

УДК 631.618

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.309>

Особенности формирования и углероддепонирующая способность подстилок лесных и травяных техногенных экосистем отвалов отходов добычи антрацита

© 2025 А. В. Токарева¹, В. И. Уфимцев², Н. А. Соколова³, Д. А. Соколов³¹ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: n4sty4t@yandex.ru²ФГБУН ФИЦ Угля и углехимии СО РАН, пр-т Советский, 18, г. Кемерово, 650000, Россия. E-mail: uwy2079@gmail.com³ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: sokolovdenis@mail.ru

Цель исследования. Выявить особенности формирования и оценить углероддепонирующую способность подстилок лесных и травяных экосистем техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения.

Место и время проведения. Внешний породный отвал Горловского антрацитового месторождения (54.568880, 83.588956), Новосибирская область, Искитимский район, июнь–август 2024 г.

Методы. Репрезентативные участки исследования выбирались с таким расчетом, чтобы максимально охватить разнообразие представленных на отвале растительных сообществ. Отбор проб подстилки на участках проводили методом конверта и согласно методическим рекомендациям по отбору и анализу образцов почв «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ». Образцы подстилок сушили до воздушно-сухого состояния в лаборатории, затем измельчали ножницами, тщательно диспергирования вибрационным шариковым истирателем с последующей гомогенизацией; в подготовленных пробах определяли содержание углерода и азота на CHNS/O-анализаторе 2400 Series II Perkin Elmer. Статистическую обработку результатов выполняли при помощи пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17.

Основные результаты. В техногенных экосистемах, в силу разнообразия эдафических условий и возраста участков, формируемые подстилки характеризуются неоднородностью по составу, строению и запасам органического вещества и углерода. Выявленные особенности подстилок имеют приуроченность к определенным типам эмбриоземов и произрастающим на них растениям, которые группируются в пионерные, простые и сложные лесные и травянистые сообщества. Минимальные мощность (до 1 см) и запасы органического вещества (до 1,59 т/га) отмечены в фрагментарных подстилках пионерных растительных сообществ инициальных эмбриоземов. Небольшой мощностью, но максимальными запасами сухой массы характеризуются подстилки сложных фитоценозов и травяных экосистем дерновых эмбриоземов. Содержание углерода в подстилках варьирует в широком диапазоне значений (от 9,4 до 48,4 %, в среднем 36,7%) и отличается в зависимости от типа и состава растительных сообществ и эдафических условий. В целом, запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем находятся в интервале 0,26–3,26 т С/га и увеличиваются в ряду пионерные < простые травянистые ≤ сложные травянистые < простые лесные = сложные лесные сообщества. В подстилках почв исследуемых отвалов не происходит обогащения азотом их нижней части, что, вероятно, связано со слабой освоенностью биотой.

Ключевые слова: рекультивация; эмбриоземы; почвы техногенных ландшафтов; секвестрация углерода; Technosol.

Цитирование: Токарева А.В., Уфимцев В.И., Соколова Н.А., Соколов Д.А. Особенности формирования и углероддепонирующая способность подстилок лесных и травяных техногенных экосистем отвалов отходов добычи антрацита // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 1. e309. DOI: [10.31251/pos.v8i1.309](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.309)

ВВЕДЕНИЕ

Круговорот углерода — сложный и многоступенчатый процесс, непрерывно протекающий в экосистемах, обеспечивающий их функционирование и устойчивость к внешним воздействиям (Базилевич, Титлянова, 2008). В настоящее время, в связи с увеличением в атмосфере концентрации климатически активных газов, исследованиям, посвященным круговороту углерода, уделяется повышенное внимание (Кудеяров, 2022). Среди них особый интерес проявляется к вопросам оценки углероддепонирующей способности экосистем (Королева, Шунькина, 2014; Bar-On et al., 2025). Согласно методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)

выделяют пять основных резервуаров накопления углерода: надземная биомасса, подземная биомасса, подстилка, валежная древесина и углерод почвы (Penman et al., 2003). Однако в отличие от пулов фитомассы и почвенного углерода, которые рассматриваются в большом количестве научных работ, его запасы в мертвой древесине и подстилке изучаются не столь активно (Честных и др., 2007; Трефилова и др., 2021; Байгурина и др., 2023).

Подстилка, являясь важным компонентом наземных экосистем, помимо депонирования углерода, выполняет в них множество важных функций. Она принимает участие в процессах гумусообразования, регулирует температурный и водный режимы почв, а также служит местом обитания для многих беспозвоночных животных. В подстилке минерализуется и/или трансформируется большое количество органических веществ, поступающих с растительным опадом. Поэтому данный слой почвы является важным звеном в цикле биогенных элементов, в том числе углерода (Титлянова, Шибарева, 2012).

В настоящее время под влиянием антропогенного воздействия многие наземные экосистемы в промышленных регионах претерпевают сильные изменения в структуре и условиях функционирования. Не является исключением и Новосибирская область, где в настоящее время открытым способом добываются большие объемы антрацитовых углей. Такая добыча оказывает разрушительное воздействие на природные экосистемы, приводя к деградации или полному исчезновению естественных резервуаров углерода. Минимизация негативных экологических последствий возможна при разработке высокоэффективных природоподобных технологий рекультивации, в том числе ориентированных на повышение углероддепонирующей способности формируемых техногенных экосистем. Для разработки эффективных программ по восстановлению природных экосистем в условиях антропогенного воздействия широко используются данные о количественных запасах углерода в различных природных пулах. Учитывая современные масштабы открытой угледобычи (Sokolov et al., 2021), данные исследования важны при создании глобальных и национальных программ по уменьшению концентрации углерода в атмосфере (Oliver et al., 2014; Волков, 2015; Абакумов и др., 2022). Поэтому изучение природных резервуаров углерода в компонентах техногенных экосистем, в том числе подстилке, в настоящее время является важной и актуальной задачей.

В этой связи, целью нашего исследования являлось выявление особенностей формирования и оценка углероддепонирующей способности подстилок лесных и травяных экосистем техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в Искитимском районе Новосибирской области на территории Нагорного отвала Горловского антрацитового месторождения (54,568880 с.ш., 83,588956 в.д.). Согласно агроклиматическому районированию Новосибирской области, район исследований отнесен к умеренно теплому, достаточно увлажненному (гидротермический коэффициент по Селянинову для района находится в пределах 1,0–1,2). Среднее годовое количество осадков составляет 400–450 мм, из них 170–190 мм выпадает в период активной вегетации (Агроклиматические ресурсы ..., 1971). Сумма активных температур ($\sum t > 10^\circ\text{C}$) составляет 1750–1800 $^\circ\text{C}$ (Почвенно-климатический атлас ..., 1978). В связи с темной поверхностью субстрата и отсутствием растительности на большей части отвала, сумма биологически активных температур на его поверхности может превышать региональные фоновые значения на 1000 $^\circ\text{C}$. Экспозиция склонов отвала также влияет на теплообеспеченность: $\sum t > 10^\circ\text{C}$ на плакорах и южных склонах на 500 $^\circ\text{C}$ больше, чем на северных и восточных склонах (Соколова, 2023).

Исследуемый отвал, образованный из отходов угледобычи, представляет собой гору, местами возвышающуюся над прилегающими территориями на высоту до 70 метров. Он вытянут в северо-восточном направлении почти на 2 км, а его ширина достигает 1 км. Отвал террасирован; нижние террасы сформированы в 1970-х годах в начале разработки месторождения. Каждая терраса выше и на 10–20 лет моложе нижележащей. Формирование верхнего яруса было закончено в 2018 году. Субстрат поверхности отвала по большей части представлен хаотичной смесью плотных осадочных пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников), реже рыхлыми породами (глинами мел-палеогеновой коры выветривания). Рельеф террас либо горизонтальный спланированный, либо мелкобугристый. Отмеченная дифференциация возраста участков отвала, пород, слагающих их поверхность, рельефа, который также осложняется разнообразием экспозиции, длины и крутизны различных склонов определяет разнокачественность условий восстановления растительного и почвенного покровов. Ранее

было показано, что на исследуемом отвале формируются разнообразные травяные и лесные экосистемы (Sokolova et al., 2021; Скотарева и др., 2024) с характерным для каждого участка почвенным покровом (Соколова и др., 2020; Андроханов, Соколова, 2022).

Репрезентативные участки исследования выбирались с таким расчетом, чтобы максимально охватить разнообразие представленных на отвале растительных сообществ. Их описание и отбор образцов подстилки проводили в июне и августе 2024 г. (рис. 1). Также в работе использовали материалы, полученные ранее при изучении скорости и направленности развития почв и растительных сообществ на отвалах Горловского антрацитового месторождения (Скотарева и др., 2024; Sokolova et al., 2021).

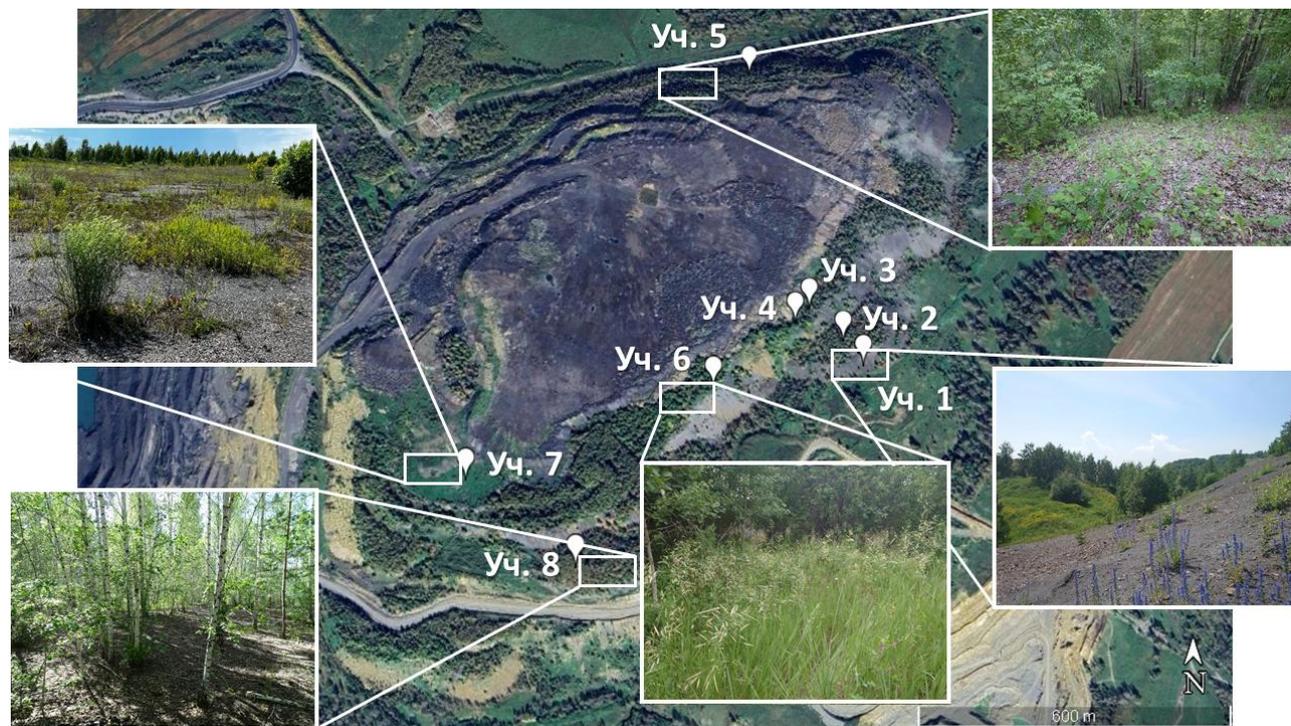


Рисунок 1. Карта-схема расположения исследуемых участков.

Почвенный покров исследуемых участков представлен эмбриоземами. Согласно коррелятивной международной системе WRB (IUSS Working Group ..., 2022), почвы отвала соответствуют реферативной группе Technosol. Более детальная дифференциация почв проведена при помощи классификации почв техногенных ландшафтов, разработанной сотрудниками Института почвоведения и агрохимии (ИПА) СО РАН (Курачев, Андроханов, 2002). На ключевых участках были выделены типы инициальных, органо-аккумулятивных и дерновых эмбриоземов. Классификационная принадлежность подтипов эмбриоземов определялась по характеру типодиагностических и, в том числе, подстилочных горизонтов. Оценку свойств почв и поверхности отвалов, определяющих особенности формирования растительного покрова, проводили традиционными для почвоведения методами, подробно описанными в работе (Скотарева и др., 2024).

Отбор проб подстилки на участках проводили методом конверта и согласно методическим рекомендациям по отбору и анализу образцов почв «Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ» (Методика полевых ..., 2023). Единственное отличие заключается в том, что пробы подстилки брали при помощи не деревянной рамки, а пластикового цилиндра диаметром и высотой 100 мм. Разбор проб подстилки проводили после сушки до воздушно-сухого состояния в лаборатории рекультивации почв ИПА СО РАН. Учитывая фрагментарность, разнообразие в травяных и лесных сообществах, при разборе подстилки не разделяли на подгоризонты OF и OH. Отдельно учитывался только подгоризонт OL – состоящий, как правило, из прошлогоднего опада. После сушки, измельчения ножницами, тщательного диспергирования вибрационным шариковым истирателем и последующей гомогенизации в пробах подстилки определяли содержание углерода и азота на CHNS/O-анализаторе 2400 Series II Perkin Elmer. Статистическую обработку результатов выполняли с помощью пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общеизвестно, что подстилка формируется из продуктов опада наземных ярусов биоценоза. По этой причине ее свойства, в частности химический состав, зависит, главным образом, от состава доминирующих растительных форм, присущих определенной территории. Исследуемые техногенные ландшафты характеризуются высокой неоднородностью эдафических условий (табл. 1), что вместе с дифференциацией определяет высокую вариабельность представленных фитоценозов не только в пространстве, но во времени.

Таблица 1

Основные химические и физические свойства исследуемых почв и мелкозема

№ участка	Глубина, см	рН	Углерод органического вещества (Сорг.), %	Углерод общий (Собщ.), %	Азот общий (Nобщ.), %	Плотность, г/см ³	Содержание фракций	
							<0,01 мм, %	<1 мм, %
1	0–10	8,5	1,1/0,1*	4,7/0,4	0,35/0,032	1,8	0,7	8,9
	10–20	8,4	1,2/0,1	4,4/0,2	0,33/0,015	2,1	0,4	4,7
2	0–10	7,9	3,8/2,1	21,3/11,7	0,63/0,31	1,6	13,5	55,3
	10–20	7,9	3,1/1,0	9,9/3,2	0,44/0,11	1,9	10,3	32,4
3	0–10	6,7	1,7/0,6	6,0/2,2	0,50/0,24	1,8	3,8	36,9
	10–20	7,1	0,6/0,2	2,4/0,7	0,30/0,12	2,1	4,3	3,9
4	0–10	6,6	1,6/0,9	7,0/3,8	0,45/0,28	1,5	13,7	54,1
	10–20	7,9	2,2/0,8	7,3/2,8	0,42/0,22	2,1	7,4	38,1
5	0–10	6,7	1,7/0,3	5,7/1,0	0,36/0,09	1,3	2,0	17,5
	10–20	6,2	2,7/0,6	21,8/5,0	0,54/0,12	1,7	5,4	22,6
6	0–10	7,2	1,4/1,4	2,7/2,7	0,24/0,23	1,3	59,3	99,5
	10–20	8,1	0,2/0,2	0,5/0,5	0,08/0,07	1,4	60,5	99,2
7	0–10	8,0	2,2/1,0	11,0/5,3	0,61/0,31	1,9	17,3	47,9
	10–20	7,5	1,0/0,6	14,0/5,0	0,70/0,20	2,3	11,6	35,7
8	0–10	7,2	1,5/0,6	8,4/3,5	0,45/0,24	1,6	11,0	41,7
	10–20	7,5	0,5/0,1	2,7/0,6	0,45/0,08	2,2	5,1	21,0

Примечание.

*1,1/0,1 – 1,1 - содержание в мелкоземе; 0,1 – содержание в почвах.

Основные физические и химические свойства почв участков, представлены в таблице 1 и подробно описаны в работе (Скотарева и др., 2024). Установлено, что основная особенность большинства исследуемых почв проявляется в их высокой каменистости. Это же свойство определяет низкое содержание в почвах общего азота и бихроматноокисляемого углерода. Высокое содержание физической глины и пород ее продуцирующих способствует развитию травянистых растительных группировок; на склоновых участках с высоким содержанием камней на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность.

Полученные в ходе визуальной оценки участков и составления геоботанических описаний результаты несколько отличаются от данных, представленных при изучении данных участков в 2023 году (Скотарева и др., 2024). Это связано с различной тепло- и влагообеспеченностью последних лет, а также проявлением сукцессионных процессов, характерных для динамично развивающихся растительных сообществ отвалов (Глебова, 2005; Куприянов, Манаков, 2016).

Традиционно растительный покров отвалов угольных разрезов принято группировать, в соответствии с классификацией, предложенной А.Г. Вороновым (1973), на пионерные, простые, сложные и замкнутые фитоценозы (Кандрашин, 1989; Куприянов, Манаков, 2016), каждому из которых соответствует конкретный тип эмбриоземов (Курачев и др., 1994). На исследуемом отвале участков замкнутых фитоценозов не обнаружено, что наряду с относительной молодостью основной части поверхности отвала связано также с особенностями литогенной основы (Соколов и др., 2022), сказывающимися на скорости освоения субстрата биотой.

Присутствующие пионерные растительные группировки характеризуются сравнительно бедным видовым разнообразием и незначительной площадью проективного покрытия (до 10–15%). Приурочены они к инициальным эмбриоземам (ЭИпион_тр) на начальном этапе сукцессии. Подстилки на таких участках очень фрагментарны. Они представлены свежим опадом, зачастую не оторвавшимся от живых частей растений (ветошью) (Продуктивность травяных экосистем, 2020). Основными видами, формирующими мортмассу инициальных эмбриоземов выступают *Melilotus officinalis* L., реже

Melilotus suaveolens Ledeb., преобладающие на молодых и средневозрастных участках, и *Échium vulgáre* L., доминирующий на старых участках с экстремальными микроклиматическими условиями (южных склонах). В годы избыточного увлажнения на поверхности инициальных эмбриоземов обильно произрастает *Salsola collina* Pall., которая вместе с донниками обладают повышенной стрессо- и солеустойчивостью (Li et al., 2021; Wang et al., 2024) в условиях, характерных для отвалов. Помимо отмеченных видов вклад в формирование мортмассы поверхности инициальных эмбриоземов вносят также *Dracocephalum nutans* L., *Crepis sibirica* L., реже *Achillea millefolium* L. (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика исследуемых участков

Номер участка	Тип эмбриозема (обозначение участка)	Описание участка (почвообразующие породы)	Возраст, лет	Число видов, шт.	Площадь проективного покрытия, %	Фитоценоз	Доминирующие виды (средняя высота, см)
1	инициальный (ЭИпион_тр)	южный склон (плотные)	35–40	8	10	пионерный	<i>Échium vulgáre</i> L. (50), <i>Salsola collina</i> Pall (10).
2	органо-аккумулятивный (ЭАОпр_др)	горизонтальный, бугристый (плотные)	35–40	12	70*	простой	<i>Betula pendula</i> Roth (8000).
3	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	25–30	16	75	простой	<i>Fragaria vesca</i> L. (10), <i>Melilotus officinalis</i> L (50).
4	дерновый (ЭДсл_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	25–30	20	80	сложный	<i>Dactylis glomerata</i> L (90).
5	органо-аккумулятивный (ЭАОсл_др)	северный склон (плотные)	35–40	14	80	сложный	<i>Betula pendula</i> Roth (7500).
6	дерновый (ЭДсл_тр)	горизонтальный, бугристый (рыхлые)	20–25	25	85	сложный	<i>Dactylis glomerata</i> L. (70), <i>Bromus inermis</i> L (95).
7	инициальный (ЭИпион_тр)	горизонтальный, спланированный (плотные)	10–15	9	11	пионерный	<i>Melilotus officinalis</i> L. (60), <i>Échium vulgáre</i> L. (60),
8	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)	пологий южный склон (плотные)	20–25	6	90	простой	<i>Betula pendula</i> Roth (8000).

Примечание.

*Для лесных сообществ приводится сомкнутость крон.

Простые сообщества формируются при доминировании древесных пород (ЭАОпр_др) на склоновых участках и участках с пересеченным рельефом, а также травянистых растений (ЭОАпр_тр) на спланированных горизонтальных поверхностях (Frouz et al., 2018; Sokolova et al., 2021) на промежуточном этапе сукцессии. На участках формирования лесных сообществ, благодаря высокой экологической пластичности (Oksanen, 2021), преимущество получает *Betula pendula* Roth.. На увлажненных участках она может уступать *Populus tremula* L., *Populus nigra* L. и *Salix caprea* L., а на более сухих в составе древостоя заметно увеличивается доля *Pinus sylvestris* L. В целом состав древостоев, наряду с адаптивными возможностями древесных пород (Алиев, Хамарова, 2019), значительно зависит от состава лесов окружающих ненарушенных экосистем (Шугалей, 1997). В травянистом ярусе разнообразие видов растений не отличается богатством: в зависимости от возраста участка оно составляет от 5 до 13 видов (табл. 2). Эта зависимость имеет нелинейный характер. Основным фактором, определяющим видовой состав яруса, является затененность. Наблюдения показали, что на более молодых участках, где кроны еще не сомкнулись или сомкнулись относительно недавно, в травянистом ярусе видовое разнообразие растений обеспечивается за счет рудеральных видов: *Melilotus officinalis* L., *Tussilago farfara* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg. и других. На средневозрастных участках отвалов с сомкнутыми кронами число видов травянистого яруса

минимально. Здесь наряду с редкими рудеральными видами появляются отдельные представители лесных: *Orthilia secunda* L., *Pilosella officinarum* Vaill., *Elymus mutabilis* (Drobow) Tzvelev. На старых участках видовое разнообразие травянистого яруса увеличивается за счет лесных видов; дополнительно формируется и подлесок. Как правило, он представлен *Sorbus aucuparia* L. и/или *Prunus padus* L.. В составе подлеска участка №5 был зафиксирован также один инвазивный вид – *Acer negundo* L. Появление кустарникового яруса в техногенных лесных экосистемах, как указывает Е.Р. Кандрашин (1989), свидетельствует о наступлении стадии сукцессии сложного фитоценоза (ЭАОсл_др). Однако из-за высокой разреженности травяного и кустарникового ярусов их вклад в подстилку незначителен. В целом подстилочный горизонт органо-аккумулятивных горизонтов лесных участков формируется из листьев и мелких веток березы, в меньшей степени осины и сосны, которые относятся к категориям средне- и медленноразлагающихся растительных остатков (Пристова, 2020).

Простые травяные сообщества (ЭОАпр_тр) по сравнению с лесными характеризуются большим разнообразием видов, участвующих в формировании подстилки. На таких участках, в силу повышенной плотности и низкого плодородия почв, в видовом составе преобладают малотребовательные к эдафическим условиям *Melilotus officinalis* L. и *Pimpinella saxifraga* L. (табл. 2). Обильно представлена также *Fragaria vesca* L., распространению которой на отвалах способствует ее стрессоустойчивостью (Song et al., 2024) и вегетативное размножение с помощью ползучих побегов (усов). Отдельными куртинами встречаются злаки *Dactylis glomerata* L. и *Elymus mutabilis* L.

Участки, занятые сложными травяными сообществами (ЭОАсл_тр), отличаются наиболее благоприятными эдафическими условиями (табл. 1), поскольку формируются либо на потенциально плодородных породах со значительной долей физической глины в составе, либо на субстратах, где тонкодисперсные фракции накопились за счет процессов выветривания (Кусов, 2007). Не менее важным фактором, позволяющим сложным травяным сообществам формироваться на поверхности техногенных ландшафтов, является накопление в эмбриоземах азота, стимулирующего внедрение злаков (Глебова, 2005; Госсен, Соколов, 2014). В таких условиях в составе растительных ценозов заметно увеличивается доля *Bromus inermis* L., *Dactylis glomerata* L. и *Poa angustifolia* L., также как и их вклад в формирование подстилок. Обильно представлены *Vicia cracca* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Chamaenerion angustifolium* L., *Scop.*, *Melilotus officinalis* L. и другие виды спланированных участков (ЭОАпр_тр).

Анализ морфологического строения подстилочных горизонтов и расчет запасов мортмассы позволили выявить отличительные особенности, характерные не только для одинаковых типов почв, но и сходных растительных сообществ (табл. 3). Мощность подстилки является одним из основных показателей, анализ которого позволяет оценивать скорость преобразования растительного опада (Волков, 2015). Минимальную мощность имеют фрагментарные подстилочные горизонты эмбриоземов инициальных (ЭИ), в составе которых отсутствует или плохо выражен ферментативно-перегнойный слой (OFH). Соответственно, инициальные эмбриоземы имеют наименьшие запасы мортмассы в подстилке, в составе которых преобладает свежий опад (ветошь).

Органо-аккумулятивные эмбриоземы (ЭОА) демонстрируют максимальные значения мощности подстилки, варьируя в зависимости от типа фитоценоза и положения участков в ландшафте. Небольшие значения мощности при повышенной плотности подстилки были зафиксированы в сложном лесном фитоценозе (ЭАОсл_др) на северном склоне, что, по всей видимости, указывает на активное ее преобразование в зимний период благодаря наибольшей мощности снегового покрова. Об этом также свидетельствует отсутствие подгоризонта OL. В целом для исследуемых техногенных лесных сообществ свойственно отсутствие или незначительная доля запасов мортмассы свежего опада в составе подстилок (табл. 3) практически до окончания вегетационного периода. Обратная тенденция в соотношении запасов мортмассы в различных подгоризонтах подстилки наблюдается в дерновых эмбриоземах под сложными травяными фитоценозами (ЭДсл_тр). Здесь доля запасов мортмассы в ветоши в 1,5 и более раз превышает таковую в ферментативно-перегнойном слое.

В целом можно отметить, что запасы мортмассы во фрагментарных подстилочных горизонтах инициальных эмбриоземов вдвое уступают или соответствуют запасам, приводимым А.А. Титляновой и С.В. Шибаревой (2012) для почв сухих степей. Примечательно, что близость значений коррелирует с суммой биологически активных температур, характерных для плакоров отвалов и сухих степей юга Сибири (Андроханов и др., 2023; Соколова, 2023). В органо-аккумулятивных эмбриоземах под простыми фитоценозами запасы подстилки аналогичны значениям, характерным для луговых степей (Титлянова, Шибарева, 2012), с той разницей, что на долю свежего опада в экосистемах отвалов приходится около 2/3 мортмассы (табл. 3). Запасы подстилки в дерновых эмбриоземах сложных

травяных сообществ, в целом, соответствуют запасам в луговых степях Западной и Средней Сибири (Биологическая продуктивность ..., 1988). При этом сохраняется высокая доля ветоши и опада (около 2/3), обусловленная, очевидно, более низкой микробиологической активностью почв отвалов (Кандрашин, 1989). Запасы мортмассы в техногенных лесных экосистемах, напротив, в среднем вдвое ниже, чем в березовых лесах и колках естественных ландшафтов Сибири. Отмеченное явление связано, на наш взгляд, с неразвитостью в лесах отвалов кустарникового и травянистого ярусов.

Таблица 2

Характеристика подстилок исследуемых участков

Номер участка	Обозначение	Средняя мощность подстилки, см	Запасы мортмассы, т/га, сух. масса	
			подгоризонт OL	подгоризонт OFH
1	ЭИпион_тр	0,5*	0,70	0
2	ЭАОпр_др	3,8	0	8,55
3	ЭОАпр_тр	3,0	2,95	1,40
4	ЭДсл_тр	3,0	2,80	1,80
5	ЭАОсл_др	2,5	0	9,20
6	ЭДсл_тр	2,0	4,30	2,80
7	ЭИпион_тр	1,0*	1,30	0,29
8	ЭОАпр_др	2,7	1,10	7,80

Примечание.

* – фрагментарные горизонты в инициальных эмбриоземах.

Определение содержания основных биогенных элементов в компонентах исследуемых органогенных горизонтов почв проводилось с целью оценки их качественного состояния и последующего расчета запасов углерода. Результаты показывают, что *содержание углерода* в подстилках отличается как на различных участках, так и в анализируемых подгоризонтах. Наиболее высокие средние и медианные концентрации углерода отмечены в подгоризонтах OL (рис. 2), для них же характерен минимальный разброс значений (37,6–43,2%). Минимальные значения фиксируются в пределах участков занятых лесной растительностью, где опад деревьев до августа отсутствует и представлен остатками единичных экземпляров растений полога. Максимальные значения концентраций углерода в опаде свойственны участкам с доминированием в составе растительного покрова злаков (участок №6).

Более вариативно содержание углерода в ферментативно-перегнойном слое (OFH) (рис. 2). Разброс значений зависит от состава растительности, который обусловлен, в свою очередь, физическими, химическими и биологическими свойствами почв и этапом сукцессии. Так, за счет мелких ветвей максимальные концентрации углерода (48,4%) в подгоризонтах OFH фиксируются в подстилках органо-аккумулятивных эмбриоземов лесных участков (ЭОАпр_др). Минимальные значения (9,4%) отмечаются в эмбриоземах дерновых, сформированных на глинистых породах (ЭДсл_тр). По всей видимости, в глинистых почвах, в отличие от каменистых субстратов, по причине повышенной водоудерживающей способности почв складываются более благоприятные условия для разложения подстилок. В среднем содержание углерода в OFH в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OL, что связано с более активными процессами разложения нижних слоев подстилок (Ведрова и др., 2018).

Процентное *содержание азота* в растительности, а, следовательно, и в подстилках зависит от множества абиотических и биотических факторов: от механического состава почв, строения почвообразующих пород, рельефа и режима увлажнения, интенсивности поступления растительных остатков и структуры опада, органа растения, входящих в подстилку, и климатических условий местности (Zhang et al., 2018). Кроме того, большое влияние оказывает скорость разложения органического вещества, так как при данном процессе происходит потеря азота в силу вовлечения его снова в биологический круговорот. Содержание азота в мортмассе варьирует в широких пределах: от 0,56 до 2,90% (рис. 2). Дифференциация этих значений обусловлена видовым составом растительных сообществ, поскольку минимальные концентрации азота фиксируются в сложных травяных сообществах (ЭДсл_тр), максимальные в простых лесных фитоценозах (ЭОАпр_др). На этом фоне содержание азота в подгоризонтах OFH в среднем в 1,5 раза ниже, чем в OL, т.к. в процессе разложения мортмассы определенная его часть, способная к миграции, вновь вовлекается в биологический круговорот. С другой стороны, отмечаемое в литературе обогащение азотом нижней части подстилок за счет пассивной диффузии, привноса почвенной фауной и накоплением грибами и бактериями

(Титлянова, Шибарева, 2012), в исследуемых почвах техногенных ландшафтов не наблюдается, что, вероятно, связано с их низкой освоенностью биотой.

Отношение C/N, отражающее качественное состояние органического вещества подстилок, демонстрирует широкий спектр значений. В массе опада, который представлен преимущественно остатками травянистых растений, C/N варьирует в интервале от 16,8 до 51,5 (рис. 2). При этом минимальные значения соответствуют тонким фрагментарным подгоризонтам OL инициальных эмбриоземов (ЭИпион_тр), максимальные – богатым опадом злаков подгоризонтам OL дерновых (ЭДсл_тр). Аналогичная картина наблюдается и в OFH подгоризонтах участков травяных сообществ; при том в тех же сообществах соотношение C/N в подгоризонте OL в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OFH. Отношение C/N в ферментативно-перегнойном слое почв лесных участков, напротив, выше в среднем в 1,5 раза.

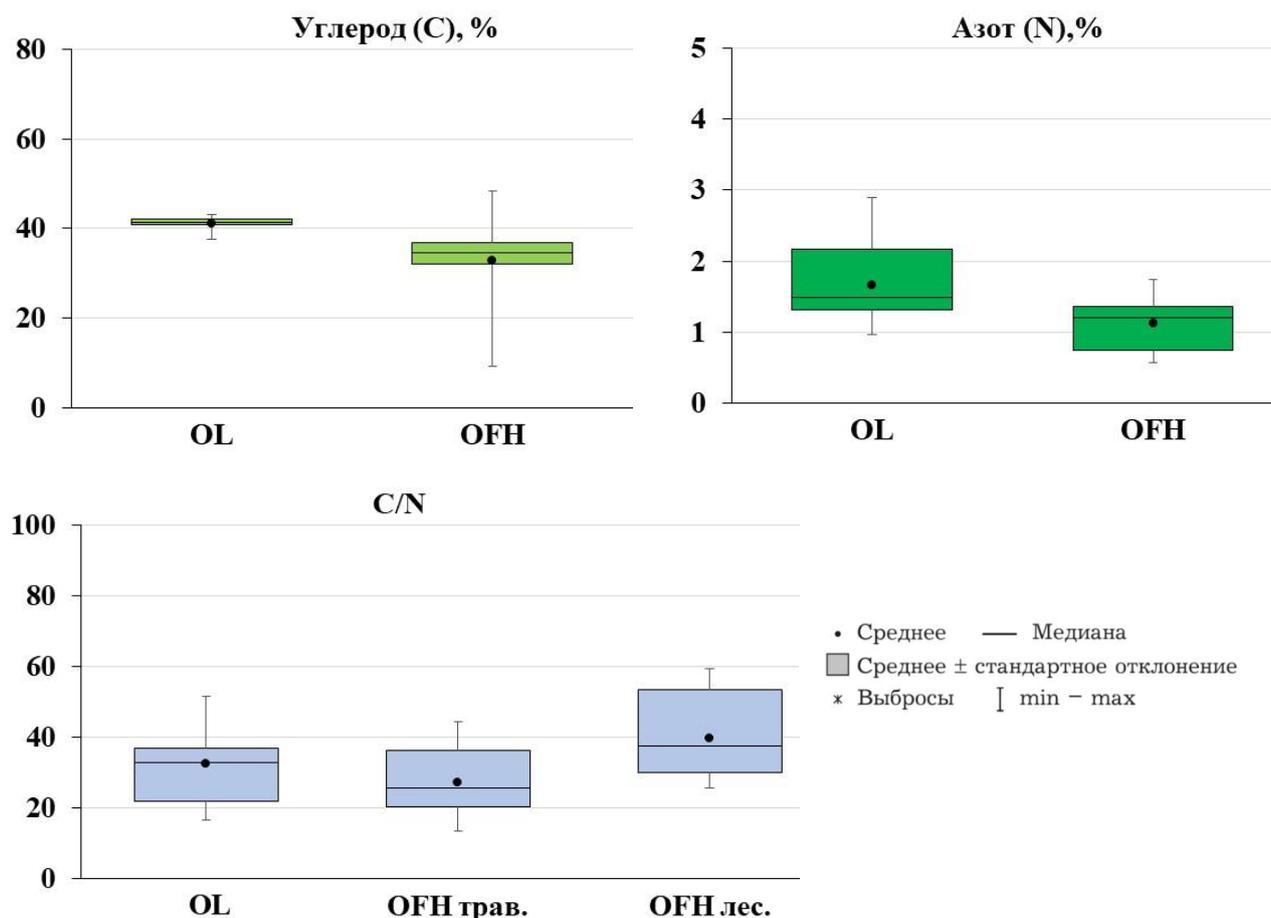


Рисунок 2. Содержание и соотношение углерода и азота в подгоризонтах OL (n=18) и OFH (n=22) подстилок эмбриоземов.

Расчет запасов углерода в подстилках изученных эмбриоземов показал, что их значения варьируют в диапазоне от 0,26 до 3,26 т С/га (рис. 3). Наибольшие запасы сосредоточены в эмбриоземах, сформированных под лесными, как простыми (3,04–3,11 т С/га), так и сложными (3,26 т С/га), сообществами (ЭОАпр_др и ЭДсл_др). Полученные значения соответствуют минимальному уровню запасов углерода, отмечаемому в лесах Звенигородской биостанции МГУ (Жопчик и др., 2023), и попадают в диапазон оценок (1,3–70,8 т С/га) для лесных почв Европы и России (Varitz et al., 2010; Честных и др., 2007). Наименьшие запасы (0,26–0,63 т С/га) фиксируются в пионерных сообществах, приуроченных к инициальным эмбриоземам (ЭИпион_тр). Запасы углерода в подстилках простых и сложных травяных фитоценозов варьируют в интервале 1,57–2,08 т С/га, с максимумом в сообществах, сформированных на рыхлых породах (ЭДсл_тр). В структуре запасов углерода в травяных экосистемах 65–100% приходится на опад (подгоризонт OL), в лесных – 85–100% на ферментативно-перегнойный слой (OFH). Такая дифференциация связана с разницей в скорости круговорота травяных и лесных экосистем и преобразования опада. Более мягкий опад травянистых растений разлагается быстрее, нежели грубый древесный. В то же время, части травянистых растений могут отмирать в течение всего

вегетационного периода, тогда как массовый опад листьев деревьев происходит осенью, а летом на поверхности сохраняется преимущественно ферментативно-перегнойный подгоризонт.

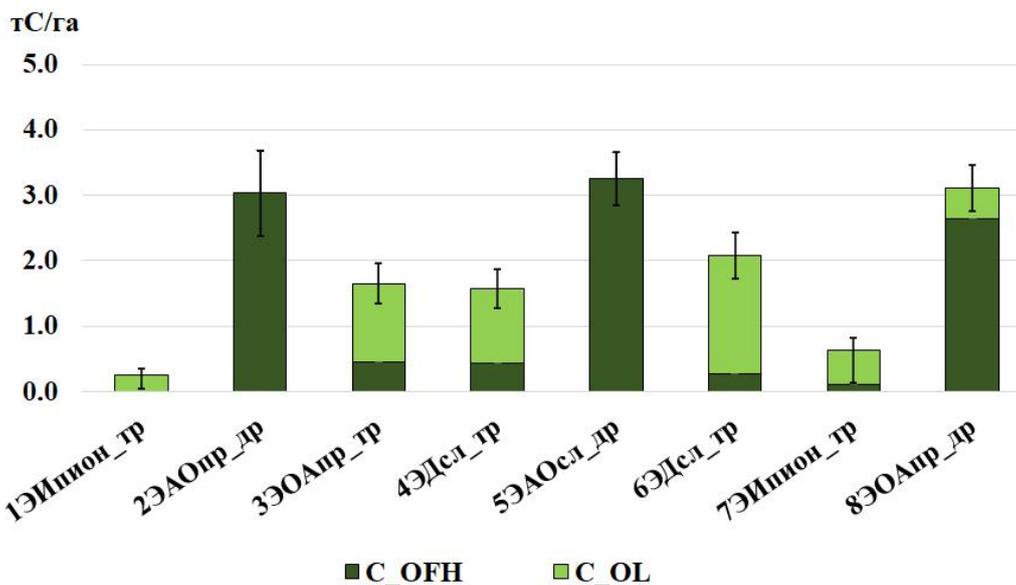


Рисунок 3. Запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем. Обозначения см. табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования органогенных горизонтов почв отвалов, образованных из отходов добычи антрацита, показали, что в техногенных экосистемах в силу дифференцированности эдафических условий и возраста участков формируемые подстилки характеризуются неоднородностью по составу, строению и запасам органического вещества и углерода. Отмечаемые особенности подстилок имеют приуроченность к определенным типам эмбриоземов и произрастающим на них видам растений, которые группируются в пионерные, простые и сложные лесные и травянистые сообщества.

Минимальные мощность (до 1 см) и запасы органического вещества (до 1,59 т/га) фиксируются во фрагментарных подстилках пионерных растительных сообществ инициальных эмбриоземов. В их составе преобладает опад (подгоризонт OL) преимущественно из остатков *Melilotus officinalis* L., *Échium vulgáre* L., во влажные годы *Salsola collina* Pall. Под простыми травяными сообществами в органо-аккумулятивных эмбриоземах мощность подстилок достигает 3 см, а запасы органического вещества 4,35 т/га. На 2/3 они представлены подгоризонтами OL и состоят, по большей части, из остатков *Melilotus officinalis* L., *Pimpinella saxifraga* L. и *Fragaria vesca* L. Подстилки простых фитоценозов залесенных участков отличаются преобладанием (от 87 до 100% по запасам) частично переработанных растительных остатков ферментативно-перегнойного слоя (подгоризонт OFH), состоящего, в основном, из листьев и мелких веток *Betula pendula* Roth.; их мощность колеблется в интервале 2,7–3,8 см, а запасы органического вещества 8,55–8,90 т/га.

Небольшой мощностью, но повышенными запасами сухой массы характеризуются подстилки сложных фитоценозов. Так, в дерновых эмбриоземах травяных экосистем мощность подстилки колеблется в пределах 2,0–3,0 см, а запасы органического вещества 4,60–7,10 т/га. В их составе 2/3 мортмассы приходится на опад злаков *Bromus inermis* L., *Dactylis glomerata* L. и *Poa angustifolia* L., в меньшей степени на *Vicia cracca* L., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Chamaenerion angustifolium* L., *Scop.*, *Melilotus officinalis* L. В органо-аккумулятивных эмбриоземах сложных лесных сообществ мощность подстилки около 2,5 см, а запасы сухой массы 9,20 т/га. Подгоризонт OL, как и в других техногенных лесных экосистемах, здесь фактически не выражен. Подгоризонт OFH, помимо доминирующих остатков *Betula pendula* Roth., представлен продуктами неполного разложения растений формирующегося кустарниково-травянистого яруса.

Содержание углерода в подстилках варьирует в широком диапазоне (от 9,4 до 48,4%, при среднем 36,7%) и отличается в зависимости от типа и состава растительных сообществ и эдафических условий. Содержание углерода в OFH в среднем в 1,2–1,3 раза ниже, чем в OL. Те же факторы формируют разброс содержания азота в подстилках (от 0,56 до 2,90%, при среднем 1,35%). В

подстилках почв исследуемых отвалов не происходит обогащение азотом нижней части, что, вероятно, связано с низкой биологической активностью.

В целом, запасы углерода в подстилках травяных и лесных техногенных экосистем находятся в интервале 0,26–3,26 т С/га и увеличиваются в ряду пионерные < простые травянистые ≤ сложные травянистые < простые лесные = сложные лесные сообщества.

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что для формирования резервов углерода в техногенных ландшафтах при проведении рекультивации необходимо создавать условия для ускоренного развития сложных растительных сообществ. Учитывая специфику функционирования техногенных экосистем, более быстрыми темпами это можно достичь при выравнивании и отсыпке поверхности рыхлыми породами, способствуя, тем самым, ускоренному развитию травяных фитоценозов (Скотарева и др., 2024). Это позволит, наряду с формированием краткосрочного фонда углерода в виде подстилок, создать предпосылки для развития гумусово-аккумулятивных горизонтов как депо долгосрочной секвестрации. Для секвестрации соответствующих запасов углерода в подстилках лесных насаждений нужно больше времени ввиду специфики развития древесной растительности; при этом вместе с накоплением древесины формируется пул среднесрочного депо углерода (Уфимцев и др., 2025).

В любом случае, формирование на поверхности отвалов углерезов как лесных, так и травяных подстилок и других органометных горизонтов является важным фактором, препятствующим образованию и миграции органических поллютантов (Соколов и др., 2021) и тяжелых металлов (Скотарева и др., 2025).

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по теме государственного задания Института почвоведения и агрохимии СО РАН (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

- Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. <https://doi.org/10.1134/s106422932207002x>
- Агроклиматические ресурсы Новосибирской области. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. 155 с.
- Алиев И.Н., Хамарова З.Х. Восстановление древесной растительности на отвалах месторождений полезных ископаемых на территории Кабардино-Балкарии // Растительные ресурсы. 2019. Том 55. № 1. С. 102–112. <https://doi.org/10.1134/s0033994619010035>
- Андроханов В.А., Соколова Н.А. Почвенно-экологическое состояние поверхности отвалов антрацитовых месторождений (на примере Горловского антрацитового месторождения, Новосибирская область) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Том 36. № 5. С. 31–36. https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31
- Андроханов В.А., Богуславский А.Е., Соколов Д.А., Филонова Ю.О., Ужогова А.А. Почвенно-экологическая оценка рекультивации отвалов угольных месторождений // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Том 31. № 1. С. 1–12. <http://doi.org/10.15372/KhUR2023433>
- Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах / А.А. Тишков (отв. ред.); Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2008. 376 с.
- Байтурина Р.Р., Султанова Р.Р., Асылбаев И.Г. Оценка запаса углерода в лесной подстилке и верхнем слое почв насаждений основных лесобразующих пород // Journal of Agriculture and Environment. 2023. № 12 (40). Р. 16 <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.24>
- Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности / Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Снытко В.А. и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988. 134 с.
- Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В., Метелева М.К. Трансформация органического вещества подстилки в лесных культурах // Лесоведение. 2018. № 1. С. 24–36. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010023>
- Волков А.Г. Лесная подстилка в парцеллах ельников северной подзоны тайги // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 2 (344). С. 63–69.
- Воронов А.Г. Геоботаника: Учеб. пособие для ун-тов и пед. ин-тов. 2-е изд. Высшая школа, 1973. 384 с.
- Глебова О.И. Биогеографическая диагностика эмбриоземов Кузбасса. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск. 2005. 18 с.

- Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка содержания гумуса в почвах рекультивированных отвалов угольных разрезов Кузбасса // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2014. № 4 (33). С. 33–40.
- Кандрашин Е.Р. Сукцессии биоты в техногенных экосистемах (на примере Кузнецкого угольного бассейна): Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1989. 17 с.
- Копчик Г.Н., Копчик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686–1702. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>
- Королева Т.С., Шунькина Е.А. Обзор мирового опыта консервации углерода в существующих лесных резервуарах // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 4. С. 22–39.
- Кудяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Том 142. № 6. С. 545–559. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Куприянов А.Н., Манаков Ю.А. Закономерности восстановления растительного покрова на отвалах Кузбасса // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 51–58. <https://doi.org/10.15372/SJFS20160205>
- Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.
- Курачев В.М., Кандрашин Е.Р., Рагим-заде Ф.К. Сингенетичность растительности и почв техногенных ландшафтов: экологические аспекты, классификация // Сибирский экологический журнал. 1994. Том 1. № 3. С. 205–214.
- Кусов А.В. Гранулометрическая диагностика внутрпочвенного выветривания обломочного материала в техногенных ландшафтах // Сибирский экологический журнал. 2007. Том 14. № 5. С. 837–843.
- Почвенно-климатический атлас Новосибирской области / Отв. ред. А.П. Сляднев. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1978. 122 с.
- Пристова Т.А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. № 3. С. 62–72. <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.62>
- Продуктивность травяных экосистем: Справочник. Москва: Издательство МБА, 2020. 100 с.
- Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e259. <http://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259>
- Скотарева А.Е., Гуркова Е.А., Соколов Д.А. Оценка содержания и подвижности тяжелых металлов в почвах техногенных ландшафтов (на примере Горловского месторождения антрацитов, Новосибирская область) // Экология и промышленность России. 2025. Том 29. № 3. С. 34–41. <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-3-34-41>
- Соколов Д.А., Морозов С.В., Абакумов Е.В., Андроханов В.А. Полициклические ароматические углеводороды в почвах отвалов антрацитовых месторождений Сибири // Почвоведение. 2021. № 6. С. 701–714. <http://doi.org/10.31857/S0032180X21060125>
- Соколов Д.А., Гуркова Е.А., Соколова Н.А. Литогенный потенциал почвообразования в техногенных ландшафтах угледобывающих месторождений Сибири // Экология и промышленность России. 2022. Том 26. № 11. С. 48–54. <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54>
- Соколова Н.А., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка пригодности вегетационных индексов для выявления почвенно-экологического состояния поверхности отвалов антрацитовых месторождений // Экология и промышленность России. 2020. Том 24. № 1. С. 62–68. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>
- Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения). Диссертация ... канд. биол. наук. Томск, 2023. 200 с.
- Титлянова А.А., Шибарева С.В. Подстилки в лесных и травяных экосистемах. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2012. 135 с.
- Трефилова О.В., Беланов И.П., Уфимцев В.И., Ефимов Д.Ю. Эффекты фитогенного поля сосны в различных климатических условиях: почвенно-экологический эксперимент // Лесоведение. 2021. № 2. С. 156–172. <http://doi.org/10.31857/S0024114821020091>

- Уфимцев В.И., Соколов Д.А., Легощина О.М. Депонирование углерода в надземной фитомассе древостоев на отвалах Горловского антрацитового месторождения // Уголь. 2025. № 4. С. 108–113. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-108-113>
- Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
- Шугалей Л.С. Первичное почвообразование на отвалах вскрышных пород под культурой сосны // Почвоведение. 1997. № 2. С. 247–253.
- Методика полевых работ для экспресс оценки характеристик лесной растительности и почв на тестовом полигоне интенсивного уровня в рамках реализации важного инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4 / В.Л. Черных (руководитель группы). Москва: ФГБУН Центр по проблемам экологии продуктивности лесов РАН, 2023. [Электронный ресурс]. https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf, p-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf. (дата обращения 23.03.2025).
- Baritz R., Seufert G., Montanarella L., Van Ranst E. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe // Forest Ecology and Management. 2010. Vol. 260. No. 3. P. 262–277. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025>
- Bar-On Y.M., Li X., O’Sullivan M., Wigner J.-P., Sitch S., Ciais P., Frankenberg C. Fischer W.W. Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools // Science. 2025. Vol. 387. No. 6740. P. 1291–1295. <http://doi.org/10.1126/science.adk1637>
- Frouz J., Mudrák O., Reitschmiedová E., Walmsley A., Vachová P., Šimáčková H., Albrechtová J., Moradi J., Kučera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 234 p.
- Li S., Chen Y., Duan Y., Zhao Y., Zhang D., Zang L., Ya H Widely targeted metabolomics analysis of different parts of *Salsola collina* pall // Molecules. 2021. Vol. 26. No. 4. P. 1126. <https://doi.org/10.3390/molecules26041126>
- Oksanen E. Birch as a model species for the acclimation and adaptation of northern forest ecosystem to changing environment // Frontiers in Forests and Global Change. 2021. Vol. 4. P. 682512. <http://doi.org/10.3389/ffgc.2021.682512>
- Oliver K., Innvar S., Lorenc T., Woodman J., Thomas J. A Systematic Review of Barriers to and Facilitators of the Use of Evidence by Policymakers // BMC Health Serv Res. 2014. Vol. 14. No. 2. <http://doi.org/10.1186/1472-6963-14-2>
- Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (editors). Institute for Global Environmental Strategies, 2003. 593 p.
- Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 6–32. <http://doi.org/10.17223/19988591/56/1>
- Sokolova N.A., Solovyev S.V., Sokolov D.A. Restoration of biodiversity of technogenic landscapes of anthracite deposits in Siberia. VI International Scientific Conference “Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions”. BIO Web Conferences. 2021. Vol. 31. Article Number 00026. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100026>
- Song P., Yang R., Jiao K., Guo B., Zhang L., Li Y., Zhang K., Zhou S., Wu X., Li X. FvMYB108, a MYB Gene from *Fragaria vesca*, Positively Regulates Cold and Salt Tolerance of Arabidopsis // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25. No. 6. P. 3405. <http://doi.org/10.3390/ijms25063405>
- Wang Z., You J., Xu X., Yang Y., Wang J., Zhang D., Mu L., Zhuang X., Shen Z., Guo C. Physiological and Biochemical Responses of *Melilotus albus* to Saline and Alkaline Stresses // Horticulturae. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 297. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030297>
- Zhang, Y., Yang, J., Yang, W., Tan B., Fu C., Wu F. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. No. 51. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0731-9>

Поступила в редакцию 02.04.2025

Принята 14.05.2025

Опубликована 19.05.2025

Сведения об авторах:

Токарева Анастасия Вадимовна – студентка Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); n4sty4t@yandex.ru

Уфимцев Владимир Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации и биомониторинга Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово, Россия); uwy2079@gmail.com

Соколова Наталья Александровна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovanatalija@mail.ru

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovdenis@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Litter formation and its carbon deposition capacity in forest and grass man-made ecosystems of anthracite mining coal mining spoils

© 2025 A. V. Tokareva¹, V. I. Ufimtsev², N. A. Sokolova³, D. A. Sokolov³

¹Novosibirsk State University, st. Pirogova, 1, Novosibirsk, Russia. E-mail: n4sty4t@yandex.ru

²Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the SB RAS, Sovetsky ave., 18, Kemerovo, Russia. E-mail: uwy2079@gmail.com

³Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: sokolovdenis@mail.ru

The aim of the study was to identify litter formation features and assess litter carbon- sequestration ability in the forest and grass ecosystems of man-made landscapes of the Gorlovka anthracite deposit.

Location and time of the study. The outer anthracite mining spoil of the Gorlovka anthracite mine (54.568880, 83.588956), Novosibirsk region, Iskitimsky district, June-August 2024.

Methods. Litter sampling at the study sites was carried out using the envelope method as per the methodological recommendations for soil samples collection and analysis of the Unified National Monitoring System for Climatically Active Substances. A plastic cylinder with a diameter and height of 100 mm was used to collect the material. The litter samples were analyzed after drying to an air-dry state in the Laboratory of soil reclamation of the ISSA SB RAS. After cutting with scissors, more thorough dispersion with a vibrating ball mill and subsequent homogenization, litter carbon and nitrogen content was determined using a CHNS/O analyzer 2400 Series II Perkin Elmer. Statistical processing of the results was performed using Microsoft Excel and PAST v2.17 software packages.

Results. In the mining spoils ecosystems, due to the heterogeneity of edaphic conditions and longevity of spontaneous revegetation of the sites, the formed litter was characterized by heterogeneity in composition, structure and organic matter and carbon pools. The noted features of the litter were confined to certain types of embryozems and plants growing on them, which are grouped into pioneer, simple and complex forest and herbaceous communities. The minimum thickness (up to 1 cm) and pools of organic matter (up to 1,59 t/ha) were found in fragmentary litters of pioneer plant communities on initial embryozems. The litter of complex phytocenoses and grass ecosystems of turf embryozems was characterized by small thickness, but maximum pools of dry mass. The litter carbon content ranged widely (from 9,4 to 48,4%, with an average of 36,7%) and differed depending on the type and composition of plant communities and edaphic conditions. In general, carbon pools in the grass and forest litter of man-made mining spoils ecosystems ranged 0,26-3,26 t C/ha, increasing in a row of pioneer < simple herbaceous ≤ complex herbaceous < simple forest=complex forest communities. At the same time, nitrogen enrichment of the lower litter layers did not occur in the studied anthracite mining spoils most likely due to the poor development of biota.

Keywords: reclamation; embryozems; soils of man-made landscapes; carbon sequestration; Technosol.

How to cite: Tokareva A.V., Ufimtsev V.I., Sokolova N.A., Sokolov D.A. Litter formation and its carbon deposition capacity in forest and grass man-made ecosystems of anthracite mining coal mining spoils. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8(1). e309. (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v8i1.309](https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.309)

REFERENCES

- Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and methods for studying the soil organic matter in the carbon polygons of Russia (Review). *Eurasian Soil Science*. 2022. No. 7. P. 849–860. <http://doi.org/10.1134/s106422932207002x>
- Agroclimatic resources of the Novosibirsk region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 155 p. (in Russian).
- Aliev I.N., Hamarova Z.H. Restoration of woody vegetation on mineral deposit dumps in Kabardino-Balkaria. *Rastitelnye Resursy*. 2019. Vol. 55. No. 1. P. 102–112. (in Russian). <http://doi.org/10.1134/S0033994619010035>
- Androkhanov V.A., Sokolova N.A. Soil-ecological state of the surface of dumps of anthracite deposits (on the example of the Gorlovsky anthracite deposit, Novosibirsk region). *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2022. Vol. 36. No. 5. P. 31–36. (in Russian). https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31
- Androkhanov V.A., Boguslavsky A.E., Sokolov D.A., Filonova Yu.O., Uzhogova A.A. Soil-Ecological Assessment of Reclamation at the Spoils of Coal Deposits. *Chemistry for Sustainable Development*. 2023. Vol. 31. No. 1. P. 1–12. <http://doi.org/10.15372/CSD2023433>
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. Biotic turnover of five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems / A.A. Tishkov (ed.). Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. 376 p. (in Russian).
- Baiturina R.R., Sultanova R.R., Asylbaev I.G. An evaluation of carbon stock in forest floor and topsoil of plantations of main forest forming species. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023. No. 12 (40). P. 16. (in Russian). <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.24>
- Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features / Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytko V.A. et al. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 1988. 134 p. (in Russian).
- Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Meteleva M.K. Transformation of organic matter of litter in forest plantations. *Lesovedenie*. 2018. No. 1. P. 24–36. (in Russian). <http://doi.org/10.7868/S0024114818010023>
- Volkov A.G. The Forest Litter in Spruce Formation in the Northern Subzone of Taiga. *Russian Forestry Journal*. 2015. No. 2 (344). C. 63–69. (in Russian).
- Voronov A.G. *Geobotany*. 2nd ed. Vysshaya Shkola Publ., 1973. 384 p. (in Russian).
- Glebova O.I. Biogeographical diagnostics of Kuzbassembryozems. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 18 p. (in Russian).
- Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of humus content in soils of reclaimed coal dumps in Kuzbass. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2014. No. 4 (33). P. 33–40. (in Russian).
- Kandrashin E.R. Biota succession in technogenic ecosystems (on the example of the Kuznetsk coal basin). Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Dnepropetrovsk, 1989. 17 p. (in Russian).
- Koptsik G.N., Koptsik S.V., Kupriyanova I.V., Kadulin M.S., Smirnova I.E. Estimation of carbon stocks in soils of forest ecosystems as a basis for monitoring the climatically active substances. *Eurasian Soil Science*. 2023. No. 12. P. 2009–2023. <http://doi.org/10.1134/s1064229323602196>
- Koroleva T.S., Shunkina E.A. The review of world experience preservation of carbon in the existing forest tanks. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2014. No. 4. C. 22–39. (in Russian).
- Kudeyarov V.N. Soil carbon sequestration: facts and challenges (analytical review). *Uspekhi sovremennoi biologii*. 2022. Vol. 142. No. 6. P. 545–559. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Kupriyanov A.N., Manakov A.Y. Regularities of restoration of plant cover on the dumps of the Kuznetsk Basin. *Siberian Journal Forestry Science*. 2016. No. 2. P. 51–58. (in Russian). <http://doi.org/10.15372/SJFS20160205>
- Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- Kurachev V.M., Kondrashin E.R., Ragim-zadeh F.K. Syngenetics of vegetation and soils of man-made landscapes: ecological aspects, classification. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 1994. Vol. 1. No. 3. P. 205–214. (in Russian).

- Kusov A.V. Granulometric diagnostics of intra-soil weathering of clastic material in man-made landscapes. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2007. Vol. 14. No. 5. P. 837-843. (in Russian).
- Soil and Climatic Atlas of the Novosibirsk Region / A.P. Slyadnev (ed.). Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 1978. 122 p. (in Russian).
- Pristova T.A. The rate of decomposition of plant litter in deciduous stands of post-harvest origin in the middle taiga of the Komi Republic. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2020. No. 3. P. 62–72. (in Russian). <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.62>
- Productivity of grass ecosystems: A handbook. Moscow: IBA Publishing House, 2020. 100 p. (in Russian).
- Skotareva A.E., Ivanov N.A., Sokolov D.A. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. Vol. 7. No. 2. e259. (in Russian). <http://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259>
- Skotareva A.E., Gurkova E.A., Sokolov D.A. Assessment of content and mobility of heavy metals in soils of technogenic landscapes (on the Example of Gorlovskoye anthracite deposit, Novosibirsk region). *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29. No. 3. P. 34–41. (in Russian). <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-3-34-41>
- Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Morozov S.V., Abakumov E.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of anthracite deposit dumps in Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2021. No. 6. P. 875–887. <http://doi.org/10.1134/S1064229321060120>
- Sokolov D.A., Gurkova E.A., Sokolova N.A. Lithogenic potential of soils formation in technogenic landscapes of Siberia. *Ecology and Industry of Russia*. 2022. Vol. 26. No. 11. P. 48–54. (in Russian). <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-11-48-54>
- Sokolova N.A., Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of the Suitability of Vegetation Indices to Identify Soil and Ecological Condition of the Surface of Anthracite Deposits Dumps. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. Vol. 24. No. 1. P. 62–68. (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>
- Sokolova N.A. Assessment of the soil-ecological state of coal mine dumps using remote methods (using the example of the Gorlovskoye anthracite deposit). *Dissertation ... Cand. of Biol. Sci.* Tomsk, 2023. 200 p. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Litter in forests and grasslands. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2012. 135 p. (in Russian).
- Trefilova O.V., Belanov I.P., Ufimtsev V.I., Efimov D.Yu. Pine's phytogenic field's effects in different climate conditions. *Lesovedenie*. 2021. No. 2. P. 156–172. (in Russian). <http://doi.org/10.31857/S0024114821020091>
- Ufimtsev V.I., Sokolov D.A., Legoshchina O.M. Carbon seposition in the above ground phytomass of forest stands on damps of the Gorlovsky anthracite field. *Ugol'*. 2025. No. 4. P. 108–113. (in Russian). <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-108-113>
- Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V. The Carbon Reserves in Litters of Forests in Russia. *Lesovedenie*. 2007. No. 6. P. 114–121. (in Russian).
- Shugaley L.S. Primary soil formation on overburden dumps under pine culture. *Pochvovedenie*. 1997. No. 2. P. 247–253. (in Russian).
- Field work methodology for express assessment of forest vegetation and soil characteristics at an intensive test site within the framework of the implementation of an important innovative project of national importance "Carbon in ecosystems: monitoring". Consortium No. 4 / V.L. Chernykh (group leader). Moscow: Center for Forest Productivity Ecology Problems of the Russian Academy of Sciences, 2023. [Electronic resource]. https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-pochvy_puly.pdf. (accessed on 23.03.2025). (in Russian).
- Baritz R., Seufert G., Montanarella L., Van Ranst E. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 260. No. 3. P. 262–277. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025>
- Bar-On Y.M., Li X., O'Sullivan M., Wigner J.-P., Sitch S., Ciais P., Frankenberg C. Fischer W.W. Recent gains in global terrestrial carbon stocks are mostly stored in nonliving pools. *Science*. 2025. Vol. 387. No. 6740. P. 1291–1295. <http://doi.org/10.1126/science.adk1637>

Frouz J., Mudrak O., Reitschmiedova E., Walmsley A., Vachova P., ˇSimaˇckova H., Albrechtova J., Moradi J., Kuˇcera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed.; International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 234 p.

Li S., Chen Y., Duan Y., Zhao Y., Zhang D., Zang L., Ya H Widely targeted metabolomics analysis of different parts of *Salsola collina* pall. *Molecules*. 2021. Vol. 26. No. 4. P. 1126. <https://doi.org/10.3390/molecules26041126>

Oksanen E. Birch as a model species for the acclimation and adaptation of northern forest ecosystem to changing environment. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2021. Vol. 4. P. 682512. <http://doi.org/10.3389/ffgc.2021.682512>

Oliver K., Innvar S., Lorenc T., Woodman J., Thomas J. A Systematic Review of Barriers to and Facilitators of the Use of Evidence by Policymakers. *BMC Health Serv Res*. 2014. Vol. 14. No. 2. <http://doi.org/10.1186/1472-6963-14-2>

Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (editors). Institute for Global Environmental Strategies, 2003. 593 p.

Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021. № 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>

Sokolova N.A., Solovyev S.V., Sokolov D.A. Restoration of biodiversity of technogenic landscapes of anthracite deposits in Siberia. VI International Scientific Conference “Problems of Industrial Botany of Industrially Developed Regions”. *BIO Web Conferences*. 2021. Vol. 31. Article Number 00026. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213100026>

Song P., Yang R., Jiao K., Guo B., Zhang L., Li Y., Zhang K., Zhou S., Wu X., Li X. FvMYB108, a MYB Gene from *Fragaria vesca*, Positively Regulates Cold and Salt Tolerance of Arabidopsis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. No. 6. P. 3405. <http://doi.org/10.3390/ijms25063405>

Wang Z., You J., Xu X., Yang Y., Wang J., Zhang D., Mu L., Zhuang X., Shen Z., Guo C. Physiological and Biochemical Responses of *Melilotus albus* to Saline and Alkaline Stresses // *Horticulturae*. 2024. Vol. 10. No. 3. P. 297. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030297>

Zhang, Y., Yang, J., Yang, W., Tan B., Fu C., Wu F. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau // *Annals of Forest Science*. 2018. Vol. 75. No. 51. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0731-9>

Received 02 April 2025

Accepted 14 May 2025

Published 19 May 2025

About the authors:

Anastasia V. Tokareva – Student at Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russia); n4sty4t@yandex.ru

Vladimir I. Ufimtsev – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Remediation and Biomonitoring of the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS (Kemerovo, Russia); uwy2079@gmail.com

Natalia A. Sokolova — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Geography and Soil Genesis at the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russia); sokolovanatalija@mail.ru

Denis A. Sokolov – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Remediation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russia); sokolovdenis@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)