

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 631.618

doi: 10.17223/19988591/43/1

**А.О. Константинов<sup>1</sup>, А.А. Новоселов<sup>2</sup>, С.В. Лойко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

### **Особенности процессов почвообразования на участках самозарастающих золоотвалов твёрдотопливной теплоэлектростанции**

Рассмотрены особенности почв, формирующихся на участках самозарастающих золоотвалов ТЭЦ-1 г. Тюмени. Изученные почвы характеризуются наличием гумусово-слаборазвитого горизонта W, переходного WTCHQ и стратифицированной толщи техногенных отложений, представляющей собой чередование слоев золы уноса и зольного остатка, различающихся по плотности, гранулометрическому и вещественному составу. Слои, сложенные золой уноса, характеризуются преобладанием фракций пыли и состоят преимущественно из силикатных и алюмосиликатных пористых окатышей и микросфер. Слои зольного остатка отличаются значительным содержанием фракций песка, в составе преобладают крупные угловатые частицы недожога и зерна кварца. Показано, что изучение почв и техногенных субстратов целесообразно проводить на мезо-, микро- и субмикроморфологических уровнях, поскольку ряд элементарных почвообразовательных процессов проявляется только на конкретных иерархических уровнях. Наиболее значимыми процессами в изученных почвах являются дезинтеграция техногенного субстрата, карбонатизация, коагуляционное, в меньшей степени, биогенное оструктуривание, выщелачивание, процессы метаморфизма органического вещества, миграции вещества в суспензиях. Оглеение наблюдается в локальных понижениях рельефа в условиях близкого залегания грунтовых вод. Процессы дезинтеграции, коагуляционного оструктурирования, карбонатизации, выщелачивания хотя и играют важную роль в понимании направленности развития почв золоотвалов, диагностируются только при микро- и субмикроморфологических исследованиях. Установлено, что интенсивность процессов почвообразования в значительной степени определяется особенностями рельефа, характером растительности и неоднородностью техногенного субстрата. Разнообразие и количество педогенных карбонатов является важным индикатором интенсивности почвообразования. Наиболее развитые почвы формируются на хорошо дренированных участках под разреженными древесными сообществами с развитым травянистым ярусом в периферийных частях золоотвалов.

**Ключевые слова:** ТЭЦ; почвообразовательные процессы; техногенные почвы; пелоземы техногенные; *Spolic Technosols*.

## Введение

Твердотопливные тепловые электростанции являются важным источником электроэнергии как в России, так и в других странах мира. Производство электроэнергии за счет сжигания горючих полезных ископаемых угольного ряда приводит к образованию значительного объема промышленных отходов, представляющих собой высокодисперсный песчано-пылеватый материал золы уноса и топливных шлаков [1]. Примеры успешного использования золошлаковых отходов в качестве строительного или техногенного сырья для извлечения ценных компонентов единичны. Наиболее распространенной практикой обращения с отходами твердотопливных тепловых электростанций является их размещение в специальных гидротехнических сооружениях – золоотвалах [2].

В крупных городах Урала, Сибири и Дальнего Востока, таких как Троицк, Серов, Тюмень, Омск, Томск, Новосибирск, Барнаул, Красноярск, Хабаровск, Владивосток и др. [2], имеются как действующие, так и законсервированные золоотвалы, которые могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду вследствие пыления, радиационного загрязнения местности, отчуждения земель и изменения гидрологических условий [1, 3]. Следовательно, для оценки потенциальных экологических рисков, связанных с долгосрочным функционированием подобных объектов, и при планировании рекультивации является актуальным изучение процессов формирования растительного и почвенного покровов в пределах данных территорий.

В современной отечественной и зарубежной литературе достаточно подробно освещены вопросы формирования и развития растительных сообществ золоотвалов [4–6], а также методы их биологической рекультивации [7–9], но в то же время особенности почв и техногенных субстратов рассматриваются поверхностно, в основном, с точки зрения их лесорастительных, агрохимических и реже физическо-механических свойств, устойчивости к эрозионным процессам [10–11]. В мире наиболее подробно охарактеризованы почвы разновозрастных золоотвалов тепловых электростанций Рурского и Силезского угольных бассейнов в Центральной и Восточной Европе [12–15]. Результаты исследований территорий рекультивированных и самозарастающих золоотвалов ТЭЦ Польши и Германии позволили установить, что формирование и развитие почв на золошлаковых отходах во многом определяются характером использованного топлива, а процессы почвообразования непосредственно связаны с трансформацией вещественного состава исходного техногенного субстрата [16].

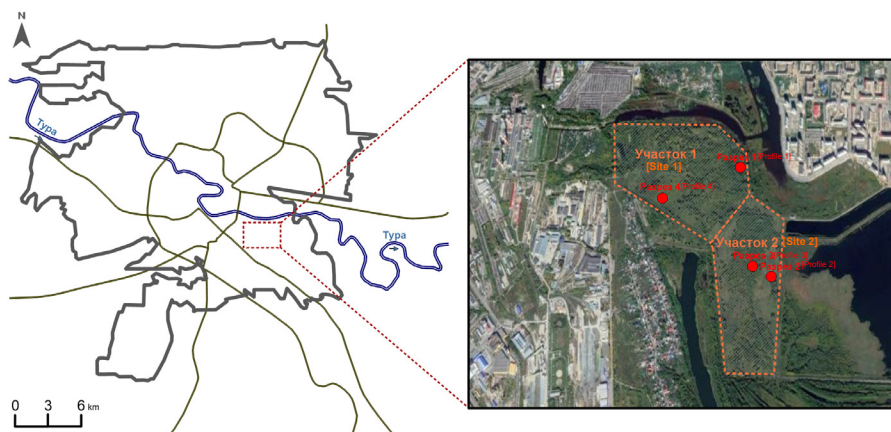
В настоящей работе представлены результаты исследования процессов почвообразования на золоотвалах ТЭЦ-1 г. Тюмени. В отличие от большинства золоотвалов крупных электростанций Урала и Западной Сибири,

золошлаковые отходы ТЭЦ-1 являются продуктом сжигания торфов Тарманского месторождения Тюменской области, а не угля [17]. Первичное почвообразование протекает 30–35 лет с момента прекращения функционирования исследуемых участков золоотвала. Рекультивация золоотвалов не производилась.

Цель работы – изучить на участках самозрастающих золоотвалов характер, интенсивность и разнообразие почвообразовательных процессов на основе признаков трансформации исходного субстрата на различных иерархических уровнях организации почвенной массы.

### Материалы и методики исследования

Золоотвалы Тюменской ТЭЦ-1 состоят из двух участков общей площадью более 100 га (участок 1 – 54,0 га, участок 2 – 46,0 га) [18] и располагаются в непосредственной близости от делового и исторического центра города (рис. 1). Размещение золошлаковых отходов прекращено более 30 лет назад по причине перехода ТЭЦ-1 на использование газа; в настоящее время в пределах территории отвалов происходит постепенное самозарастание [19]. Поверхность золоотвалов выровнена, встречаются просадочные формы рельефа, перепад высот составляет 1–3 м. Более разнообразный и сложный рельеф характерен для участка 1. Уровень грунтовых вод существенно варьирует в зависимости от положения в рельефе: от 0,5–0,6 м в локальных понижениях и до 2 м и более на возвышенных участках.



**Рис. 1.** Расположение почвенных разрезов в пределах золоотвалов ТЭЦ-1 г. Тюмени

[Fig. 1. Location of the studied soil pits within the fly ash deposit sites of Tyumen CHP-1 plant.

Profile 1 - 57°8'47,30"N, 65°38'8,70"E; Profile 2 - 57°8'23,50"N, 65°38'22,80"E;

Profile 3 - 57°8'23,90"N, 65°38'17,80"E; Profile 4 - 57°8'38,10"N, 65°37'30,50"E]

Современный растительный покров мозаичен; представлены два основных вида растительных сообществ – древесно-кустарничковые и травяни-

стые [18]. Для первых основными ярусобразующими породами являются тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.), осина (*Populus tremula* L.), различные виды ив, в меньшей степени клен ясенелистный (*Acer negundo* L.). Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) встречается редко, а участки ее распространения тяготеют к периферийным частям золоотвала. Открытые пространства, покрытые травянистой растительностью, занимают около половины площади участка 1 и менее трети участка 2. В травянистых сообществах преобладают вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.); значительную роль играют крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), хамаенерион узколистный (*Epilobium angustifolium* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.). В 2007–2008 гг. сотрудниками Уральского государственного лесотехнического университета проведен экспериментальный посев травосмесей на участке 1 [17, 19].

Полевые исследования почвенного покрова золоотвалов Тюменской ТЭЦ-1 проведены летом 2017 г. На каждом из участков золоотвалов заложена пара почвенных разрезов (см. рис. 1) под древесной и травянистой растительностью (разрезы 1 и 4, 2 и 3 соответственно). Поскольку вопрос включения техногенных почв в КиДПР остается открытым, что порождает многообразие возможных подходов к его решению в рамках конкретной задачи, в данной работе диагностика почв проведена согласно классификации почв России [20] с учетом дополнений, предложенных для техногенных почв [21–22]. Названия почв также даны согласно Мировой коррелятивной базе данных почвенных ресурсов редакции 2015 г. [23].

Разрез 1 (57°8'47,30"N, 65°38'8,70"E) заложен на локальном возвышении в периферийной части участка 1 под разреженным ивовым лесом с подростом ивы и осины и развитым травянистым ярусом. Почва – пелозем техногенный гумусовый потечно-гумусовый артииндустриальный суглинистый стратифицированный на золошлаках (*Spolic Technosol* (*Arenic*, *Endoprotocalcic*, *Fluvic*, *Hyperartefactic*, *Laxic*, *Amphivitic*)). Разрез 2 (57°8'23,50"N, 65°38'22,80"E) приурочен к выположенной поверхности участка 2, осложнённой просадочными формами, под лугово-травянистой ассоциацией с присутствием злаковых. Почва – пелозем техногенный гумусово-слаборазвитый артииндустриальный стратифицированный суглинистый на золошлаках (*Spolic Technosol* (*Epiarenic*, *Endoprotocalcic*, *Fluvic*, *Hyperartefactic*, *Laxic*, *Amphivitic*)). Разрез 3 (57°8'23,90"N, 65°38'17,80"E), характеризует локальное понижение на участке 2. Растительность представлена осиново-ивовым лесом с развитой подстилкой. Почва – пелозем техногенный подстильно-торфяной глееватый артииндустриальный стратифицированный суглинистый на золошлаках (*Spolic Technosol* (*Endoprotocalcic*, *Fluvic*, *Hyperartefactic*, *Laxic*, *Stagnic*, *Amphivitic*)). Разрез 4 (57°8'38,10"N, 65°37'30,50"E) заложен на участке 1 вместе с выраженным техногенным присадочным рельефом. Характерна луговая растительность с подростом ивы, осины и облепихи. Почва – пелозем

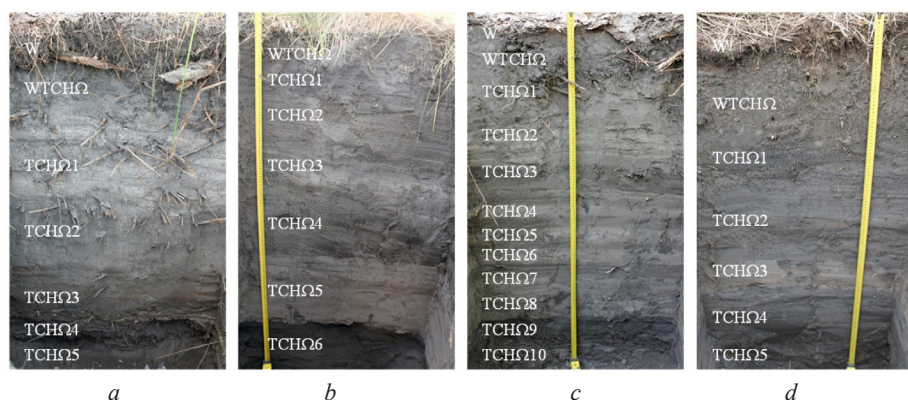
техногенный гумусовый глееватый артииндустратный суглинистый стратифицированный на золошлаках (*Spolic Technosol (Amphiprotocalcic, Fluvic, Hyperartefactic, Loxic, Amphivitrific)*).

Гранулометрический состав почв и техногенных отложений определен на основе измерения размеров частиц методом лазерного светорассеяния анализатором LS 13 320 «Beckman Coulter» (США) с предварительным диспергированием проб пирофосфатом натрия. Цвет почвенных горизонтов и техногенного субстрата оценивали по системе Манселла. Микроморфологические исследования проведены в прозрачных шлифах поляризационным микроскопом Eclipse LV100POL «Nikon» (Япония) и инвертированным микроскопом отраженного света Axio Vert.A1 «Carl Zeiss» (Германия). Микроскопические и субмикроскопические исследования – с использованием сканирующего электронного микроскопа TM3000 «Hitachi» (Япония) с рентгеновской приставкой для элементного анализа поверхности Quantax 70 при увеличениях от 100 до 5 000. Данная модель микроскопа является эффективным инструментом диагностики процессов почвообразования в техногенных почвах [24].

### Результаты исследования и обсуждение

**Морфологическая характеристика почв.** Почвы золоотвалов ТЭЦ-1 характеризуются наличием гумусово-слаборазвитого горизонта W мощностью до 5–7 см и переходного к техногенному субстрату горизонта WTCHΩ (15–30 см), нижняя граница которого лучше выражена на участках под древесной растительностью, и устанавливается по увеличению степени сохранности изначальной текстуры субстрата, в меньшей степени по цвету, а также резкому уменьшению числа крупных горизонтальных корней деревьев (рис. 2). В изученных почвах мощность гумусового горизонта не превышает 5 см, а сам горизонт представляет собой темный маломощный слой, густо переплетенный живыми корнями, что позволяет рассматривать его в рамках принятой классификации как гумусовый слаборазвитый (W). Нижележащий переходный горизонт WTCHΩ выделен как зона интенсивной переработки золошлаковых отложений процессами почвообразования, что морфологически выражено в обилии корней и частичной потере исходной слоистой текстуры техногенного субстрата. Горизонты W и WTCHΩ имеют темно-серый (10YR 4/1) или черно-серый (2,5YR 3/1), унаследованный от техногенного субстрата, содержащего большое количество темноцветных частиц недожого. Таким образом, темный цвет обусловлен не процессами гумусонакопления, а исходными хроматическими особенностями техногенного субстрата. В отдельных случаях (разрез 3) на участках под древесной растительностью формируется лесная подстилка, состоящая из листьев осины и ивы различной степени разложения. Артииндустраты под незадернованными участками в составе почвенного покрова отсутствуют.

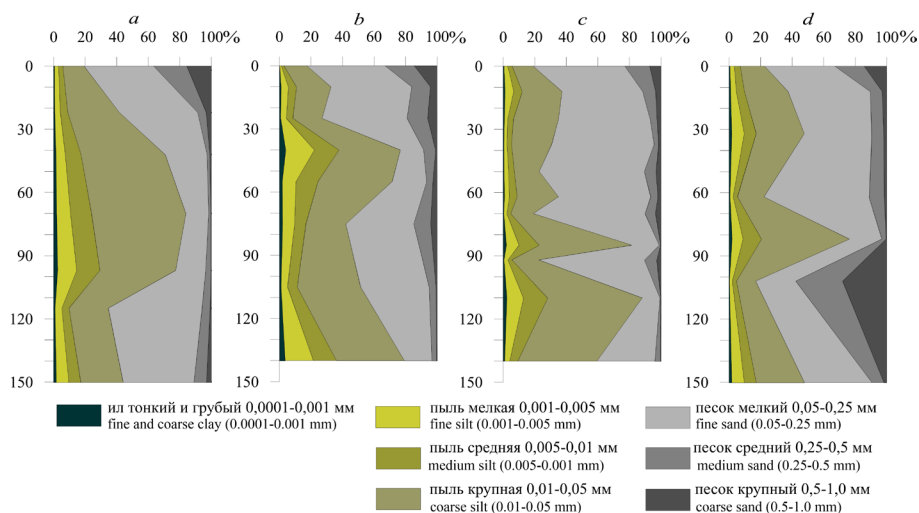




**Рис. 2.** Профили исследованных почв: *a* – разрез 1; *b* – разрез 2; *c* – разрез 3; *d* – разрез 4. Автор фото А.О. Константинов  
**[Fig. 2.** Soil profiles: *a* - Pit 1; *b* - Pit 2; *c* - Pit 4; *d* - Pit 4. Photos by AO Konstantinov]

Техногенный субстрат представляет собой чередование плотных слоев крупнопылеватого плотно спрессованного сизовато-серого (2,5Y 5/1, 2,5Y 6/1) и буровато-коричневого (10YR 2/2) материала, иногда с кремовым оттенком (10YR 5/2), чередующихся с рыхлыми темно-серыми (N2,5, 2,5Y 3/1, 2,5Y 2,5/1) прослоями песчаного материала, иногда с включениями крупных частиц ( $\geq 2$  мм) недожога и строительного мусора. Содержание отдельных фракций изменяется в значительных пределах (рис. 3): ил ( $< 0,001$  мм) – 1–6%, пыль мелкая (0,001–0,005 мм) – 4–27%, пыль средняя (0,005–0,01 мм) – 3–23%, пыль крупная (0,01–0,05 мм) – 14–53%, песок мелкий (0,05–0,25 мм) – 4–65%, песок средний и крупный (0,25–1,0 мм) – 1–28%. Подобные вариации в содержании отдельных фракций связаны с четкой стратификацией техногенных субстратов на слои золы уноса с заметным преобладанием пылеватых частиц и слои зольного остатка с преобладанием песчаной фракции.

Вертикальная неоднородность в почвах и отложениях золоотвалов проявляется на нескольких уровнях: помимо хорошо заметных пылеватых и опесчаненных слоев мощностью от 1 до 10 см, наблюдается переслаивание с ритмичным чередованием (см. рис. 2). В светлом плотном субстрате присутствуют неравномерно распределенные прослои, обогащенные темноцветным и более крупным материалом размерности мелкозернистого песка. На таких границах как в нижней, так и средней части профилей иногда заметны тонкие охристые разводы и высветленные пятна, диаметром до 2 мм, что, по всей видимости, является следствием локального оглеения, связанного с гранулометрической неоднородностью субстрата. Признаки педогенного оструктурирования в рассматриваемых почвах выражены слабо, имеются непрочные мелкокомковатые агрегаты в горизонте W. Корневые системы проникают до 90–100 см, где представлены множеством мелких корней.



**Рис. 3.** Гранулометрический состав исследованных почв:

*a* – разрез 1; *b* – разрез 2; *c* – разрез 3; *d* – разрез 4

[Fig. 3. Texture of the studied soils: *a* - Pit 1; *b* - Pit 2; *c* - Pit 3; *d* - Pit 4]

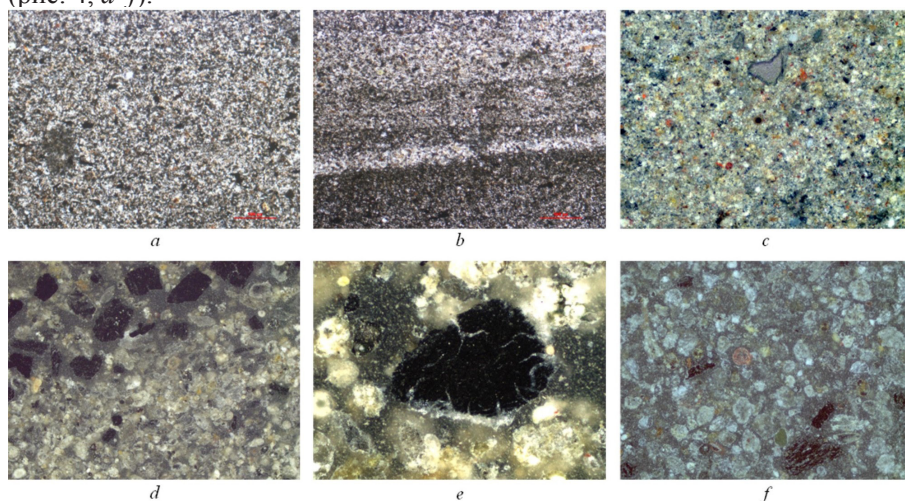
Отличительной особенностью пелозема техногенного гумусового, вскрытого разрезом 1 (рис. 2, *a*), является высокая степень переработанности исходного техногенного субстрата за счет активного развития корневых систем древесных растений. Потечно-гумусовый подтип диагностирован по наличию темной прокраски органическим веществом в верхней части техногенного субстрата. Мощность измененной процессами почвообразования толщи ( $W+WTCH\Omega$ ) составляет 30–35 см. В пелоземе техногенном гумусово-слабо-развитом (разрез 2, см. рис. 2, *b*) суммарная мощность  $W+WTCH\Omega$  меньше и составляет 20–25 см, что, возможно, связано с меньшей длительностью почвообразования в пределах данного участка золоотвалов. Пелозем техногенный подстильно-торфяной глееватый (см. рис. 2, *c*), вскрытый разрезом 3, имеет хорошо развитую оторфованную лесную подстилку. Появление лесной подстилки связано с тем, что этот разрез наиболее влажный. Он также отличается наиболее высокой степенью стратификации техногенного субстрата, а также сохранностью его изначальной текстуры, что связано с плохими условиями проникновения корней из-за наличия почвенно-грунтовых вод, что диагностируют заметные на глубине 80–110 см признаки оглеения. Мощность  $W+WTCH\Omega$  минимальна среди всех разрезов и не превышает 20 см. Пелозем техногенный гумусовый глееватый (разрез 4) имеет наибольшую суммарную мощность  $W+WTCH\Omega$ , которая варьирует от 35 до 40 см.

**Микроморфологические особенности почв.** Результаты микроморфологических исследований позволяют сделать вывод о том, что техногенный глинисто-пылеватый субстрат отдельных слоев является достаточно одно-

родным по составу. Большая часть зерен имеет изометричную форму, меньше угловатых слабоокатанных частиц (рис. 4, *a–c*). Частицы, как правило, не ориентированы, за исключением прослоев, обогащенных органическим веществом.

В большинстве изученных образцов наблюдается характерная для техногенных отложений текстура, выраженная в чередовании прослоев с заметными различиями как в размерности зерен, так и в характере материала (рис. 4, *b, d*). Мощность отдельных прослоев в основном выдержана, границы четкие. На текстурных неоднородностях встречаются осветленные участки.

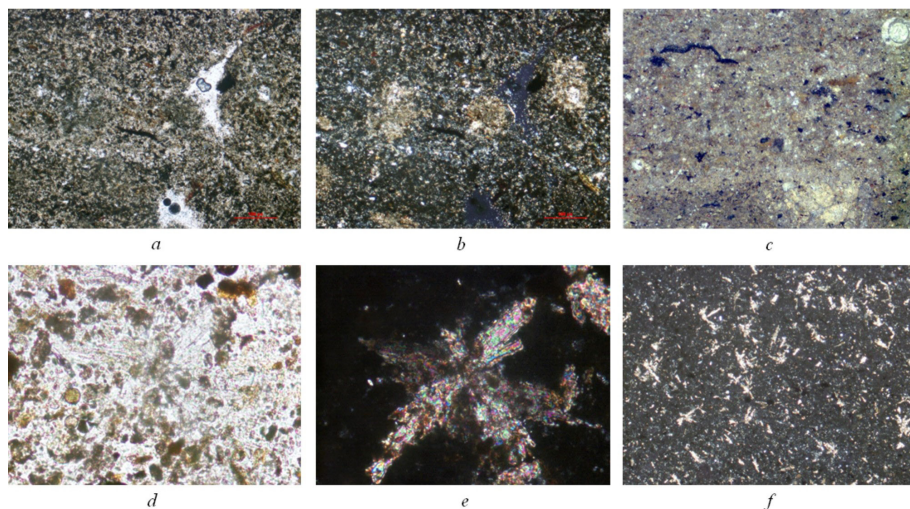
В зависимости от разреза и конкретного слоя субстрат на 10–20% состоит из микросфер, существенно отличающихся между собой по размеру, морфологии и составу. Округлые, как правило, полые сферические частицы, являющиеся результатом высокотемпературных процессов сжигания топлива [25–26], могут быть условно разделены на кремнистые и железосодержащие [27]. Микросферы в плоскости шлифа распределены равномерно без какой-либо связи с текстурными особенностями отложений (рис. 4, *e, f*). Также в составе присутствуют углистые трещиноватые частицы недожога (рис. 4, *d–f*).



**Рис. 4.** Особенности микростроения субстрата золоотвалов: *a* – общий вид пылеватого субстрата (разрез 1, 80–90 см, PPL, X10); *b* – микрослоистая текстура (разрез 1, 80–90 см, PPL, X10); *c* – общий вид пылеватого субстрата (разрез 1, 60–70, PPL, X10); *d* – прослой, обогащенный частицами недожога (разрез 3, 20–30 см, PPL, X20); *e* – крупная частица недожога (разрез 3, 20–30 см, PPL, X50); *f* – микросферы и частицы недожога (разрез 4, 65–70 см, PPL, X10). Автор фото А.А. Новоселов [Fig. 4. Peculiarities of fly ash soil-forming material: *a* - General view of the technogenic silty material (Pit 1, 80-90 cm, PPL, X10); *b* - Microlayered texture (Pit 1, 80-90 cm, PPL, X10), *c* - General view of the technogenic silty material (Pit 1, 60-70 cm, PPL, X10), *d* - Layer enriched with unburned (coked) fragments (Pit 3, 20-30 cm, PPL, X20), *e* - Large particle of coked material (Pit 3, 20-30 cm, PPL, X50), *f* - Cenospheres and coked particles (Pit 4, 65-70 cm, PPL, X10). Photos by AA Novoselov]



Карбонатный материал представлен двумя типами: стяжения и сростки микрокристаллов (рис. 5, *a–c*). По составу и внутреннему строению стяжения достаточно однородны, состоят из кальцита и встречаются как в виде единичных микроконкреций (разрез 2), так и небольшими скоплениями. Новообразования тяготеют к неоднородностям текстуры, в отдельных случаях формируя прослои, обогащенные карбонатным материалом, который выступает в качестве цемента. Стяжения имеют округлую форму с нечеткими границами; кальцит в таких агрегатах развивается по субстрату, частично его замещая. Размер микроконкреций составляет 1–2 мм в диаметре, а их скопление в отдельных случаях создаёт гнездоватую текстуру.

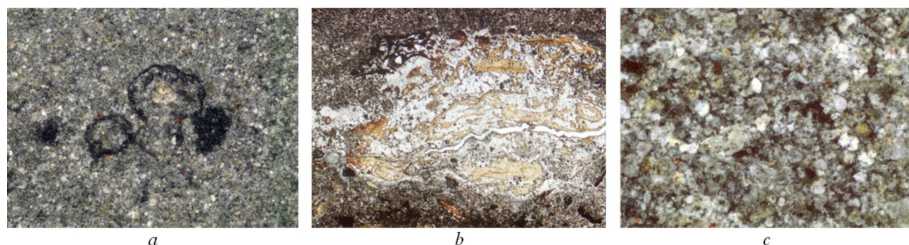


**Рис. 5.** Разнообразие карбонатных новообразований в почвах золоотвалов: *a* – стяжения кальцита, приуроченные к неоднородности текстуры (разрез 1, 60–70 см, PPL, X10); *b* – то же (XPL, X10); *c* – четко выраженное стяжение кальцита, приуроченное к неоднородности текстуры (разрез 1, 80–90 см, PPL, X50); *d* – микрокристаллы кальцита (разрез 4, 80–90 см, PPL, X40); *e* – то же (XPL, X40), *f* – распределение микрокристаллического кальцита в шлифе (разрез 4, 80–90 см, XPL, X4). Автор фото А.А. Новоселов

[Fig. 5. Diversity of calcite neoformations in soils of fly ash deposit sites: *a* - Calcite concretions associated with texture heterogeneity (Pit 1, 60-70 cm, PPL, X10), *b* - *ibid.* (XPL, X10), *c* - Well-defined calcite concretion associated with a texture contact (Pit 1, 80-90 cm, X50); *d* - Calcite microcrystals (Pit 4, 80-90 cm, PPL, X40), *e* - *ibid.* (XPL, X40), *f* - Distribution of calcite microcrystals within the thin section (Pit 4, 80-90 cm, XPL, X4). Photos by AA Novoselov]

Микрокристаллический кальцит распределен равномерно и представляют собой мелкие, размером не более 0,3 мм, сноповидные (звездчатые) сростки вытянутых кристаллов. Данный тип новообразований обнаружен только в разрезе 4 (80–90 см) (рис. 5, *d–f*). Четких центров кристаллизации у таких форм, как правило, нет, а ориентация отдельных кристаллов хаотичная. Максимально высокое содержание аутигенного карбонатного материала отмечается в разрезах 1 и 4 в интервалах от 50 до 90 см; редкие стяжения кальцита обнаружены также в разрезе 2.

Текстура техногенных субстратов нарушается корневой системой растений, реже – ходами почвенных животных (рис. 6, *a–c*). Корни частично углефицированы, кроме того, в некоторых разрезах на глубине около 80–90 см наблюдаются прослои, обогащенные органическим веществом, привнос которого мог произойти в результате эрозионных процессов, существовавших в период функционирования золоотвалов. Одновременно обнаруживаются растительные остатки как с достаточно высокой, так и с низкой сохранностью тканевого строения. Также встречаются отдельные фрагменты корней с полностью сохранившимся клеточным строением и биогенные включения; местами отмершие корни замещены аморфным кремнеземом.

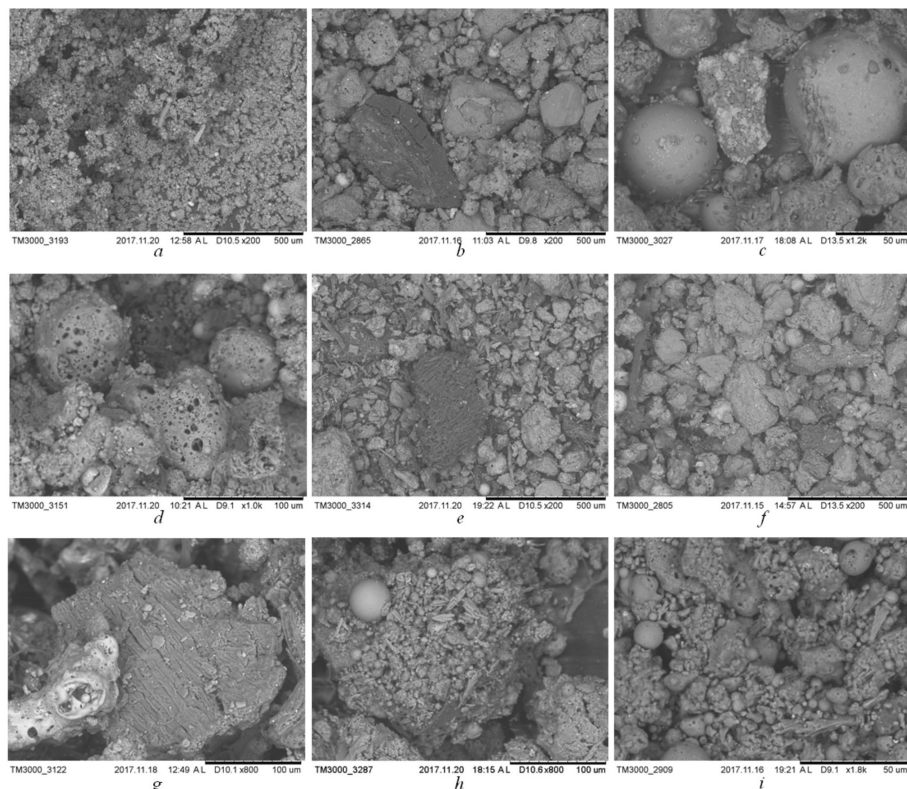


**Рис. 6.** Компоненты органического вещества почв золоотвалов и биогенные нарушения: *a* – углефицированный корень (разрез 2, 20–40 см, PPL, X10); *b* – фрагменты корневой системы различной степени сохранности (разрез 1, 80–90 см, PPL, X4); *c* – заполненный ход (разрез 3, 80–90, PPL, X20). Автор фото А.А. Новоселов  
**[Fig. 6.** Components of the fly ash deposits sits soil organic matter and biogenic disturbance: *a* - Carbonized roots (Pit 2, 20-40 cm, PPL, X10); *b* - Fragments of root system with different degrees of transformation (Pit 1, 80-90 cm, PPL, X4); *c* - Filled gallery (Pit 3, 80-90 cm, PPL, X20). Photos by AA Novoselov]

**Микро- и субмикроморфологические исследования с использованием сканирующего электронного микроскопа.** Использование сканирующего электронного микроскопа позволяет существенно дополнить результаты изучения почв и отложений золоотвалов в шлифах, в частности, уточнить различия между слоями техногенного субстрата, сложенными золой уноса и зольным остатком [28–29]. Первые состоят преимущественно из окатанных пористых частиц силикатов, алюмосиликатов, ферросиликатов и микросфер диаметром от 400 до 20 мкм, различающихся как по морфологии и характеру поверхности, так и по вещественному составу (рис. 7, *a–b*). В составе зольного остатка, помимо микросфер и алюмосиликатов, встречаются углеподобные трещиноватые частицы неправильной формы, крупные угловатые зерна кварца, полевые шпаты, слюды (рис. 7, *c–d*).

Под электронным микроскопом хорошо диагностируются признаки педогенного оструктурирования в горизонтах W и WTCHΩ верхней части профиля (рис. 7, *e–f*). В целом педогенные агрегаты немногочисленны, а процессы структурообразования неотделимы от процессов разрушения исходного

субстрата (рис. 7, g), что в целом характерно для молодых почв отвалов и хвостохранилищ [30].



**Рис. 7.** Микрофотографии почв и техногенного субстрата золоотвалов, а также их отдельных элементов, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа: *a* – общий вид материала из пылеватого прослоя золы уноса (разрез 4, 80–85 см, X200); *b* – общий вид прослоя, сложенного преимущественно песчаным материалом зольного остатка (разрез 3, 115 см, X200); *c* – алюмосиликатные сферы и железосодержащая частица (разрез 1, 150 см, X1.2k); *d* – пористые алюмосиликатные окатыши (разрез 4, 110 см, X1.0k); *e* – общий вид горизонта W с признаками педогенного оструктурирования (разрез 2, 0–5 см, X200); *f* – общий вид переходного горизонта WTCHΩ (разрез 3, 10–15 см, X200); *g* – выветрелые частицы исходного субстрата (разрез 1, 0–5 см, X800); *h, i* – новообразования кальцита (разрез 4, 10–15 см, X800 и разрез 3, 110 см, X1.8k, соответственно). Автор фото А.О. Константинов

[Fig. 7. Microphotographs of soil horizons and technogenic parent material as well as their constituents obtained with SEM: *a* - General view of the silty layer composed from fly ash (Pit 4, 80-85 cm, X200); *b* - General view of the layer composed of sand-like unburned material (Pit 3, 115 cm, X200); *c* - Cecospheres and iron-bearing particle (Pit 1, 150 cm, X1.2k); *d* - Porous aluminosilicate pellets (Pit 4, 110 cm, X1.0k); *e* - General view of the W soil horizon where signs of pedogenic structure are visible (Pit 2, 0-5 cm, X200); *f* - General view of the transitional horizon WTCHΩ (Pit 3, 10-15 cm, X200); *g* - Weathered particles of the initial substrate (Pit 1, 0-5 cm, X800); *h, i* - Calcite neoformations (Pit 4, 10-15 cm, X800 and Pit 3, 110 cm, X1.8k). Photos by AO Konstantinov]

Микроагрегаты в верхней части профиля в значительной степени наследуют исходную структуру техногенных отложений («окатыши»); на поверхности отдельных зерен аккумулируются («налипают») мелкие угловатые фрагменты частиц пористых шлаков и недожога. Биогенные процессы играют важную роль в фрагментации и разрушении исходного субстрата, в ряде случаев обнаруживаются мелкие гифы грибов, опоясывающие отдельные зерна. Частицы мелкозема в основном имеют плитчатую или пластинчатую форму.

Использование сканирующей электронной микроскопии позволило уточнить особенности распределения новообразований кальцита в профиле почв золоотвалов. Установлено, что количество и местонахождение игольчатых микрокристаллов кальцита являются важным индикатором интенсивности почвообразовательных процессов [31]. Педогенные карбонаты обнаружены в разрезе 3, а также в верхней части профиля (разрез 4 – 15 см), что невозможно при изучении в шлифах (рис. 7,  $h-i$ ).

**Выраженность и разнообразие элементарных почвообразовательных процессов (ЭПП).** В описании и систематике почвообразующих процессов авторы опирались на концепцию элементарных почвообразовательных процессов [32].

Основная группа почвообразовательных процессов, выраженных во всех рассматриваемых почвах, связана с метаморфизмом минерального вещества – дезинтеграцией, проявляющейся в разрушении исходных силикатных, алюмосиликатных и углеродосодержащих частиц техногенных отложений. Процессы разрушения и измельчения субстрата, происходящие в почвах золоотвалов, аналогичны процессам выветривания вулканического пепла, но происходят при значительно более высоких скоростях [33–35]. Карбонатизация проявляется на микро- и субмикроскопических уровнях, а количество и разнообразие педогенных карбонатов напрямую коррелирует с развитостью почвенного профиля. Высокое содержание карбонатных новообразований, присутствие хорошо выраженных крупных стяжений и сростков микрокристаллов, обнаруженных в почвах участка 1, обусловлены более длительным по времени почвообразованием (поступление золошлаковых отходов, по всей видимости, прекращено несколько раньше, чем на участке 2), а также вследствие более благоприятного водного режима.

ЭПП метаморфизма органического вещества в основном связаны с поступлением органических остатков и их трансформацией и в меньшей степени гумификацией. Внутрипрофильное поступление органических остатков, фрагменты которых различной степени разлаженности обнаруживаются как в верхних горизонтах, так и в нижней части профиля, является характерной особенностью почв, формирующихся под травянистыми ассоциациями и лесными сообществами с развитым травянистым ярусом.

ЭПП переорганизации почвенной массы проявляются в основном в виде коагуляционного оструктурирования. Корневое оструктурирование отмечено только в почвах под травянистой растительностью. Процессы оглеения раз-



виты (разрез 3) в почвах локальных депрессий в условиях близкого залегания грунтовых вод, а их визуальная диагностика затруднена в силу особенностей естественного цвета субстрата золоотвалов.

### Заключение

Проведённые исследования показали, что интенсивность почвообразовательных процессов в почвах золоотвалов существенно различается в зависимости от положения в рельефе, характера растительности, уровня грунтовых вод, неоднородности техногенного субстрата.

Почвы золоотвалов характеризуются наличием слаборазвитого гумусового горизонта W, переходного горизонта WTCHΩ. Техногенный субстрат представляет собой чередование слоев золы уноса, сложенных пылеватым материалом, и слоев зольного остатка с преобладанием частиц размерности тонкого и среднего песка. Основным компонентом техногенного субстрата золоотвалов является аморфно-стекловидная масса, состоящая из силикатов, алюмосиликатов и ферросиликатов и в меньшей степени из свободных оксидов Ca и Mg. Процессы почвообразования происходят синхронно с процессами трансформации вещественного состава исходного субстрата.

Установлено, что основными почвообразовательными процессами являются: метаморфизм минерального вещества (дезинтеграция, карбонатизация), переорганизация почвенной массы (коагуляционное и травяно-корневое оструктурирование), метаморфизм органического вещества (поступление и трансформация растительных остатков и в меньшей степени гумификация), а также процессы миграции вещества и оглеение. Ряд процессов диагностируется только на микро- и субмикроморфологических уровнях.

Стяжения и микрокристаллические формы кальцита наиболее многочисленны и хорошо выражены в почвах, формирующихся на хорошо дренированных участках в периферийных частях золоотвала под разреженной древесной растительностью с развитым травянистым ярусом.

### Литература

1. Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Власов А.С., Сударева С.В. Золоотвалы твердотопливных тепловых электростанций как угроза экологической безопасности // Экология промышленного производства. 2012. № 4. С. 15–26.
2. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Барадулин И.М., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н. Экологические проблемы при эксплуатации золошлаковых накопителей в топливно-энергетическом комплексе России // Экология и промышленность России. 2015. № 2. С. 24–28.
3. Зверева В.П. Экологические последствия формирования золоотвалов ТЭЦ // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2005. № 1. С. 30–34.
4. Чибрик Т.С., Елькин Ю.А. Формирование фитоценозов на нарушенных промышленностью землях: биологическая рекультивация. Свердловск : Изд-во Урал. ун-та, 1991. 220 с.
5. Раков Е.А., Чибрик Т.С. К вопросу формирования флоры на нарушенных промышленностью землях // Экология. 2009. № 6. С. 473–476.



6. Juwarkar A.A., Jambhulkar H.P. Restoration of fly ash dump through biological interventions. // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008. Vol. 139, № 1–3. PP. 355–365.
7. Махнев А.К., Чирик Т.С., Трубина М.Р., Лукина Н.В., Гебель Н.Э., Терин А.А., Еловиков Ю.И., Топорков Н.В. Экологические основы и методы биологической рекультивации золоотвалов тепловых электростанций на Урале. Екатеринбург : УрО РАН, 2002. 356 с.
8. Махнев А.К., Махнева Н.Е. Ландшафтно-экологические и популяционные аспекты стратегии восстановления нарушенных земель // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Т. 17, № 3. С. 453–459.
9. Pandey V.C. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants // *Ecological Engineering*. 2015. № 82. PP. 1–5.
10. Назаркина А.В., Крупская Л.Т., Дербенцева А.М., Зверева В.П., Морина О.М. Артииндустраты теплоэлектростанций юга Дальнего Востока: физико-механические свойства, оценка противозерозионной стойкости, рекультивация // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2012. № 3. С. 122–126.
11. Назаркина А.В., Арефьева О.Д., Дербенцева А.М. Взаимосвязь физико-механических, противозерозионных и водных свойств артииндустратов ТЭЦ юга Дальнего Востока // *Проблемы региональной экологии*. 2013. № 2. С. 140–143.
12. Zikeli S., Jahn R., Kastler M. Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2002. Vol. 165, № 4. PP. 530–536.
13. Zikeli S., Kastler M., Jahn R. Cation exchange properties of soils derived from lignite ashes // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2004. Vol. 167, № 4. PP. 439–448.
14. Zikeli S., Kastler M., Jahn R. Classification of anthrosols with vitric/andic properties derived from lignite ash // *Geoderma*. 2005. Vol. 124, № 3–4. PP. 253–265.
15. Uzarowicz L., Zagórski Z. Mineralogy and chemical composition of technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from selected thermal power stations in Poland // *Soil Science Annual*. 2015. Vol. 66, № 2. PP. 82–91.
16. Uzarowicz L., Zagórski Z., Mendak E., Bartmiński P., Szara E., Kondras M., Oktaba L., Turek A., Rogoziński R. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis // *Catena*. 2017. Vol. 157. PP. 75–89.
17. Суслова Н.Г., Аткина Л.И., Чижов Б.Е., Агафонов Е.Ю. Создание рекреационных объектов на территории золоотвала г. Тюмени // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2008. № 2. С. 219–222.
18. Чижов Б.Е., Парыгина Н.Г., Суслов А.В., Аткина Л.И. Инвентаризация территории золоотвала и методы создания на них парковых насаждений Тюмени // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*. 2007. № 8. С. 85–91.
19. Чижов Б.Е., Аткина Л.И., Агафонов Е.Ю., Суслова Н.Г. Испытание травосмесей для рекультивации золоотвала в Тюмени // *Вестник Московского государственного университета леса*. 2008. № 3. С. 90–93.
20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
21. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахманова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // *Почвоведение*. 2014. № 10. С. 1155–1164.
22. Брагина П.С. Почвообразование на отходах горнодобывающих предприятий Кемеровской области : дис. ... канд. геогр. наук. М. : МГУ, 2016. 156 с.
23. IUSS Working Group WRB World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2015. 192 p.

24. Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лойко С.В., Доможакова Е.А. Использование сканирующей электронной микроскопии для диагностики процессов почвообразования на поверхности отвалов каменноугольных разрезов Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 3 (27). С. 36–52.
25. Sokol E.V., Maksimova N.V., Volkova N.I., Nigmatulina E.N., Frenkel A.E. Hollow silicate microspheres from fly ashes of the Chelyabinsk brown coals (South Urals, Russia) // Fuel Processing Technology. 2000. Vol. 67, № 1. PP. 35–52.
26. Sokol E.V., Kalugin V.M., Nigmatulina E.N., Volkova N.I., Frenkel A.E., Maksimova N.V. Ferrospheres from fly ashes of Chelyabinsk coals: chemical composition, morphology and formation conditions // Fuel. 2002. Vol. 81, № 7. PP. 867–876.
27. Ranjbar N., Kuenzel C. Cenospheres: A review // Fuel. 2017. Vol. 207. PP. 1–12.
28. Kutchko B.G., Kim A.G. Fly ash characterization by SEM-EDS // Fuel. 2006. Vol. 85, № 17–18. PP. 2537–2544.
29. Dudas M.J., Warren C.J. Submicroscopic model of fly ash particles // Geoderma. 1987. Vol. 40, № 1–2. PP. 101–114.
30. 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.
31. Uzarowicz L., Skiba M., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A., Trzciński J. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution // Catena. 2018. Vol. 162. PP. 255–269.
32. Элементарные почвообразовательные процессы: Опыт концептуального анализа, характеристика, систематика / отв. ред. Н.А. Караваева, С.В. Зонн. М. : Наука, 1992. 184 с.
33. Warren C.J., Dudas M.J. Weathering processes in relation to leachate properties of alkaline fly ash // Journal of Environmental Quality. 1984. Vol. 13, № 4. PP. 530–538.
34. Warren C.J., Dudas M.J. Formation of secondary minerals in artificially weathered fly ash // Journal of Environmental Quality. 1985. Vol. 14, № 3. PP. 405–410.
35. Zevenbergen C., Bradley J.P., Van Reeuwijk L.P., Shyam A.K., Hjelmar O., Comans R.N.J. Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash // Environmental Science and Technology. 1999. Vol. 33, № 19. PP. 3405–3409.

*Поступила в редакцию 04.02.2018 г.; повторно 17.07.2018 г.;  
принята 23.08.2018 г.; опубликована 12.10.2018 г.*

**Авторский коллектив:**

**Константинов Александр Олегович** – специалист НОЦ «Геология нефти и газа», Тюменский индустриальный университет (625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

E-mail: [konstantinov.alexandr72@gmail.com](mailto:konstantinov.alexandr72@gmail.com)

**Новоселов Андрей Андреевич** – аспирант кафедры физической географии и экологии, Институт наук о земле, Тюменский государственный университет (625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 6).

E-mail: [Mr.andreygeo@mail.ru](mailto:Mr.andreygeo@mail.ru)

**Лойко Сергей Васильевич** – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды, Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36).

E-mail: [s.loyko@yandex.ru](mailto:s.loyko@yandex.ru)

**For citation:** Konstantinov AO, Novoselov AA, Loiko SV. Special features of soil development within overgrowing fly ash deposit sites of the solid fuel power plant. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;43:6-24. doi: 10.17223/19988591/43/1. In Russian, English Summary

Alexander O. Konstantinov<sup>1</sup>, Andrey A. Novoselov<sup>2</sup>, Sergey V. Loiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup> University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

<sup>3</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

### **Special features of soil development within overgrowing fly ash deposit sites of the solid fuel power plant**

Waste deposit sites of solid fuel power plants exist within the majority of large cities of the Urals, Siberia and the Far East. Fly ash deposit sites are often located in close proximity to residential areas and may be observed as a potential source of environmental hazard, which leads to the alienation of significant land lots. The problem of reclamation of ash dumps is of particular concern, and its solution is impossible without understanding the processes of vegetation and soil cover development within such territories. In this paper, we present the results of studying the processes of soil development at the sites of the abandoned ash dumps of the power station in the city of Tyumen that was formed during the work of the enterprise on local peat as a main fuel type.

The fly ash deposit sites of Tyumen CHP-1 plant consist of two sites with a total area of 100 ha (Site 1 - 54.0 ha, Site 2 - 46.0 ha) (See Fig. 1). The disposal of ash and slag wastes was discontinued more than 30 years ago; currently, within the territory of the dumps there is a gradual overgrowing. The surface of the ash dumps is aligned, subsidence relief forms occur, and the elevation difference is 1-3 m. A more diverse and complex relief is typical of Site 1. The level of groundwater varies significantly, depending on the position in the relief. Modern vegetation is mosaic; two main types of plant communities are represented: woody-shrubby and grassy. We conducted field studies of the soil cover of the fly ash deposit sites of Tyumen CHP-1 plant in summer 2017. At each fly ash deposit site, a pair of soil profiles was created (See Fig. 1) under woody and grassy vegetation (Profiles 1 and 4, 2 and 3, correspondingly) (See Fig. 2). Diagnostics of soils was conducted according to the Russian Soil Classification considering additions proposed for technogenic soils (Shishov LL et al., 2004). The names of soils are also given according to the World Reference Base for Soil Resources 2015. Profile 1 (57°8'47,30"N, 65°38'8,70"E) is found at a local elevation in the peripheral part of Site 1 under depleted willow forest with willow and aspen undergrowth and a developed grassy layer. Profile 2 (57°8'23,50"N, 65°38'22,80"E) is confined to the surface of Site 2, complicated by subsidence forms under meadow-grassy association with the presence of cereals. Soil is Spolic Technosol (Epiarenic, Endoprotocalcic, Fluvic, Hyperartefactic, Loxic, Amphivitrific). Profile 3 (57°8'23,90"N, 65°38'17,80"E), characterizes local decline at Site 2. Vegetation is represented by an aspen-willow forest with developed litter. Soil is Spolic Technosol (Endoprotocalcic, Fluvic Hyperartefactic, Loxic, Stagnic, Amphivitrific). Profile 4 (57°8'38,10"N, 65°37'30,50"E) is found at Site 1 with a pronounced technogenic filler relief. Meadow vegetation with willow, aspen and sea-buckthorn undergrowth is characteristic. Soil is Spolic Technosol (Amphiprotocalcic, Fluvic, Hyperartefactic, Loxic, Amphivitrific). We studied the diversity and intensity of soil-forming processes at meso-, micro- and submicroscopic levels: in transparent sections using polarization and inversion microscopes and a scanning electron microscope equipped with an attachment for elemental analysis. We determined the granulometric composition of the technogenic deposits on a laser particle analyzer with preliminary dispersion of samples with pyrophosphate (See Fig. 3). The color of soil horizons and anthropogenic substrate was estimated by the Munsell system.

The results of the conducted studies indicate that the intensity of soil-forming processes in soils developed from ash differs depending on the position in the relief,

the type of vegetation, the level of groundwater, and the heterogeneity of the man-made substrate. The studied soils correspond to Spolic Technosol in accordance with the World Reference Base for Soil Resources. Technosols developed within ash deposit sites inherit the properties and material composition of the technogenic substrate, which is an alternation of fly ash and ash residue layers. The main components of the soil-forming material are silicates, aluminosilicates and ferrosilicates, particles of underburn and microspheres (See Fig. 4 and 7). The processes of soil development occur synchronously with the processes of transformation of the material composition of the initial substrate. The main soil-forming processes are: metamorphism of mineral matter (disintegration, carbonatization) (See Fig. 5), reorganization of the soil mass (coagulation and herbaceous-root structuring), metamorphism of the organic matter (the intake and transformation of plant residues and, to a lesser extent, humification) (See Fig. 6), and migration of matter and gley formation. Several soil-forming processes are diagnosed only at micro- and submicromorphological levels. The quantity and diversity of pedogenic carbonates is an important indicator of the intensity of soil formation. Concretions and microcrystalline forms of calcite are most numerous and well expressed in soils with the most formed on well-drained areas in the peripheral parts of the ash dump under the sparse tree vegetation with a developed grassy layer.

*The paper contains 7 Figures and 35 References.*

**Key words:** fly ash deposit sites of power plants; soil forming processes, technogenic soil; spolic technosol.

### References

1. Delitzin LM, Ezhova NN, Vlasov AS, Sudareva SV. Ash disposal areas of coal's power stations as the threat to environmental safety. *Ėkologiâ promyšlennogo proizvodstva = Industrial Ecology*. 2012;4:15-26. In Russian
2. Zen'kov IV, Nefedov BN, Baradulin IM, Kiryushina EV, Vokin VN. Environmental problems during the maintenance of ash-and-slag storages in the fuel-energy complex of Russia. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(2):24-28. In Russian
3. Zvereva VP. Environmental results of the formation of heat station ash dumps. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Environmental Geoscience*. 2005;1:30-34. In Russian
4. Chibrik TS, El'kin YuA. Formirovanie fitotsenozov na narushennykh promyshlennost'yu zemlyakh: biologicheskaya rekul'tivatsiya [Formation of phytocenoses in industrially disturbed lands (biological recultivation)]. Sverdlovsk: Ural University Publ.; 1991. 220 p. In Russian
5. Rakov EA, Chibrik TS. On the problem of flora formation in industrially disturbed land areas. *Russian Journal of Ecology*. 2009;6(40):448-451. doi: [10.1134/S1067413609060125](https://doi.org/10.1134/S1067413609060125)
6. Juwarkar AA, Jambhulkar HP. Restoration of fly ash dump through biological interventions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008;139(1-3):355-365. doi: [10.1007/s10661-007-9842-8](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9842-8)
7. Makhnev AK, Chibrik TS, Trubina MR, Lukina NV, Gebel' NE, Terin AA, Elovikov YuI, Toporkov NV. *Ekologicheskie osnovy i metody biologicheskoy rekul'tivatsii zoolootvalov teplovykh elektrostantsiy na Urale* [Ecological bases and methods of biological recultivation of ash dumps of thermal power stations in the Urals]. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2002. 356 p. In Russian
8. Makhnev AK, Makhneva NE. Landscape-ecological and population aspects of the strategy of restoration of disturbed lands. *Contemporary Problems of Ecology*. 2010;3(3):318-322. doi: [10.1134/S1995425510030100](https://doi.org/10.1134/S1995425510030100)
9. Pandey VC. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants. *Ecological Engineering*. 2015;82:1-5. doi: [10.1016/j.ecoleng.2015.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.002)

10. Nazarkina AV, Krupskaya LT, Derbentseva AM, Zvereva VP, Morina OM. Thermal power plant artiindustrates in the Far East South: Physical and mechanical properties, erosion -preventive resistance estimation, recultivation. *The Bulletin of KrasGAU*. 2012;3:122-126. In Russian
11. Nazarkina AV, Arefieva OD, Derbentseva AM. Interrelationship of physical, erosion-preventive and water properties of artiindustrats of Far East coal-burning plants. *Problemi regionalnoy ekologii = Regional Environmental Issues*. 2013;2:140-143. In Russian
12. Zikeli S, Jahn R, Kastler M. Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2002;165(4):530-536. doi: [10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<530::AID-JPLN530>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<530::AID-JPLN530>3.0.CO;2-J)
13. Zikeli S, Kastler M, Jahn R. Cation exchange properties of soils derived from lignite ashes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2004;167(4):439-448. doi: [10.1002/jpln.200421361](https://doi.org/10.1002/jpln.200421361)
14. Zikeli S, Kastler M, Jahn R. Classification of anthrosols with vitric/andic properties derived from lignite ash. *Geoderma*. 2005;124(3-4):253-265. doi:[10.1016/j.geoderma.2004.05.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.004)
15. Uzarowicz Ł, Zagórski Z. Mineralogy and chemical composition of technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from selected thermal power stations in Poland. *Soil Science Annual*. 2015;66(2):82-91. doi: [10.1515/ssa-2015-0023](https://doi.org/10.1515/ssa-2015-0023)
16. Uzarowicz Ł, Zagórski Z, Mendak E, Bartmiński P, Szara E, Kondras M, Oktaba L, Turek A, Rogoziński R. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*. 2017;157:75-89. doi: [10.1016/j.catena.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.010)
17. Suslova NG, Atkina LI, Chizhov BYe, Agafonov YeYu. Construction of recreational objects on the territory of ash-heaps in the town of Tyumen. *Izvestiya Orenbyrgskogo Gosydarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2008;2:219-222. In Russian
18. Chizhov BE, Pariguina NG, Suslov AV, Atkina LI. The inventory of a ash dump Tumen and methods of a laying out of a park in it. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2007;8:85-90. In Russian
19. Chizhov BE, Atkina LI, Agafonov EY, Susslova NG. Mixed grass crop test for ash dump recultivation in the town of Tyumen. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2008;3:90-93. In Russian
20. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian
21. Prokof'eva TV, Gerasimova MI, Bezuglova OS, Gorbov SN, Bakhmatova KA, Matinyan NN, Gol'eva AA, Zharikova EA, Nakvasina EN, Sivtseva NE. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(10):959-967. doi: [10.1134/S1064229314100093](https://doi.org/10.1134/S1064229314100093)
22. Bragina PS. *Pochvoobrazovanie na otkhodakh gornodobyvayushchikh predpriyatiy Kemerovskoy oblasti* [Soil formation on the waste of mining enterprises in Kemerovo region. CandSci. Dissertation, Geography]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2016. 156 p. In Russian
23. *IUSS Working Group WRB*. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. Rome: FAO Publ.; 2015. 192 p. [Electronic resource]. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf> (accessed 12.03.2018)
24. Sokolov DA, Kulizhsky SP, Loiko SV, Domozhakova EA. Using electronic scanning microscopy for diagnostics of soil-forming processes on the surface of coal-mine dumps in Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;3(27):36-52. In Russian, English Summary



25. Sokol EV, Maksimova NV, Volkova NI, Nigmatulina EN, Frenkel AE. Hollow silicate microspheres from fly ashes of the Chelyabinsk brown coals (South Urals, Russia). *Fuel Processing Technology*. 2000;67(1):35-52. doi: [10.1016/S0378-3820\(00\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00084-9)
26. Sokol EV, Kalugin VM, Nigmatulina EN, Volkova NI, Frenkel AE, Maksimova NV. Ferrospheres from fly ashes of Chelyabinsk coals: chemical composition, morphology and formation conditions. *Fuel*. 2002;81(7):867-876. doi: [10.1016/S0016-2361\(02\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00005-4)
27. Ranjbar N, Kuenzel C. Cenospheres: A review. *Fuel*. 2017;207:1-12. doi: [10.1016/j.fuel.2017.06.059](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.059)
28. Kutchko BG, Kim AG. Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*. 2006;85(17-18):2537-2544. doi: [10.1016/j.fuel.2006.05.016](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.016)
29. Dudas MJ, Warren CJ. Submicroscopic model of fly ash particles. *Geoderma*. 1987;40(1-2):101-114. doi: [10.1016/0016-7061\(87\)90016-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90016-4)
30. Bragina PS, Gerasimova MI. Pedogenic processes on mining dumps (a case study of southern Kemerovo oblast). *Geography and Natural Resources*. 2014;35(1):35-40. doi: [10.1134/S1875372814010053](https://doi.org/10.1134/S1875372814010053)
31. Uzarowicz Ł, Skiba M, Leue M, Zagórski Z, Gąsiński A, Trzciński J. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena*. 2018;162:255-269. doi: [10.1016/j.catena.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.005)
32. Karavaeva NA, Zonn SV. Elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy: Opyt kontseptual'nogo analiza, kharakteristika, sistematika [Elementary soil-forming processes: experience of conceptual analysis, characterization, and systematics]. Moscow: Nauka Publ.; 1992. 184 p. In Russian
33. Warren CJ, Dudas MJ. Weathering processes in relation to leachate properties of alkaline fly ash. *Journal of Environmental Quality*. 1984;13(4):530-538. doi: [10.2134/jeq1984.00472425001300040005x](https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300040005x)
34. Warren CJ, Dudas MJ. Formation of secondary minerals in artificially weathered fly ash. *Journal of Environmental Quality*. 1985;14(3):405-410. doi: [10.2134/jeq1985.00472425001400030019x](https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400030019x)
35. Zevenbergen C, Bradley JP, Van Reeuwijk LP, Shyam AK, Hjelmar O, Comans RNJ. Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash. *Environmental Science and Technology*. 1999;33(19):3405-3409. doi: [10.1021/es9900151](https://doi.org/10.1021/es9900151)

*Received 04 February 2018; Revised 17 July 2018;  
Accepted 23 August 2018; Published 12 October 2018*

**Author info:**

**Konstantinov Alexandr O**, Specialist, Oil and Gas Geology Research and Educational Center, Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky Str., Tyumen 625000, Russian Federation.

E-mail: [konstantinov.alexandr72@gmail.com](mailto:konstantinov.alexandr72@gmail.com)

**Novoselov Andrey A**, Postgraduate Student, Department of Physical Geography and Landscape Science, Institute of Earth Sciences, University of Tyumen, 6 Volodarsky Str., Tyumen 625003, Russian Federation.

E-mail: [Mr.andreygeo@mail.ru](mailto:Mr.andreygeo@mail.ru)

**Loyko Sergey V**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, BIO-GEO-CLIM Laboratory, Tomsk State University, 36 Lenin Ave, Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: [s.loyko@yandex.ru](mailto:s.loyko@yandex.ru)