [17, 32].

Цель исследования – оценка пространственной дифференциации свойств корнеобитаемого слоя почв, формирующихся на отвалах угольных шахт и зон их воздействия на севере Среднерусской возвышенности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для оценки неоднородности материала угольных отвалов и масштабности их влияния на прилегающие территории изучены три ключевых участка на севере Среднерусской лесостепи в Киреевском и Узловском районах Тульской области (табл. S1).

*Конический нерекультивированный отвал (террикон)* находится в 2.5 км к западу от пос. Ильинка и состоит из вскрышных и вмещающих пород [11, 18], которые активно подвергаются экзогенным процессам и формируют сернокислые потоки рассеяния потенциально токсичных элементов [28, 29, 37, 43]. На темной, незадернованной и не горевшей поверхности крутосклонного террикона распространены токсилитостраты (Spolic Technosols) с системой горизонтов X–CX, а на светлой, преимущественно незадернованной и прогоревшей поверхности – литостраты (Technosols) [18, 38], зачастую еще недифференцированные на почвенные горизонты. На делювиально-пролювиальных шлейфах распространены токсистратоземы незадернованные (Regosols) с системой горизонтов O или W–RX–D под вейниковым лугом (преобладает вейник наземный, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth), мертвопокровным и вейниковым березняками (преобладает береза повислая, *Betula pendula* Roth, и вейник наземный) [11]. В краевых частях шлейфов распространены агрочерноземы глинисто-иллювиальные химически-трансформированные (Chernic Phae-

ozems) с системой горизонтов (gx)–PU(x)–AU–BI–C(ca). На удалении от террикона, вне зоны воздействия сернокислых стоков, находятся агрочерноземы глинисто-иллювиальные (Haplic Chernozems) с системой горизонтов AU–BI–BCAmc Cca.

*Спланированный отвал* в 2 км к северу от пос. Владимировка сформирован за счет поэтапной отсыпки вмещающих толщ угольных пластов, последующего срезания верхней части отвала и самозарастания луговой и древесной растительностью. Почвы изученной пологой вершины представлены незадернованными (токсид)литостратами и пелоземами гумусовыми (Regosols) с системой горизонтов W–C, покрытыми разнотравно-злаковыми (преобладают мятлик узколистный, *Poa angustifolia* L., и люцерна серповидная, *Medicago falcata* L.) и вейниковыми лугами с подростом березы.

*Фитомелиорированный и рекультивированный отвал*, расположенный в 500 м к юго-западу от пос. Синяевка, представлен спланированным терриконом, на поверхности которого из материала природных почв сконструированы реплантоземы (Anthrosols) с условной системой горизонтов O–RU–RBIx–DX и сооружена дренажная система. На вершине и склонах этого отвала распространены разнотравно-злаковые луга (преобладают золотарник канадский, *Solidago canadensis* L., вейник наземный и костер безостый, *Bromopsis inermis* Leyss). На делювиально-пролювиальном шлейфе произрастают березняки мертвопокровные на токсистратоземах (Regosols over Phaeozems) и мезофитные луга на токсистратифицированных черноземах (Gleyic Chernozems). У подножья отвала созданы пруды-отстойники.

Работа базируется на анализе 103 проб почв, отобранных с глубины 0–10 см в середине июля 2020 г. с учетом растительности и элементов рельефа. На первом участке (с коническим отвалом) опробование выполнено по трем профилям длиной около 200 м от вершины отвала по склонам к залуженной ложбине, замкнутому залесенному понижению и выровненной поверхности вне зоны воздействия сернокислых стоков со средним шагом 20 м (суммарно 51 проба). Схожая схема пробоотбора реализована и на участке с фитомелиорированным отвалом (средний шаг 25 м; длина профилей около 160 м; суммарно 27 проб). Почвы вершины спланированного отвала опробованы в пределах прямоугольника 55 × 61 м со средним шагом 8 м (суммарно 25 проб).

Температуру почвы на глубине 5 см измеряли с помощью контактного термометра “Техно ТК-5” в разное время суток на трех ключевых участках, поэтому сравнение температур корректно лишь внутри одного участка. На спланированном отвале работы выполнены во время мороси 15 июля. Температура воздуха была +16°C по данным из от-

крытого интернет-источника gr5 на ближайшей метеорологической станции, расположенной в г. Новомосковске; номер метеостанции 27821и. На коническом и фитомелиорированном отвалах измерения проведены 16 июля в ясную, безоблачную погоду в период 12–14 и 16–19 ч, когда температура воздуха была +15 и +16°C соответственно.

Величина pH определена потенциометрически (на pH-метре Kelilong PH-009i; почвенная суспензия; соотношение почва : дистиллированная вода 1 : 2.5), удельная электропроводность (почва : вода 1 : 5; ЭП<sub>1:5</sub>) – кондуктометрически (солемер TDS&EC meter (hold)), содержание C<sub>орг</sub> – титриметрически по И.В. Тюрину с фенилантралиновой кислотой, Al, Ca, Fe, Mn, Mg, S – рентгенфлуоресцентным методом (рентгенфлуоресцентный анализатор Olimpus, Нидерланды), гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии (лазерный гранулометр Analysette 22 Micro Tec plus Fritsch, Германия). Охарактеризовано 7 гранулометрических фракций (PM) по Н.А. Качинскому. Подстрочным индексом по тексту статьи и на иллюстрациях для них указаны пороговые значения диаметра частиц (мкм): PM<sub><1</sub> – ил; PM<sub>5-1</sub>, PM<sub>10-5</sub> и PM<sub>50-10</sub> – мелкая, средняя и крупная пыль; PM<sub>250-50</sub>, PM<sub>500-250</sub> и PM<sub>1000-500</sub> – тонкий, средний и крупный песок.

В программе Statistica рассчитаны средние арифметические и стандартные отклонения, проведен тест Манна–Уитни с принятием в качестве порогового уровня значимости ( $p$ ) 0.05. Карты пространственного распределения показателей построены в программе ArcMap с использованием инструмента обратно взвешенных расстояний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Конический нерекультивированный террикон.

В поверхностном слое почв конического нерекультивированного террикона контрастно дифференцированы кислотность и ЭП и более однородно – остальные изученные свойства и показатели: C<sub>орг</sub>, температура, гранулометрический и элементный состав.

**Температура.** За счет различий в альбеде темная поверхность террикона теплее светлой прогревшейся: 16–18°C против 15–16°C ( $p = 0.003$ , табл. 1 и S2). Аналогично незадернованные почвы шлейфа теплее задернованных и залесенных: 17–18 и 15–16°C соответственно ( $p = 0.016$  и 0.009 соответственно) за счет затенения поверхности почв растительностью.

**Гранулометрический состав.** Гранулометрический состав светлой и темной поверхности террикона не отличается. Преобладают пылеватые фракции (рис. 1, табл. S2). Доля ила составляет 4.8–5.6%. При этом существенно количество крупного, среднего и мелкого песка (0.2–0.6, 2–3

и 16% соответственно). Доля физической глины составляет 36–39%.

Гранулометрический состав поверхностного слоя почв делювиально-пролювиального шлейфа под разной растительностью также слабо отличается. Лишь доля PM<sub>50-10</sub> на задернованном участке больше, чем на залесенном:  $41 \pm 5$  и  $30 \pm 7\%$  (здесь и далее приведены среднее и стандартное отклонение;  $p = 0.017$ ).

В изученных тяжелосуглинистых ( $51 \pm 3\%$  физической глины,  $n = 7$ ) агрочерноземах глинисто-иллювиальных преобладает PM<sub>50-10</sub> и PM<sub>5-1</sub>:  $47 \pm 3$  и  $29 \pm 2\%$  соответственно. PM<sub>10-5</sub> и PM<sub><1</sub> содержится  $16 \pm 1.3$  и  $5.7 \pm 0.7\%$  соответственно. Доля песчаных фракций минимальна: PM<sub>1000-500</sub> и PM<sub>500-250</sub> не обнаружены, а PM<sub>250-100</sub> содержится  $1.7 \pm 0.7\%$ .

Агрочерноземы химически трансформированные легче фоновых почв за счет меньшей доли пылеватых частиц и PM<sub><10</sub> ( $p < 0.042$ ) и большей – мелкого песка ( $p = 0.023$ ).

**Кислотность.** Почвы террикона и сопряженных делювиально-пролювиальных шлейфов слабокислые–кислые. Наиболее кислая среда (pH  $3.2 \pm 0.5$ ) характерна для токсилитостратов незадернованной темной негоревшей поверхности террикона. Литостраты светлой прогревшейся поверхности имеют большие значения pH:  $3.9 \pm 0.3$ , чем негоревшей ( $p = 0.022$ ) за счет выгорания сульфидов и прекращения продуцирования серной кислоты. Субстрат незадернованных участков шлейфа кислее залесенных ( $p = 0.038$ ). Менее кислая среда, вероятно, способствует более активному зарастанию этих поверхностей. За счет влияния сернокислых стоков в агрочерноземе химически загрязненном значения pH меньше ( $4.5 \pm 0.5$ ,  $n = 9$ ,  $p = 0.022$ ), чем в условно фоновых агрочерноземах глинисто-иллювиальных ( $5.3 \pm 0.6$ ,  $n = 7$ ).

**Удельная электропроводность.** ЭП<sub>1:5</sub> максимальна ( $1.72 \pm 0.07$  дСм/м;  $n = 15$ ) в токсилитостратах, что отражает повышенное содержание электролитов и связано с формированием серной кислоты. На выгоревших участках с литостратами ЭП<sub>1:5</sub> меньше в 2.4 раза ( $p = 0.022$ ), опускаясь на делювиально-пролювиальных шлейфах до 0.21 дСм/м и ниже. По сравнению с незадернованными токсилитостратами, в субстрате залесенных шлейфов ЭП<sub>1:5</sub> почти в 2 раза меньше ( $p = 0.004$ ), что объясняется менее интенсивным поступлением сернокислых стоков. В агрочерноземе химически загрязненном ЭП<sub>1:5</sub> также больше относительно фоновых агрочерноземов глинисто-иллювиальных ( $p = 0.008$ ).

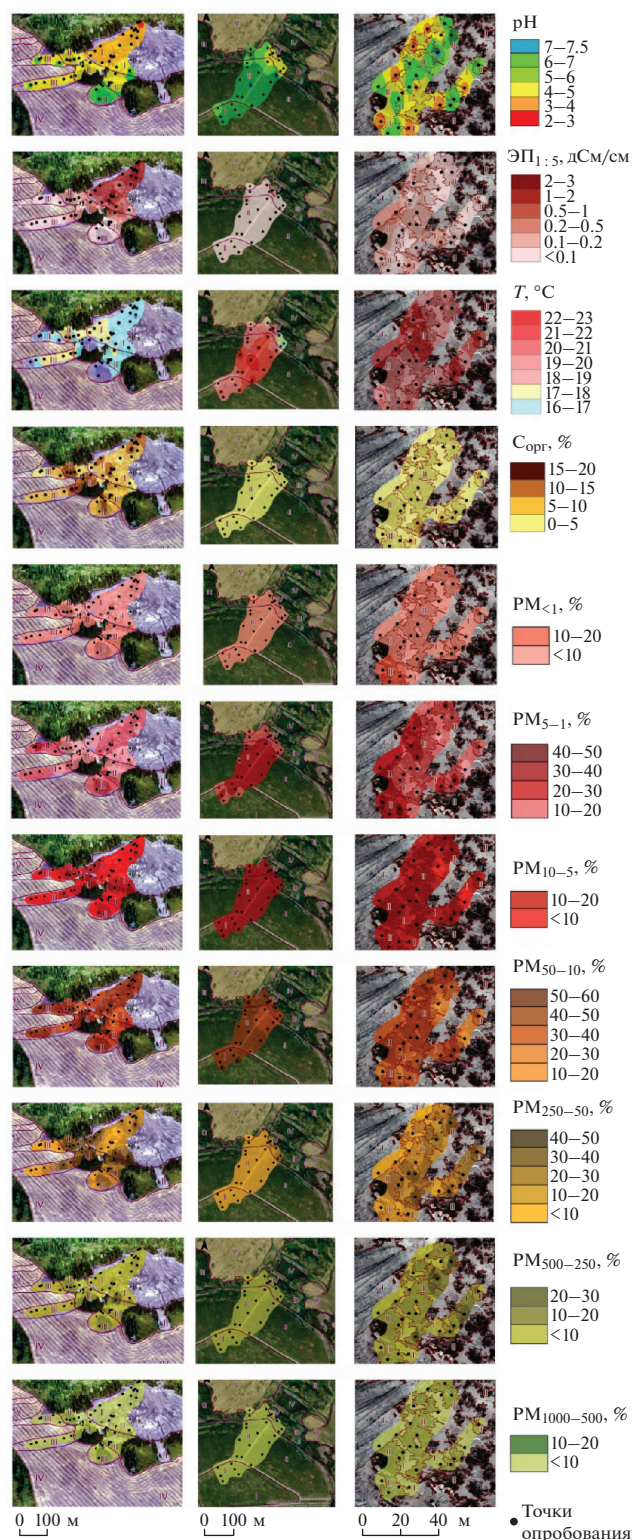
**C<sub>орг</sub>.** Содержание C<sub>орг</sub> варьирует от 0.5 до 22% с максимальными значениями в токсилитостратах, обогащенных углефицированным материалом. Поверхностный слой литостратов содержит в

Таблица 1. Свойства поверхностного слоя почв (0–10 см) ключевых участков

Почвы	pH	ЭП <sub>1,5</sub> , дСм/м	T, °C	C <sub>орг</sub> , %	Гранулометрические фракции (мм), %							Волокно содержание, %						
					PM <sub>1000–500</sub>	PM <sub>500–250</sub>	PM <sub>250–100</sub>	PM <sub>50–10</sub>	PM <sub>10–5</sub>	PM <sub>5–1</sub>	PM <sub>&lt;1</sub>	PM <sub>&lt;10</sub>	Al	Ca	Fe	Mg	S	Mn
Токсиготоземы незадернованных склонов террикона, n = 15	3.2/0.5	1.69/0.69	17/1	12/6	0.2/0.5	2/4	16/18	42/11	12/4	22/6	5.6/1.5	39/11	3.8/0.9	0.4/0.5	1.6/1.1	2.1/1.3	1.3/0.4	<0.01
Лиготоземы незадернованных склонов террикона, n = 5	4.0/0.3	0.70/0.62	16/1	3/4	0.6/1.2	3/6	16/18	44/11	12/4	20/7	4.8/1.5	36/13	6.0/1.1	0.3/0.3	1.8/0.5	2.0/1.5	1.0/0.4	<0.01
Токсиготоземы незадернованные на шлейфах, n = 4	4.1/0.3	0.21/0.09	18/0.4	4/2	0.3/0.2	7.3/7	29/19	32/15	9/3	18/6	4.8/1.3	31/13	3.9/0.4	0.03/0.02	1.4/0.2	2.0/1.4	0.9/0.1	<0.01
Токсиготоземы под шейфак, n = 4	4.7/0.6	0.09/0.11	16/1	10/3	0.02/0.04	1.2/1.5	28/10	41/5	10/2	16/4	3.9/1.2	31/11	4.1/1.0	0.5/1.1	1.7/0.5	2.1/1.2	0.7/0.2	0.01/0.01
Токсиготоземы лугами на шейфак, n = 5	5.1/0.6	0.07/0.10	15/1	11/2	8/7	9/6	3/7	30/7	9/1	15/3	3.5/1.0	27/5	4.9/0.5	0.3/0.2	2.2/0.5	1.8/1.4	0.7/0.3	0.01/0.01
Агроценоземы химически трансформированные с агроценозом, n = 9	4.5/0.5	0.13/0.09	17/1	9/6	0.3/0.6	2/3	18/14	39/6	12/3	23/6	5.3/1.0	41/11	3.5/0.8	0.3/0.2	2.3/0.4	2.0/1.2	0.6/0.3	0.02/0.02
Агроценоземы глинисто-иллювиальные с агроценозом, n = 7	5.3/0.6	0.037/0.032	16/1	5/2	<0.1	<0.1	1.7/0.7	47/3	16/1	29/2	5.7/0.7	51/3.2	3.3/0.7	0.67/0.2	2.8/0.2	2.8/0.4	0.2/0.1	0.05/0.01
Слапированный отвал																		
Примитивные дерновые под разнотравно-злаковыми лугами вершины отвала, n = 5	6.1/0.8	0.028/0.016	20/1	2/1	0.1/0.2	8/12	16/13	31/10	12/5	26/8	7.2/3	50/14	2.4/0.4	0.6/0.2	4.5/0.5	1.4/1.5	0.14/0.04	0.03/0.005
Лиготоземы под войничными лугами с подростом березы вершины отвала, n = 8	5.5/0.8	0.09/0.13	20/1	2/2	0.52/1.4	4/6	9/13	33/7	15/3	31/9	8.1/3.4	53/15	3.4/1.2	0.2/0.3	2.7/1.4	0.8/1.3	0.5/0.3	0.01/0.01
Токсиготоземы незадернованный вершины отвала, n = 12	3.9/1.1	0.32/0.28	20/1	2/2	34.6/8.5	13/3	28/8	8.4/2.9	50/13	22/19	8.2/7	18/15	2.5/0.4	0.5/0.2	3.9/1.2	0.7/1.3	0.2/0.2	0.03/0.01
Фитомелиорированный и рекультивированный отвал и прилегающие к нему территории																		
Реплантоземы под разнотравно-злаковым лугом вершины отвала, n = 6	6.2/0.3	0.03/0.01	19/1	2.9/0.1	<0.01	<0.01	1.1/1.0	48/6	16/2	29/4	6.6/1.3	51/7	2.1/0.4	1.2/0.1	3.5/0.1	2.0/1.5	0.02/0.02	0.06/0.01
Реплантоземы под разнотравно-злаковыми лугами крутых склонов отвала, n = 16	6.2/1.1	0.065/0.075	20/1	3.0/0.4	<0.01	<0.01	2.4/5.4	42/6	16/2	32/5	7.6/1.7	56/8	2.5/0.7	1.1/0.7	2.7/1.0	1.3/1.5	0.2/0.3	<0.01
Токсиготоземы под березняками мертвопокровными на шлейфе, n = 3	4.7/0.6	0.023/0.005	16.5/0.2	3.7/0.1	<0.01	<0.01	9/15	46/6	16/4	24/5	4.9/1.5	45/9	1.9/0.4	0.6/0.3	1.2/0.3	0.3/0.8	0.5/0.1	<0.01
Донные отложения прудов-отстойников, n = 1	4.1	0.28	19	4.2	<0.01	<0.01	20	37	12	24	6.3	42	1.9	0.3	2.3	<0.01	1.1	<0.01
Токсиготоземы мезофитными лугами, n = 1	4.2	0.02	16	3.4	<0.01	<0.01	22	32	14	25	6.5	46	1.8	0.2	0.8	<0.01	0.6	<0.01

Примечание. Полу жирным выделены значения, максимальные на соответствующем участке. n — число проб. Перед чертой среднее, за чертой — стандартное отклонение.





**Рис. 1.** Свойства поверхностного слоя почв (0–10 см) ключевых участков. Здесь и далее: *слева* – конический нерекультивированный террикон и прилегающие к нему территории: I – трансэлювиальный техногенный ландшафт крутых незадернованных склонов террикона с (токси-)литостратами, II – трансэлювиально-аккумулятивный природно-техногенный ландшафт делювиального шлейфа с токсистратоземами незадернованными, покрытыми березняками и вейниковыми лугами, III – трансаккумулятивный природно-техногенный ландшафт просадок грунта с агроценозом на агрочерноземах химически трансформированных, IV – автономный агроландшафт межпросадочного пространства с агроценозом на агрочерноземах глинисто-иллювиальных. *По центру* – ландшафты спланированного, рекультивированного и фитомелиорированного отвала и прилегающие к нему территории: I – автономный природно-техногенный ландшафт вершины отвала с разнотравно-злаковыми лугами на реплантоземах, II – трансэлювиальный природно-техногенный ландшафт крутых склонов отвала с разнотравно-злаковыми лугами на реплантоземах, III – трансаккумулятивный ландшафт делювиально-пролювиального шлейфа с березняком мертвopoкpoвным на токсистратоземах, IV – субаквальный природно-техногенный ландшафт прудов-отстойников, V – трансаккумулятивный ландшафт делювиального шлейфа с мезофитными лугами на токсистратифицированных черноземах. *Справа* – автономные техногенные ландшафты поверхности спланированного отвала: I – незадернованные токсистратоземы, II – разнотравно-злаковый луг с подростом березы на токсистратоземах.

нием гумуса, а также углефицированного материала, задерживаемого на механическом барьере корней растений, опада и ветоши.

**Элементный состав.** За счет высокой вариативности содержания рассматриваемых химических элементов материал темной и светлой поверхности террикона значимо не отличается по элементному составу от агрочернозема глинисто-иллювиального и содержит (%) Al 3.8–6.0, Ca 0.29–0.41, Fe 1.6–1.8, Mg 2.0–3.4, S 1.0–1.3, Mn < 0.01.

Элементный состав материала делювиально-пролювиального шлейфа значимо отличается по содержанию Al, Ca и Fe на незадернованном и залесенном участках (рис. 2). Токсистратоземы под березняком содержат Al в 1.3 раза больше ( $p = 0.038$ ), Ca – 11 раз ( $p = 0.019$ ), а Fe – в 1.6 раз ( $p = 0.009$ ), чем незадернованные. Содержание остальных элементов не отличается и варьирует в следующих пределах (%): Mg 1.8–2.1, S 0.60–0.89, Mn 0.01–0.02.

Условно фоновый агрочернозем содержит (%): Al  $3.3 \pm 0.7$ , Fe  $2.8 \pm 0.2$ , Mg  $2.8 \pm 0.4$ , Ca  $0.7 \pm 0.2$ , Mn  $0.05 \pm 0.01$  и S  $0.17 \pm 0.10$ . Относительно него в химически трансформированном агрочерноземе повышено содержание S ( $p = 0.042$ ) и понижено – Mn ( $p = 0.001$ ).

**Спланированный отвал.** На спланированном отвале в связи с перемешиванием материала большинство изученных почвенных свойств и

4 раза меньше  $C_{орг}$  ( $p = 0.011$ ) за счет выгорания органического вещества. На залесенных токсистратоземах содержание  $C_{орг}$  больше ( $p = 0.009$ ) относительно незадернованных, что может быть обусловлено влиянием растительности: накопле-



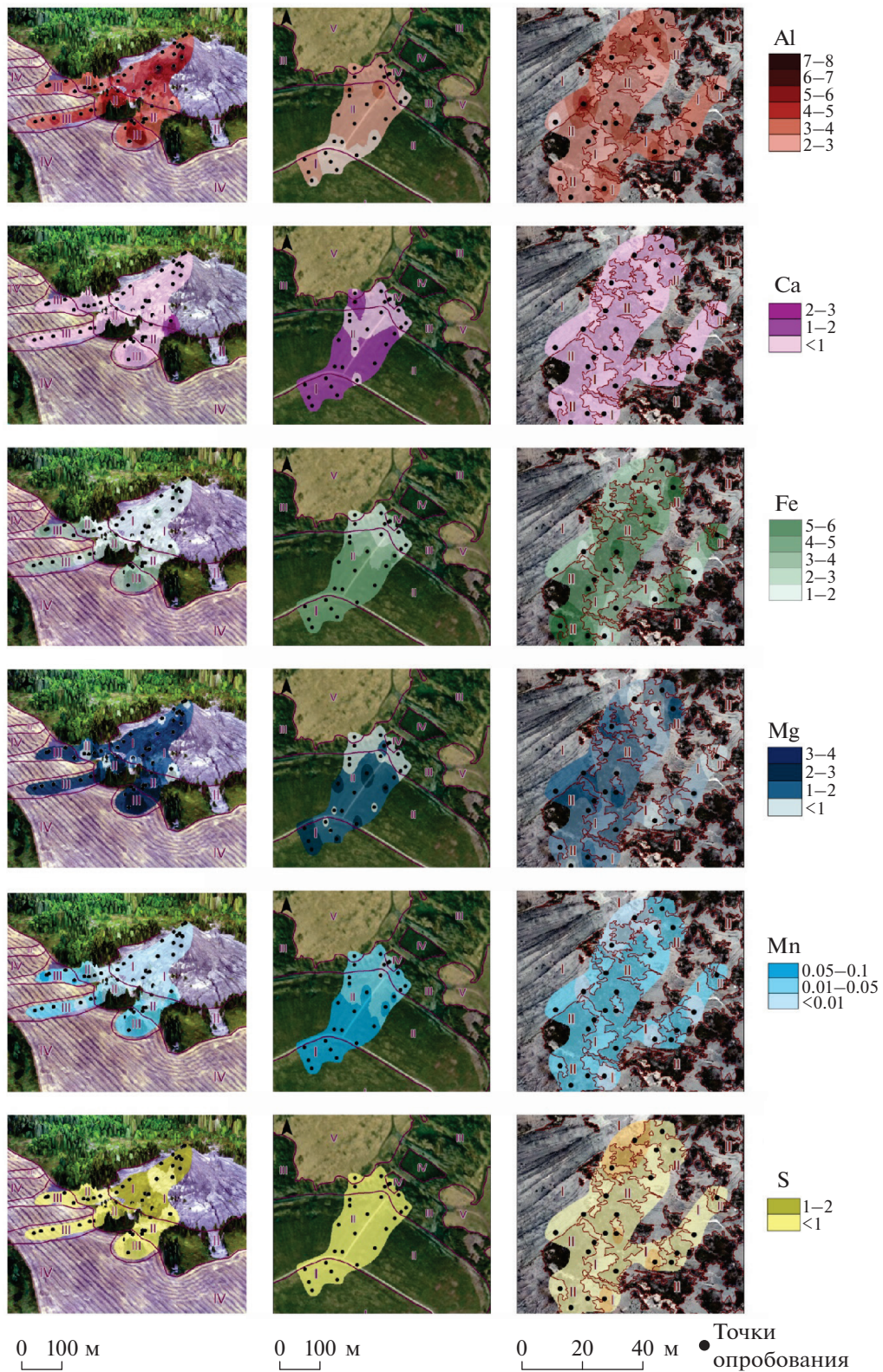


Рис. 2. Элементный состав (%) поверхностного слоя почв (0–10 см) ключевых участков.

показателей не так ярко отличается, как на участке с коническим терриконом.

**Температура.** Температура задернованных и незадернованных почв значимо не отличалась и в среднем для всего участка составляла  $19.8 \pm 0.8^\circ\text{C}$ . Возможно, это связано с выполнением термометрической съемки во время мороси.

**Гранулометрический состав.** Гранулометрический состав субстрата спланированного отвала значимо не дифференцирован ( $p < 0.05$ ). В задернованных тяжелосуглинистых (46–53% физической глины) токсилитостратах содержится крупной, средней и мелкой пыли  $33 \pm 8$ ,  $13 \pm 4$  и  $29 \pm 8\%$  соответственно при доле  $\text{PM}_{<1}$  7–8% и крупного песка – 0.1–0.5%. Количество среднего и мелкого песка достигает 4–8 и 9–16% соответственно.

На уровне тенденции ( $p < 0.05$ ) для незадернованных почв можно отметить снижение в 2.9 раз доли физической глины (при высокой вариабельности показателя:  $18 \pm 15\%$ ), уменьшение до 3.9 и 1.4 раза содержания крупной и мелкой пыли, соответственно, сокращение в 4 раза доли средней пыли. Доля крупного, среднего и мелкого песка незначительно увеличивается до  $35 \pm 9$ ,  $13 \pm 3$  и  $28 \pm 8\%$  соответственно. Такое облегчение гранулометрического состава может способствовать улучшению дренажа и формированию более сухих местообитаний, менее благоприятных для растительности рассматриваемого региона.

**Кислотность.** На вершине спланированного отвала pH варьирует от 3.0 до 7.5. Большая часть поверхности имеет слабокислую реакцию среды – от 4 до 6. Причем незадернованные участки кислее примитивных дерновых почв под разнотравно-злаковым лугом на 2.2 ед. pH ( $p = 0.0006$ ), что может быть причиной сохранения этих участков незадернованными.

**Удельная электропроводность.** Средние значения  $\text{ЭП}_{1:5}$  варьируют преимущественно от 0.008 до 0.322 дСм/м. Участок с наибольшим содержанием электролитов ( $\text{ЭП}_{1:5} = 0.32 \pm 0.28$  дСм/м) приурочен к незадернованным почвам, которые в целом имеют большую  $\text{ЭП}_{1:5}$ , чем задернованные ( $p = 0.001$ ). Повышенные на порядок относительно окружающих черноземов значения удельной электропроводности также могут быть фактором, сдерживающим поселение здесь растительности за счет негативного влияния серной кислоты на корневые системы.

**$S_{\text{орг}}$ .** Практически вся поверхность спланированного отвала содержит  $S_{\text{орг}}$  менее 5%. Среднее содержание органического углерода в исследованных почвах не отличается ( $p = 0.589$ ) и варьирует в широком диапазоне от 0.1 до 6.5%.

**Элементный состав.** Незадернованная поверхность отвала содержит Al  $2.5 \pm 0.4\%$  и S  $0.23 \pm 0.20\%$ , что значительно превышает уровни в корнеоби-

таемом слое задернованного токсилитострата ( $p < 0.001$ , рис. 2). Эти элементы могут находиться в токсичных для растений формах, что может сдерживать зарастание поверхности спланированного отвала. Почвы под вейниковым лугом с подростом березы содержат Ca в 2.5 раза меньше, чем на незадернованном участке, Fe – в 1.4 раза, Mn – в 3 раза (во всех случаях  $p < 0.0001$ ), что может быть результатом биогенного накопления этих элементов и/или литологической неоднородностью участков, способствовавшей первоочередному заселению растительностью. Содержание Mg (0.7–1.4%) значимо не отличается в разных почвах вершины спланированного отвала.

**Рекультивированный отвал.** За счет отсыпки отвала плодородным слоем свойства верхних 10 см почв третьего ключевого участка слабо отличаются. Значимые различия выявлены только по температуре, гранулометрическому составу и содержанию S и Ca.

**Температура.** Верхний слой почв северного склона отвала хорошо прогрет: температура варьирует от 18 до  $23^\circ\text{C}$ . Почвы плоской вершины (температура  $18\text{--}20^\circ\text{C}$ ) под мезофитным лугом, в среднем, на  $3^\circ$  теплее почв залесенного подножья отвала ( $16\text{--}17^\circ\text{C}$ ,  $p = 0.036$ ) за счет затенения поверхности почвы кронами деревьев.

**Гранулометрический состав.** В тяжелосуглинистом (физической глины 42–56%) поверхностном слое почв отвала и сопряженных шлейфов преобладают пылеватые фракции, а доля крупного и среднего песка меньше 0.01%. В гранулометрическом составе реплантоземов вершины отвала больше физической глины, илистой фракции и мелкой пыли ( $p > 0.011$ ), чем на залесенном участке шлейфа. На уровне тенденции ( $p < 0.05$ ) количество мелкого песка ( $\text{PM}_{250-100}$ ) увеличивается в 9 раз в залесенных почвах шлейфа относительно вершины отвала.

**Кислотность.** Большая часть поверхности фитомелиорированного отвала обладает нейтральной средой. Наименее кислая среда характерна для реплантоземов крутых склонов ( $6.2 \pm 1.1$ ,  $n = 16$ ) и вершины отвала ( $6.2 \pm 0.3$ ,  $n = 6$ ). За счет влияния дренажных вод у подножья отвала и в донных отложениях прудов-отстойников значения pH варьируют в пределах 5–6 и 3.8–5.0 соответственно.

**Удельная электропроводность.**  $\text{ЭП}_{1:5}$  почв вершины и склона отвала менее 0.1 дСм/м, которая за счет влияния дренажных вод незначительно повышается до 0.2 дСм/м в почвах залесенного делювиального шлейфа и до 0.3 дСм/м в донных отложениях прудов-отстойников.

**$S_{\text{орг}}$ .** Содержание  $S_{\text{орг}}$  на вершине и склонах фитомелиорированного отвала и почвах шлейфа варьирует незначительно и меняется от  $2.9 \pm 0.1\%$  в

почвах шлейфа под березняком мертвопокровным до 4.2% в донных отложениях пруда-отстойника.

**Элементный состав.** В реплантоземах вершины фитомелиорированного и рекультивированного отвала содержится (%): Al  $2.0 \pm 0.3$ , Ca  $1.2 \pm 0.1$ , Fe  $3.4 \pm 0.1$ , Mg  $2.0 \pm 1.5$ , S  $0.020 \pm 0.018$ , Mn  $0.057 \pm 0.006$ . Относительно автономной позиции, на крутых задернованных склонах отвала S больше ( $p = 0.009$ ), а Ca меньше ( $p = 0.004$ ), что может отражать выклинивание кислых сульфатных вод, сопровождающееся выщелачиванием Ca. Почвы подчиненных ландшафтов шлейфа относительно вершины содержат больше валовой S ( $p = 0.000004$ ), которая, вероятно, аккумулируется здесь из кислых дренажных вод на геохимическом барьере.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выявления обобщенных особенностей рассматриваемых объектов целесообразно сопоставить свойства схожих элементов ландшафта: незадернованных и задернованных поверхностей отвалов и залесенных шлейфов.

**Незадернованные вершины отвалов.** Незадернованные вершины и склоны отвалов можно считать наиболее экологически опасными частями рассмотренных объектов, так как помимо кислых дренажных вод они способны продуцировать токсичную пыль, распространяющуюся с ветром на многие километры [5, 10].

Свойства токсилитостратов спланированного отвала и конического террикона значительно различаются. Почвы террикона кислее, более засолены и содержат больше  $C_{орг}$  ( $p < 0.02$ ). Первые два пункта отражают более неблагоприятные условия для естественного зарастания [25, 34], последнее связано с обогащением угольными частицами.

В субстрате незадернованного участка спланированного отвала больше мелкой пыли, илистой фракции ( $p < 0.01$ ), но меньше физической глины ( $p = 0.017$ ), чем в материале террикона. Возможно, это объясняется выносом наиболее тонких частиц из более крутосклонного объекта. Содержание Ca и Fe больше в незадернованном токсилитострате спланированного участка ( $p < 0.042$ ), а Mg и S – на терриконе ( $p < 0.006$ ). Такая дифференциация может быть обусловлена локальными особенностями углевмещающей толщи, перерабатываемой на разных шахтах, либо различиями в технологическом процессе переработки и складирования материала.

**Задернованные вершины отвалов.** Растительность, находящаяся на поверхности отвалов, закрепляет грунты, что может способствовать снижению интенсивности распространения твердофазного материала ветром и текучими водами. Однако без вмешательства человека в лесостепи

Среднерусской возвышенности поверхность не-рекультивированных отвалов ПУБ может несколько десятилетий быть неблагоприятной для заселения растительностью [11], что аналогично данным и из других регионов мира [9, 22, 32, 40].

На задернованных вершинах рекультивированного и стихийно зарастающего отвалов кислотность,  $ЭП_{1:5}$  и содержание  $C_{орг}$  различаются незначительно ( $p = 0.071$ ), что отражает приближение свойств молодых почв к фоновым почвам, использованным при отсыпке материала. В задернованных токсилитостратах значимо больше крупной пыли, чем на автономных реплантоземах ( $p = 0.019$ ) ввиду различий гранулометрического состава материнских пород. Почвы вершины спланированного отвала обогащены Fe и S, обеднены Ca и Mn ( $p = 0.009$ ), относительно субстрата рекультивированного отвала, что обусловлено использованием местных природных почв, обогащенных биофильными катионогенными элементами [19].

Кислотность прогоревшего субстрата террикона достигает pH  $3.9 \pm 0.3$ , что сопоставимо с данными по литостратам в лесостепи Кузбасса, в которых pH достигает 3.1 [2], и отвалов, богатых сульфидами S, находящихся в семиаридных ландшафтах Испании [30, 35], Канады [31], Нигерии [20], Пакистана [33]. Поверхностный горизонт изучаемого рекультивированного отвала в лесостепи Тульской области соотносится по величине pH со складированным плодородным слоем почв лесостепи Кузбасса, в районе ведения открытой добычи каменного угля на разрезе Бунгурский: 6.2 и 6.8 соответственно [1].

Содержание углерода, как горючего компонента, значительно влияет на способность не-рекультивированных отвалов к самовоспламенению. Углерод субстрата вскрышных пород представлен углистым веществом литогенного, а не почвенного происхождения [2, 13], поэтому поверхностный горизонт изученных отвалов ПУБ содержит много  $C_{орг}$ : от  $1.9 \pm 2.2$  до  $11.5 \pm 5.9\%$ . В почвах литостратов терриконов Кузбасса на участках с очагами самовозгорания содержание  $C_{орг}$  достигает 21%. От вершины отвалов к подножью Кызылкийского угольного месторождения (республика Киргизия) содержание  $C_{орг}$  снижается от 34 до 4% [16]. Таким образом, высокое содержание  $C_{орг}$  – типичная черта почв отвалов угольных шахт.

**Залесенные шлейфы.** Почвы залесенных шлейфов рекультивированного и не-рекультивированного отвалов имеют схожую кислотность и  $ЭП_{1:5}$ , что отражает низкое содержание электролитов и связано с конвергенцией свойств молодых почв, формирующихся в однотипных условиях под березняками, что отмечали и для природных почв лесостепи [7, 36]. Но в токсилитостратах березня-

ков у подножия террикона в 3 раза больше  $C_{орг}$  ( $p = 0.001$ ), чем в почвах фитомелиорированного отвала, что, вероятно, связано с поступлением материала, обогащенного угольной пылью. У подножья конического террикона накапливаются наносы более тяжелого гранулометрического состава, чем около фитомелиорированного отвала: содержание физической глины и пылевых фракций выше в 1.5–1.7 раз ( $p < 0.02$ ), что находится в соответствии с обедненностью почв крутых склонов террикона тонкими частицами. Поверхностный слой шлейфа террикона значимо более обогащен Al, Fe, S, Mn (в 1.5–2 раза) относительно субстрата шлейфа рекультивированного отвала, что связано с их повышенной сорбцией тонкими частицами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые составлена серия крупномасштабных карт, отражающих пространственную дифференциацию температуры, величины pH, удельной электропроводности почвенной вытяжки и содержания гранулометрических фракций,  $C_{орг}$  и химических элементов (Al, Ca, Fe, Mg, Mn и S) в поверхностном слое почв заброшенных отвалов угольных шахт.

Окисление сульфидсодержащих минералов, находящихся в породах терриконов и отвалов, приводит к формированию сернокислой среды и засолению поверхностных техногенных образований. На сопряженных делювиально-пролювиальных шлейфах по мере удаления от террикона за счет снижения влияния сернокислых стоков, слабокислые незадернованные токсистратоземы сменяются залесенными токсистратоземами с менее кислой средой, пониженной удельной электропроводностью. На залесенных шлейфах содержание  $C_{орг}$  больше, чем в почвах залесенных и задернованных поверхностей.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Съемка местности выполнена с помощью беспилотного летательного аппарата Н.Н. Луговым и В.Р. Белявым в 2020 г. В химико-аналитических работах приняла участие Б.А. Ибрагимов. При подборе объектов исследования использованы материалы, предоставленные Центром коллективного пользования “Гео-портал” (МГУ им. М.В. Ломоносова).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 20-35-70066 (полевые, химико-аналитические работы и интерпретация результатов) и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” (построение карт).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Характеристика и местоположение ключевых участков.

Таблица S2. Значимость различий показателей свойств поверхностного слоя почв 0–10 см.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беланов И.П., Андроханов В.А. Ресурсы рекультивации и перспективы самовосстановления техногенно нарушенных территорий угольного разреза “Бунгурский” // Вестник КрасГАУ. 2013. № 11. С. 71–76.
2. Брагина П.С., Герасимова М.И. Почвообразовательные процессы на отвалах горнодобывающих предприятий (на примере юга Кемеровской области) // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 45–51.
3. Герасимова Л.П. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды от негативного воздействия породных отвалов шахт Подмосковского угольного бассейна. Автореферат дис. ... канд. техн. н. Тула, 2009. 23 с.
4. Грязев М.В., Качурин Н.М., Захаров Е.И. Горнодобывающая отрасль в экономике Тульской области. Состояние и перспективы // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2015. Вып. 2. С. 57–65.
5. Девятова А.Ю., Бортникова С.Б., Соколов Д.А., Гогсен И.Н., Соколова Н.А. Влияние Горловского угольного месторождения (Новосибирская область) на состояние приземного слоя атмосферы // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27. № 5. С. 460–470.
6. Елохина С.Н. Горнорудный техногенез постэксплуатационной стадии на территории Урала // Литосфера. 2013. № 5. С. 151–164.
7. Касимов Н.С., Самонова О.А., Асеева Е.Н. Фоновая почвенно-геохимическая структура лесостепи Приволжской возвышенности // Почвоведение. 1992. № 8. С. 5–21.
8. Качурин Н.М., Левкин Н.Д., Калаева С.З., Чистяков Я.В. Породные отвалы ликвидированных шахт Подмосковского бассейна как источник выбросов пыли в атмосферу // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 5. С. 47–51. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-5-47-51>
9. Корзников К.А., Попова К.Б. Растительные сообщества отвалов угледобычи на юге о-ва Сахалин // Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН. 2019. Вып. 21. С. 28–38. <https://doi.org/10.17581/bbgi2103>
10. Лавыгина О.Л., Степанов И.Г. Исследование эффективности методов снижения пылеобразования на золошлакоотвалах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4(35). С. 570–577. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-570-577>



11. *Леднев С.А., Шарапова А.В., Семенков И.Н., Королева Т.В.* Растительные сукцессии на отвалах угольных шахт в лесостепи Тульской области // Известия РАН. Сер. Географическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 239–245. <https://doi.org/10.31857/S2587556620020089>
12. *Никифорова Е.М., Солнцева Н.П.* Техногенные потоки серы в гумидных ландшафтах районов угледобычи // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1986. № 3. С. 52–59.
13. *Савич А.И.* Свойства вскрышных пород Подмосковского и Челябинского бурогольных бассейнов. Их классификация и мелиорация в целях биологической рекультивации. Дис. ... канд. биол. н. М., 1984. 244 с.
14. *Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е., Герасимова М.И., Алистратов С.В.* Изменение морфологии выщелоченных черноземов в районах добычи угля // Почвоведение. 1992. № 1. С. 17–29.
15. *Таразанов И.Г., Губанов Д.А.* Итоги работы угольной промышленности России за январь декабрь 2020 года // Уголь. 2020. № 3. С. 54–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69>
16. *Чекушина Т.В., Абдулатипов Ж.Ю.* Создание модели угольного террикона на основе его геолого-минералогического опробования // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Инженерные исследования. 2013. № 4. С. 89–93.
17. *Шарапова А.В., Семенков И.Н., Леднев С.А., Карначевский А.М., Королева Т.В.* Саморазвитие горнопромышленных ландшафтов старого района угледобычи в Тульской области // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 12. С. 54–59. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-12-54-59>
18. *Шарапова А.В., Семенков И.Н., Леднев С.А., Карначевский А.М., Королева Т.В.* Биохимический потенциал саморазвития посттехногенных горнопромышленных геоконструкций Подмосковского бурогольного бассейна // Уголь. 2020. № 10. С. 56–61. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-56-61>
19. *Шопина О.В., Семенков И.Н., Парамонова Т.А.* Накопление тяжелых металлов и  $^{137}\text{Cs}$  в растительной продукции, выращиваемой на радиоактивно загрязненных черноземах Тульской области // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 6. С. 48–53. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-48-53>
20. *Adewum A.J., Laniyan T.A.* Contamination, sources and risk assessments of metals in media from Anka artisanal gold mining area, Northwest Nigeria // Sci. Total Environ. 2020. V. 718. P. 137235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137235>
21. *Alekseenko V.A., Pashkevich M.A., Alekseenko A.V.* Metallisation and environmental management of mining site soils // J. Geochem. Exploration. 2017. 174. С. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.010>
22. *Cui Z., Kang H., Wang W., Guo W., Guo M., Chen Z.* Vegetation restoration restricts rill development on dump slopes in coalfields // Sci. Total Environ. 2022. 820:153203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153203>
23. *Epstein P.R., Buonocore J.J., Eckerle K., Hendryx M., Stout B. M., Heinberg R., Clapp R.W., May B., Reinhart N.L., Ahern M.M., Doshi S.K., Glustrom L.* Full cost accounting for the life cycle of coal // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2011. V. 1219. № 1. P. 73–98. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x>
24. Framework convention on climate change. Adoption of the Paris agreement. United Nations, 2015. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>. (Accessed 10.07.2021).
25. *Kompała-Bąba A., Sierka E., Dyderski M.K., Bierzka W., Magurno F., Besenyei L., Błońska A., Ryś K., Jagodziński A.M., Woźniak G.* Do the dominant plant species impact the substrate and vegetation composition of post-coal mining spoil heaps // Ecological Engineering. 2020. V. 143. P. 105685. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105685>
26. *Fang A., Bao M., Chen W., Dong J.* Assessment of Surface Ecological Quality of Grassland Mining Area and Identification of Its Impact Range // Nat. Resour. Res. 2021. V. 30. P. 3819–3837. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09868-8>
27. *Hengen T.J., Squillace M.K., O'Sullivan A.S., Stone J.J.* Life cycle assessment analysis of active and passive acid mine drainage treatment technologies // Resources, Conservation and Recycling. 2014. V. 86. P. 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.01.003>
28. *Krechetov P., Chernitsova O., Sharapova A., Terskaya E.* Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas // Journal of Soils and Sediments. 2019. V. 19. № 8. P. 3139–3154. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2010-7>
29. *Krechetov P., Kostin A., Chernitsova O., Terskaya E.* Environmental changes due to wet disposal of wastes from coal-fired heat power plant: A case study from the Tula Region, Central Russia // Appl. Geochem. 2019. V. 105. P. 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.017>
30. *Madejón P., Caro-Moreno D., Navarro-Fernández C.M., Rossini-Oliva S., Marañón T.* Rehabilitation of waste rock piles: impact of acid drainage on potential toxicity by trace elements in plants and soil // J. Environ. Managem. 2021. V. 280. P. 111848. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111848>
31. *McGregor R.G., Blowes D.W., Jambor J.L., Robertson W.D.* The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff Tailings Area, Sudbury, Ontario, Canada // J. Contaminant Hydrology. 1998. V. 33. P. 247–271. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(98\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(98)00060-6)
32. *Mikheeva I.V., Androkhonov V.A.* Physical properties of technosols at brown coal mine wastes in Eastern Siberia // Soil Tillage Res. 2022. V. 217. P. 105264. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105264>
33. *Muneeb A., Ahmad I., Hameed M., Bashir H.* Status of soil and water pollution at the largest coal mining area of Punjab, Pakistan // Fresenius Environ. Bull. 2021. V. 30. P. 441–447.
34. *Rahmonov O., Krzysztofik R., Środe, D., Smolarek-Lach J.* Vegetation- and Environmental Changes on Non-Reclaimed Spoil Heaps in Southern Poland // Biology (Basel). 2020. V. 9. P. 164. <https://doi.org/10.3390/biology9070164>

35. *Sánchez-Donoso R., García Lorenzo M.L., Esbrí J.M., García-Noguero E.M., Higuera P., Crespo E.* Geochemical characterization and trace-element mobility assessment for metallic mine reclamation in soils affected by mine activities in the Iberian pyrite belt // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 6 P. 233. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060233>
36. *Semenkov I.N., Koroleva T.V.* The spatial distribution of fractions and the total content of 24 chemical elements in soil catenas within a small gully's catchment area in the Trans Urals, Russia // *Applied geochem.* 2019. V. 106. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.010>
37. *Semenkov I., Sharapova A., Lednev S., Yudina N., Karpachevskiy A., Klink G., Koroleva T.* Geochemical partitioning of heavy metals and metalloids in the ecosystems of abandoned mine sites: a case study within the Moscow Brown Coal Basin // *Water*. 2022. V. 14. № 1. P. 113. <https://doi.org/10.3390/w14010113>
38. *Sharapova A.V., Semenov I.N., Karpachevskiy A.M., Lednev S.A., Koroleva T.V.* Morphological and chemical properties of soils within geological complexes affected by sulfuric acid in forest-steppe of the Central Russian Upland (Russia) // *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 862. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/862/1/012013>
39. *Skrobala V., Popovych V., Pinder V.* Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin // *Mining of Mineral Deposits*. 2020. V. 14. № 2. P. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.119>
40. *Smoliński A., Dombek V., Pertile E., Drobek L., Gogola K., Żechowska S.W., Magdziarczyk M.* An analysis of self-ignition of mine waste dumps in terms of environmental protection in industrial areas in Poland // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. № 1. P. 8851. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88470-7>
41. *Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V.* Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2021. V. 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>
42. *Tao M., Chen W., Nie K., Zhang X., Cao W.* Life cycle assessment of underground coal mining in China // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 805. P. 150231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150231>
43. *Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Osovetsky B., Belkin P.* Environmental Assessment Impact of Acid Mine Drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia) // *Water*. 2022. V. 14. P. 727. <https://doi.org/10.3390/w14050727>
44. *Wang J., Wang R., Zhu Yu., Li J.* Life cycle assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China // *Energy Policy*. 2018. V. 115. P. 374–384. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.040>
45. *Zhou A., Hu J., Wang K.* Carbon emission assessment and control measures for coal mining in China // *Environ. Earth Sci.* 2020. V. 79. P. 461. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09189-8>

## Spatial Differentiation of the Topsoil Properties at the Spoil Heaps of the Moscow Coal Basin (Central Russian Forest Steppe)

N. A. Yudina<sup>1</sup>, I. N. Semenov<sup>1,\*</sup>, A. V. Sharapova<sup>1</sup>, S. A. Lednev<sup>1</sup>, and T. V. Koroleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: semenkov@geogr.msu.ru*

In this article, we described the properties of soils in the area of the former extraction of high-sulfur brown coals (north of the Central Russian Upland, Tula region). Three key areas containing one technogenic object are considered: a conical non-remediated dump, a planned heap or a revegetated dump. For the 0–10 cm topsoil layer, a series of maps of temperature, pH, electrical conductivity (EC) of water extract, content of granulometric fractions, soil organic carbon, and chemical elements (Al, Ca, Fe, Mg, Mn, and S) was compiled. The conical heap is covered by Spolic Technosols (Loamic), the dark topsoil of which is characterized by a strongly acidic reaction ( $\text{pH } 3.2 \pm 0.5$ ) and increased electrical conductivity ( $1.72 \pm 0.07 \text{ dS/m}$ ). In areas composed of burnt material, there are clarified and cooler (by  $4.5^\circ\text{C}$ ) Technosols (Loamic), which have lower acidity (by 0.7 pH units,  $p = 0.022$ ) and electrolyte content (by 2.4 times,  $p = 0.022$ ). The loamic soils of the planned heap are represented by Spolic Technosols and Regosols. Plant covered soils contain more fraction of the particles with a diameter as less as  $10 \mu\text{m}$ , have higher pH values and lower EC and the content of potentially toxic Al, Fe, Mn and S, as well as Ca ( $p < 0.001$ ) relative to bareground with insignificant differences in total organic carbon (TOC) content. Anthrosols (Loamic, Transportic) of the revegetated dump have a neutral reaction due to the use of natural soil material and are poorly differentiated according to the proxies analyzed, with the exception of an increased S content and a reduced Ca content in the steep slopes ( $p < 0.01$ ), which is probably caused by the influence of the acid mine drainage.

**Keywords:** soil pollution, coal mining, acid mine drainage, Chernozems, Technosols, GIS analysis, spatial differentiation, Regosols over Phaeozems, black soils, partitioning