УДК 550.47

DOI: 10.15372/KhUR2023433

EDN: AZTPZF

Почвенно-экологическая оценка рекультивации отвалов угольных месторождений

В. А. АНДРОХАНОВ[1], А. Е. БОГУСЛАВСКИЙ[2], Д. А. СОКОЛОВ[1], Ю. О. ФИЛОНОВА[2,3], А. А. УЖОГОВА[2,3]

[1]Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск (Россия)

E-mail: androhanov@issa-siberia.ru

[2]Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск (Россия)

[3]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск (Россия)

(Поступила 18.05.22; после доработки 15.08.22)

Аннотация

Выполнена геохимическая характеристика почв, растительности и грунтовых вод рекультивированных отвалов трех угольных месторождений. Рекультивация была проведена 30–40 лет назад, после чего отвалы были оставлены под самозарастание без дополнительных мероприятий. Общей закономерностью для всех участков является наличие углистых частиц, окисление которых приводит к увеличению температуры в породах отвала. Сумма биологически активных температур на отвалах превышает значения естественных почв ненарушенных участков. Техногенные ландшафты характеризуются меньшей по сравнению с контрольными участками долей влаголюбивых лесных и луговых видов. Гидрогеохимические аномалии практически не выходят за пределы затопленных карьерных выемок. Проведение рекультивации посредством нанесения плодородного слоя почвы способствует минимизации негативных эффектов, связанных с повышением температур почв отвалов, и ускорению восстановления зональных растительных сообществ.

Ключевые слова: рекультивация угольных отвалов, тяжелые металлы, формы нахождения, коэффициент накопления элементов в растениях, растительный покров, гидротермические условия

ВВЕДЕНИЕ

Горная промышленность оказывает одно из наиболее интенсивных воздействий, приводящих к масштабной трансформации природной среды. Особенно заметно это стало проявляться с середины XX века, когда, благодаря появлению мощной карьерной техники, по многим полезным ископаемым произошел переход от шахтной добычи к карьерным разработкам, оставляющим после себя огромные карьерные выработки в окружении отвалов вскрышных пород. Далеко не всегда экономически и технологически возможно проведение полной ликвидации техногенного влияния и восстановления исходных ландшафтов. Проведение рекультивации нарушенных сред является своего рода компромиссом между экономикой и природоохраной.

Добыча угля имеет собственную специфику, которая позволяет его выделить среди полезных ископаемых. С одной стороны, потребность экономики в этом ресурсе приводит к наибольшему распространению угольных карьеров, с другой стороны, в отличие от прочих полезных ископаемых, остаточные содержания в отвалах углистых частиц не приводит к выходу на по-

© Андроханов В. А., Богуславский А. Е., Соколов Д. А., Филонова Ю. О., Ужогова А. А., 2023

верхность других загрязнителей, а сами углистые частицы не имеют токсичного воздействия на биоту.

Россия занимает шестое место в мире по добыче угля. По данным Минэнерго России, в январе 2022 г. общая производственная мощность угольных объектов составила 523 млн т. Из-за добычи угля природные ландшафты на огромной территории были уничтожены или сильно изменились. На смену природным экосистемам пришли быстро растущие участки техногенных ландшафтов, начали появляться новые ландшафтные и рельефные формы, обусловленные техногенной денудацией и аградацией. Добыча угля в России ведется на 171 объекте (на 54 угольных шахтах и 117 разрезах), большинство из которых расположено в Сибири (Кузбасс) и соседних районах. Поэтому для этого региона особенно актуальны вопросы рекультивации открытых горных работ и добычи угля [1].

В настоящее время для рекультивации почв и растительного покрова на деградированных в результате производства землях используется большое количество рекультивационных технологий [2]. Однако их эффективность зависит от климатических и природных условий и уровня использования местных экологических активов при рекультивации деградированных земель. В 1980–90-х годах широкое распространение получила технология рекультивации путем нанесения покрытия из плодородного слоя почв (ПСП) на выровненные поверхности угольных отходов и формирования почвоподобных и искусственных структур – техноземов [3], позже названных техносолями [4]. На нерекультивированных участках, сложенных вскрышными породами (техногенным элювием), формируются более бедные почвы, которые в работе обозначены как эмбриоземы [3].

Цель исследований – выполнить на основе геохимического и эколого-функционального подхода анализ процессов формирования основных химических свойств и развития растительного покрова на рекультивированных и нерекультивированных участках угольных разрезов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методики исследований

Элементный состав твердых проб анализировали методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения с регистрацией на Si(Li) детекторе на станции элементного анализа ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Ошибка определения для отдельных элементов находится в пределах 5–15 %. Минеральный состав образцов определяли методом рентгеновской порошковой дифрактометрии с помощью дифрактометра ДРОН-3 (НПП Буревестник, Россия, CuK_α-излучение). Для дифференциации мелкозернистых слоистых алюмосиликатов ряд образцов перед определением напитывался этиленгликолем.

Состав почвенных частиц исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU (TESCAN Orsay Holding, Чехия), оборудованного системой микроанализа INCA Energy 450+ Xmax-80 (Oxford Instruments Nanoanalisys Ltd., Великобритания) в аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (Новосибирск). Определение состава минералов и стекол выполнялось при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного зонда 1.5 нА, живом времени набора спектров 20 с. При данных условиях эксперимента случайная погрешность анализа составляла менее 1 отн. % при содержании петрогенных компонентов более 10 мас. %, до 10 отн. % – при концентрации 1–10 мас. %, и достигала 30 отн. % вблизи нижнего предела определения, который составлял 0.2–0.3 мас. %.

Для характеристики химического валового состава растений применялось термическое озоление в муфельной печи при температуре 500–600 °С.

На участке заложены серии из пяти модельных пробных площадей размером, принятым для изучения травянистых сообществ – 10 × 10 м [5]. Изучалось частное и общее проективное покрытие, в пятикратной повторности отбирались образцы фитомассы, которые сразу распределялись на фракции по эколого-ценотической принадлежности. Для анализа геоботанических описаний использовано программное обеспечение IBIS А. А. Зверева [6].

Исследование тепловых свойств почв выбранных объектов проводилось при помощи автоматических температурных датчиков “Термохрон” (Россия) с погрешностью измерения ±0.5 °С. Чтобы наиболее полно охватить глубину проникновения и максимального распространения корней в исследуемых почвах, а также границы насыпных горизонтов, датчики устанавливались на глубинах 5, 25, 35 и 55 см. Температура фиксировалась каждые 4 ч в течение суток, начиная с полуночи, в период с июля 2019 г. по июль 2020 г. Полученные данные ис-

пользовались для определения среднесуточных температур, по которым в дальнейшем были рассчитаны суммы биологически активных температур (БАТ) – суммы температур выше 10 °С.

Объекты исследований

В качестве объектов исследования выбраны участки (уч.) отвалов трех месторождений, которые были рекультивированы методом перекрытия ПСП около 30 лет назад и оставлены под самозарастание (рис. 1): разрез “Черногорский” (Черногорское каменноугольное месторождение, Республика Хакасия), разрез “Назаровский” (Назаровское буроугольное месторождение, Красноярский край), разрез Листвянский (Бунгуро-Листвянское каменноугольное месторождение, Кемеровская область – Кузбасс). По средним многолетним данным (получены в период 2012–2020 гг.) метеостанций, ближайших к объектам исследования, регионы расположения месторождений различаются по природно-климатическим условиям, в первую очередь, по гидротермическому коэффициенту Г. Т. Селянинова: в сухостепной зоне Хакасии он составляет 0.7–0.9, в лесостепи КАТЭК – ~1, в подтаежной зоне Кузбасса – 1.3–1.5. Гидротермические условия в целом определяют растительное окружение угольных месторождений, которое косвенно влияет на зарастание отвалов и сингенез растительных сообществ [7].

Исходный почвообразующий субстрат всех трех участков представлен смесью вскрышных и вмещающих пород угольных месторождений. Его характерной особенностью является наличие в составе включений углистых частиц, содержание которых может достигать в отдельных пробах 5–7 %, реже – более 10 % [8]. На этапе формирования отвалов поверхность всех исследуемых участков была спланирована (горизонтально выравнена). В процессе рекультивации на участки после планировки был нанесен ПСП, представленный гумусово-аккумулятивными горизонтами зональных почв. Мощность отсыпки ПСП составляла 20–30 см. Таким образом на рекультивированных участках искусственным путем были сформированы почвы – техноземы. На нерекультивированных участках на момент проведения исследований сформировались почвы дерновые (на отвалах Хакасии) и гумусово-аккумулятивные (на отвалах Красноярского края и Кемеровской области). Все исследуемые участки как рекультивированные, так и нерекультивированные после этапов формирования поверхности были оставлены под самозарастание.

За прошедшее после отсыпки время участки покрылись растительностью, и практически на всех разрезах сформировалась фрагментарная подстилка, представленная полуразложившимися остатками травянистой растительности серо-бурой окраски мощностью до 1 см. Подстилка локализована над слоем дернины, мощность которой достигает на разных участках 2–5 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Специфика почвенного покрова исследуемых отвалов

Проведенные макроморфологические исследования почв показывают, что к общим свойствам профилей техноземов (искусственно созданных почв) можно отнести наличие отсыпанного на поверхность отвалов ПСП, составляющего основу корнеобитаемого слоя. Характерная его особенность – присутствие в нижней части комковато-плитчатой структуры, свидетельствующей о слабой “связности” в техноземах горизонтов вновь созданного почвенного профиля и подстилающей породы.

На нерекультивированных участках, сформированных на субстратах отвалов каменноугольных разрезов, основной чертой профилей эмбриоземов является сильная каменистость. Однако за более чем 30-летний период существования отвалов в верхней части профиля почв Назаровского и Листвянского углеразрезов были сформированы маломощные (не более 2 см), часто фрагментарные гумусово-аккумулятивные горизонты, аналогичные по свойствам

Рис. 1 Схема расположения объектов исследования.

насыпным горизонтам ПСП рекультивированных участков. Исключение составляют нерекультивированные участки отвалов Хакасии, где описываемый горизонт отсутствует.

Геохимическая характеристика формирующихся ландшафтов

Вскрышные и вмещающие породы, составляющие отвалы, имеют осадочный генезис, поэтому в шлифах исходного техногенного элювия кроме первичных минералов широко распространены каолиниты, иллит-смектиты. Сравнивая фотографии шлифов обломков неизмененного техногенного элювия (обломки более 10 мм) и образцов пыли (фракция >0.2 мм), можно отметить, что отдельные зерна слоистых силикатов, таких как мусковит, хлорит, каолинит, иллит-смектит, в процессе диагенеза искривлялись и в настоящий момент времени представляют собой неправильные обломанные зерна. В отдельных шлифах фиксируются раздробленные зерна биотита и хлорита. В пылеватой фракции на отдельных зернах фиксируются пластинчатые агрегаты, по-видимому, иллит-смектитов. Эти зерна формировались в пустотах и не имеют изломов и перегибов, характерных для зерен, прошедших этап диагенеза. Можно допустить их современное происхождение после извлечения породы на поверхность.

В образцах неизмененного элювия фиксируется большое количество карбонатов: сидерита, доломита и кальцита. В пылеватой фракции карбонаты практически отсутствуют [9]. Растворение сидерита можно описать следующей формулой:

$$2FeCO_3(тв) + H^+ + CO_2(в) + H_2O = 2Fe^{2+} + 3HCO_3^-$$

При этом карбонат-ион “уходит” с раствором, а железо может окисляться до трехвалентного состояния и в виде гетита или гидрогетита откладываться *in situ*. Как показано ранее [10], выпадение в виде гексагональных пластинчатых кристаллов свидетельствует о хемогенном генезисе данных выделений.

В обломках пород фиксируются сульфиды: пирит, сфалерит, галенит, смайтит (сульфид железа и никеля $(Fe,Ni)_{3+x}S_4$ ($x = 0–0.3$)). В пылеватой фракции сульфиды не обнаружены, что, по всей видимости, связано с их растворением при попадании в приповерхностные условия.

Общей закономерностью для всех участков является наличие в техногенном элювии рентгеноаморфной составляющей, представленной частицами угля, с которыми связано изменение цвета этого слоя (рис. 2). При окислении этих частиц кислородом происходит выделение энергии, что приводит к увеличению температуры в породах отвала. Добавка в субстрат частиц угля в долгосрочной перспективе может вызвать снижение окислительно-восстановительного потенциала почвенных разрезов.

Для основных типов почв было проведено ступенчатое выщелачивание по методике Тесье [11]. Это позволило выделить четыре группы элементов. Первая группа состоит из щелочных металлов (Na, K, Ca, Na, Sr), которые большей частью находятся в обменной фракции (до 66 %); эти элементы являются легкодоступными для рас-

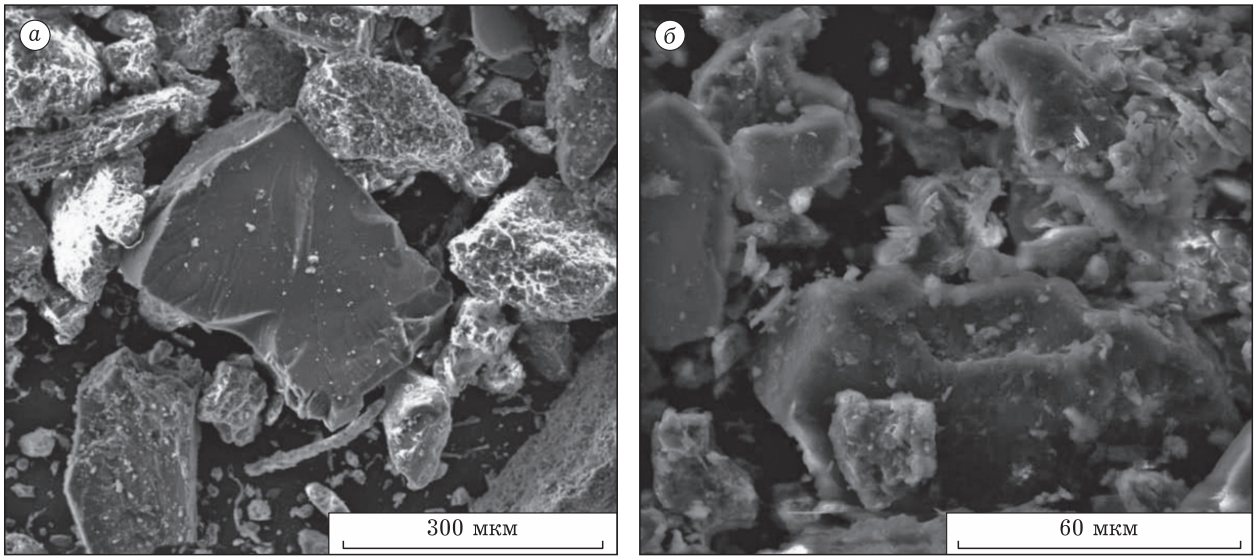

Рис. 2. Фотография углистых частиц в техногенном элювии участков Черногорский (*а*) и Листвянский (*б*) [9].

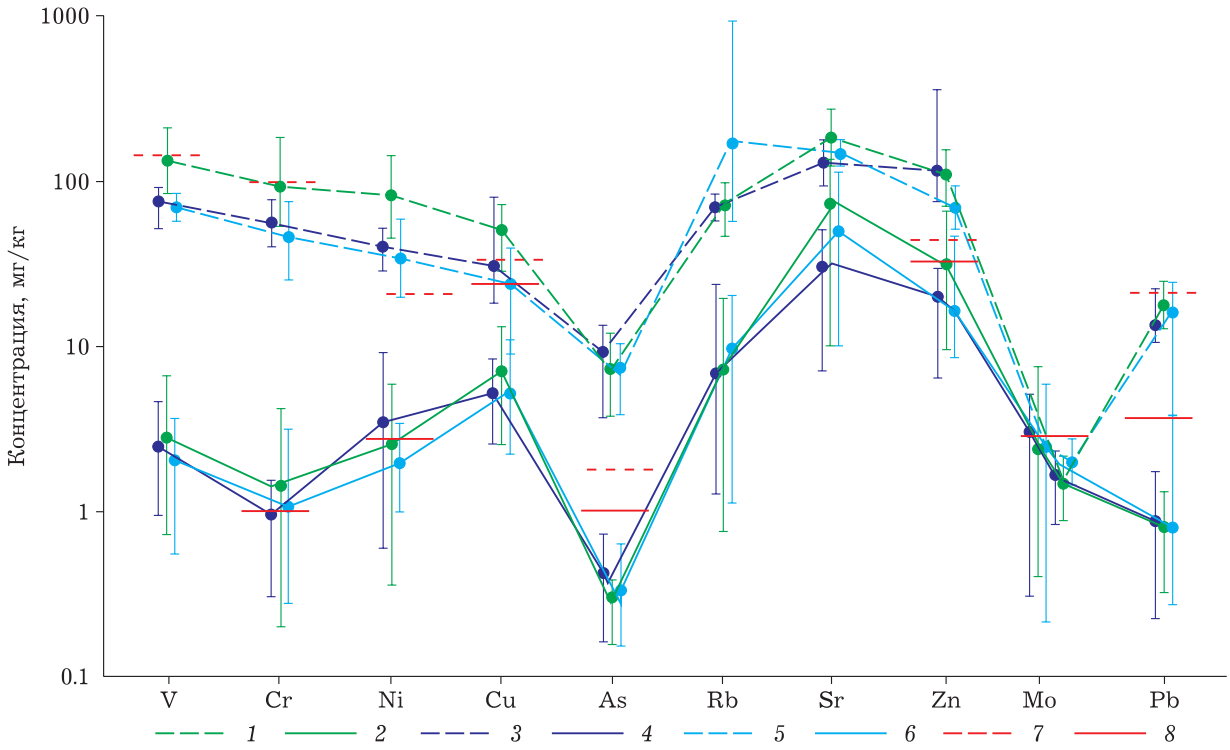

Рис. 3. Распределение химических элементов в почвах и растениях на исследованных участках (средние значения, диапазон концентраций). Усл. обозн.: *1* – Листвянский, почвы; *2* – Листвянский, растения; *3* – Назаровский, почвы; *4* – Назаровский, растения; *5* – Черногорский, почвы; *6* – Черногорский, растения; *7* – ПДК химических элементов в почве [12]; *8* – ПДК химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных [13].

тений. Вторая группа состоит из амфотерных элементов (Al, Fe, P, Ti), в основном они содержатся в органической фракции (60–90 %). Третья группа (Cr, Ba, V, Zn, Rb) содержится преимущественно в нерастворимой фракции (70–92 %), что говорит о вхождении этих элементов в кристаллические структуры первичных и вторичных металлов. Четвертая группа элементов не связана с одной фракцией (Cu, Co, Ni, Eu); содержание этих элементов распределено между тремя фракциями – связанной с оксидами железа и марганца, органической и нерастворимой.

Часть элементов были проанализированы в почвах и растительности (рис. 3), что позволило оценить их коэффициенты биологического поглощения (КБП). Можно выделить три группы элементов: 1) Cr, V, Pb, As, Ni, Rb практически не накапливаются в растительности (КБП для отдельных участков составляет 0.01–0.1); 2) Sr, Zn и Cu поглощаются умеренно (КБП = 0.2–0.4); 3) элементы с активным биологическим поглощением (КБП = 0.8–1.1), сюда относится только Mo.

Сопоставление с существующими нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК) в почве позволяет сделать выводы, что содержание никеля превышает значение ПДК в почве в 1.7–7.1 раза, меди – в 1.3–2.6 раза, мышьяка – в 4.7–6.1 раза, цинка – в 1.2–2.5 раза. Все эти превышения отмечаются как в естественных, так и новообразованных почвах и, соответственно, обусловлены повышенным фоновым содержанием этих элементов. По сравнению с ПДК, в кормах для сельскохозяйственных животных превышение наблюдается только для хрома (в 1.5–3.9 раза) и никеля (в 1.8–3.0 раза).

Тепловые свойства почв

Исследования тепловых свойств выбранных объектов показали, что максимальные значения сумм БАТ (сумм температур выше 10 °С) свойственны техноземам и эмбриоземам, сформированным на отвалах Черногорского угольного разреза (рис. 4, *а*). Здесь рассчитанная сумма БАТ превышает значения естественных почв ненарушенных участков более чем на 1000 °С. Вниз по профилю суммы БАТ увеличиваются, достигая аномальных значений на глубине 35 см в техноземах – 3800 °С, в эмбриоземах – 5800 °С. Можно предположить, что ниже, на глубине 55 см от поверхности почвы, температура почв значительно выше, поскольку датчики были повреждены и снять показания с них не удалось.

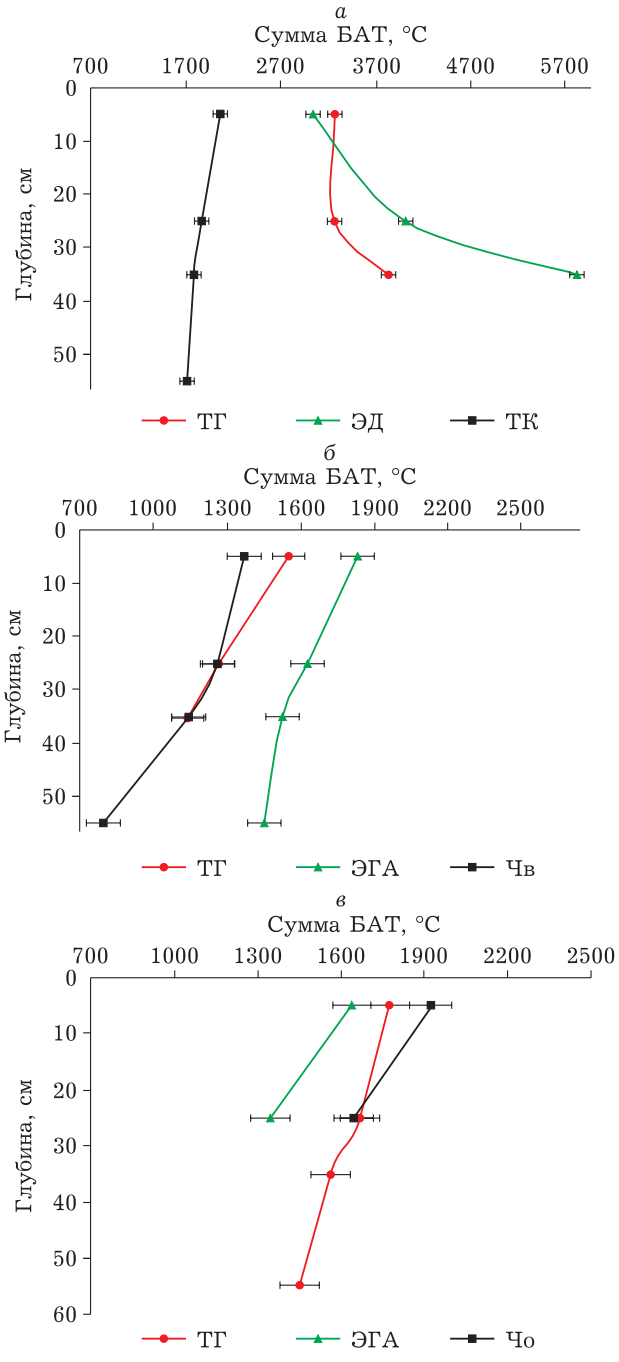

Рис. 4. Распределение по профилю сумм биологически активных температур (БАТ) в почвах угольных месторождений: Черногорского (*а*); Назаровского (*б*); Листвянского (*в*). Усл. обозн.: ТГ – технозем гумусогенный; ЭД – эмбриозем дерновый; ТК – темно-каштановая почва; ЭГА – эмбриозем гумусово-аккумулятивный; Чв – чернозем выщелоченный; Чо – чернозем оподзоленный.

В условиях лесостепи Красноярского края, где исследовались отвалы Назаровского буроугольного разреза, тепловых аномалий, аналогичных отвалам Хакасии, зафиксировано не было. Тем не менее сумма БАТ в верхней части профиля этих почв оставалась выше на 180–450 °С по сравнению с естественными почвами и приземным слоем воздуха (см. рис. 4, *б*). Максимальное превышение отмечается у эмбриоземов гумусово-аккумулятивных, минимальное – у техноземов гумусогенных. С глубиной фиксируется снижение суммы БАТ. В техноземах на глубине 25 см и ниже величины сумм БАТ сравниваются с черноземами. В эмбриоземах также отмечается снижение температур с глубиной, однако не так выражено, поскольку значения сумм БАТ остаются на 350–650 °С выше, чем в черноземах.

В условиях подтайги Кемеровской области, где так же, как и в Хакасии, исследовались отвалы каменноугольных разрезов, сумма БАТ в верхней части профиля техногенных почв была ниже, чем в естественных почвах (см. рис. 4, *в*). Значения сумм БАТ черноземов оподзоленных превышали аналогичные величины для эмбриоземов и техноземов на 150–300 °С. Величины сумм БАТ исследуемых почв резко снижаются с глубиной, их разность колеблется от 100 °С в техноземах до 300 °С в эмбриоземах. При этом, как и в случае с почвами отвалов Назаровского буроугольного разреза, на глубине 25 см значения сумм БАТ в техноземах и черноземах практически сравниваются.

Характеристика растительного покрова

На отвалах Черногорского разреза без ПСП травостой мозаичный, представляет собой простую растительную группировку. Основу проективного покрытия составляет *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth (до 70 %). Высока активность сорняков: *Elytrigia repens* (L.) Nevski (до 80 %), *Artemisia vulgaris* L. (до 40 %), *Cirsium setosum* (Willd.) Bess. (до 30 %), *Carduus nutans* L. (до 5 %). Другие виды присутствуют в виде единичных экземпляров. Всего 20 видов.

На площадках с ПСП преобладающая роль сорняков сохраняется, однако возрастает значение степных видов: *Allium senescens* L. (до 20 %), *Vincetoxicum sibiricum* (L.) Decne. (до 10 %), которые формируют локальные куртины. Всего 21 вид.

На залежных старопахотных почвах происходит восстановление зональных степных формаций с преобладанием *Poa stepposa* (Krylov) Roshev. (до 20 %), *Helictotrichon desertorum* (Less.) Nevski (до 20 %), *Potentilla longifolia* Willd. ex Schltdl. (до 20 %), *Stipa capillata* L. (до 5 %), *Galium verum* L. (до 5 %), *Medicago falcata* L. (5 %) и другие, с участием сорняков: *A. vulgaris* (до 40 %) и *Linaria vulgaris* L. (до 10 %). Всего 31 вид.

На отвалах Назаровского разреза без ПСП преобладают *Poa pratensis* L. (до 40 %), *Equisetum arvense* L. (до 15 %), *Achillea millefolium* L. (до 5 %), *Medicago lupulina* L. (до 5 %), *Vicia amoena* Fisch. (до 5 %), *Vicia cracca* L. (до 5 %), из сорняков преобладают *Melilotus officinalis* (L.) Lam. (до 30 %) и *Tussilago farfara* L. (до 10 %), что характерно для начальной стадии функционирования сложных луговых группировок. Всего 40 видов.

Участки с ПСП характеризуются преобладанием *P. pratensis* (до 70 %), содоминантами травостоя выступают *E. arvense* (до 20 %), *Geranium pratense* L. (до 5 %), *Thalictrum simplex* L. (до 5 %), *V. cracca* (до 5 %), *G. verum* (до 10 %) и *Pimpinella saxifraga* L. (до 5 %) и др. Прочие зональные виды формируют не более 1–2 % проективного покрытия каждый, но по площади распределяются равномерно. Сорные виды присутствуют единично, что характеризует данные луговые формации как замкнутые фитоценозы. Всего 34 вида.

На ненарушенных лесных лугах основу травостоя составляют лугово-лесные виды: *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. (до 20 %) и *Heracleum dissectum* L. (до 10 %) и луговой вид *Bromopsis inermis* L. (до 30 %). Среди лугово-степных видов наиболее выражено участие *G. verum* (до 5 %), а также широко распространен полупаразит *Rhinanthus autumnalis* L. (до 50 %). Из степных видов выраженным ассектатором выступает *Vicia unijuga* A. Br. (до 5 %). Всего 40 видов.

На участках Листвянского разреза без ПСП резко преобладают луговые злаки: *Dactylis glomerata* L. (до 60 %), *Festuca pratensis* L. (до 15 %), *Phleum pratense* L. (до 10 %), *Agrostis gigantea* L. (до 3 %) и *Poa angustifolia* L. (до 1 %), бобовые: *Amoria repens* (L.) C. Presl. (до 2 %) и *V. cracca* (до 2 %), и представители разнотравья: *Potentilla canescens* Bess. (до 3 %), *A. millefolium* (до 2 %); прочие луговые виды – менее чем по 1 %. Среди лугово-степных отмечаются *P. saxifraga* (до 20 %) и *Centaurea scabiosa* L. (до 10 %). Среди сорняков выделяются *Convolvulus arvensis* L., *Taraxacum officinale* L. (по 1 %), остальные – единично. Лесные виды не встречаются. Всего 38 видов.

На отвалах с ПСП преобладают: лугово-степные виды *C. scabiosa* (до 30 %), *P. saxifraga* (до 30 %), *Fragaria viridis* L. (до 30 %), луговые виды *F. pratensis* (до 40 %), *Galium mollugo* L. (до 10 %), *A. millefolium* (до 5 %), *P. canescens* (до 5 %), *D. glomerata* (до 2 %), *Leucanthemum vulgare* L., *Poa pratense*, *Trifolium pratense* L., *V. amoena*, *V. cracca* (по 2 %). Среди сорняков наиболее активны *Malva neglecta* Wallr. (до 2 %) и *T. officinale* (до 2 %). Всего 53 вида.

На залежах основу травостоя составляют виды *D. glomerata* (до 60 %), *V. amoena* (до 40 %), *P. pratensis* (до 15 %) – в верхнем подъярусе, *F. pratensis* (до 15 %) и *P. angustifolia* (до 15 %) – в нижнем подъярусе. С меньшим проективным покрытием, но равномерно на всей площади встречаются *A. millefolium* (до 5 %), *T. pratense* (до 3 %), куртинами – *B. inermis* (до 3 %). Присутствует полупаразит *Rhinanthus vernalis* L. (до 5 %). По сравнению с отвалами возрастает доля лесных видов: *Fragaria vesca* L. (до 5 %) и *Chamerion angustifolium* L. (до 3 %). Из сорняков преобладают *T. officinale* (до 3 %) и *Pastinaca sylvestris* L. (до 1 %). Всего 45 видов.

По видовому обилию растительных группировок отмечается тенденция роста количества видов при увеличении гидротермического коэффициента местности: на участках без ПСП Черногорского разреза наблюдается вдвое меньше видов, чем на участках Назаровского и Листвянского разрезов (рис. 5). При сравнении участков с ПСП разных районов отмечается максимальный рост видового обилия при увеличении влажности: по сравнению с Черногорским разрезом на Назаровском разрезе на ПСП количество видов выше в 1.6 раз, а на Листвянском на ПСП – выше в 2.5 раза. В целом, на Черногорском разрезе на отвалах произрастает в 1.5 раза меньше видов, чем на рядом расположенном с отвалами контрольном участке, в то время как на Назаровском и Листвянском разрезах различия по видовому обилию между отвалами и контрольным участком незначительны. С свою очередь, на участке с ПСП Листвянского разреза количество видов даже на 17 % выше, чем на контрольном участке [14, 15].

Важнейшей характеристикой, демонстрирующей направленность восстановительной сукцессии, является эколого-ценотическая структура травостоя (рис. 6). В проективном покрытии травостоя на отвалах Черногорского разреза доля рудеральных видов в 4.1–6.7 раз выше, чем на контрольном участке, а доля зональной группы степных видов в 2.3 раза ниже на участках с ПСП, при этом на участках без ПСП степные виды в сложении проективного покрытия не участвуют.

На отвалах Назаровского разреза доля проективного покрытия зональных луговых видов достигает фоновых значений, а на ПСП даже

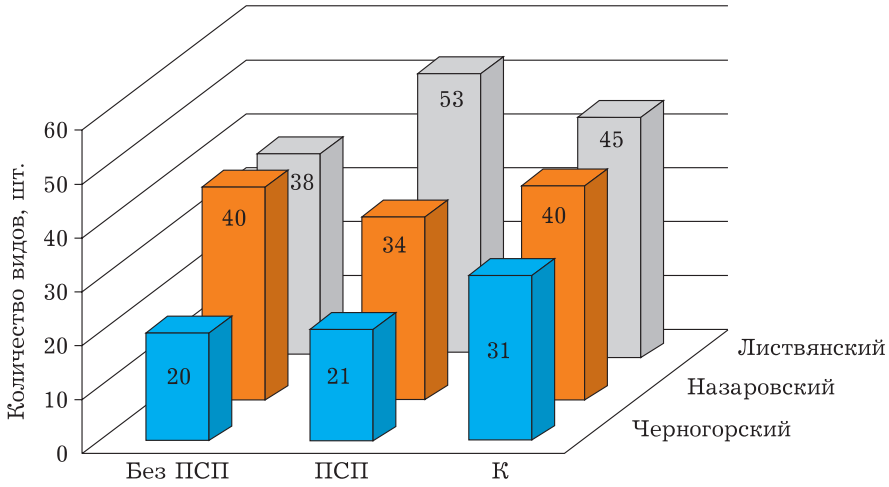

Рис. 5. Количество видов на модельных участках (Лиственский, Назаровский и Черногорский). Усл. обозн. здесь и на рис. 6: ПСП – плодородный слой почвы; К – контрольный участок.

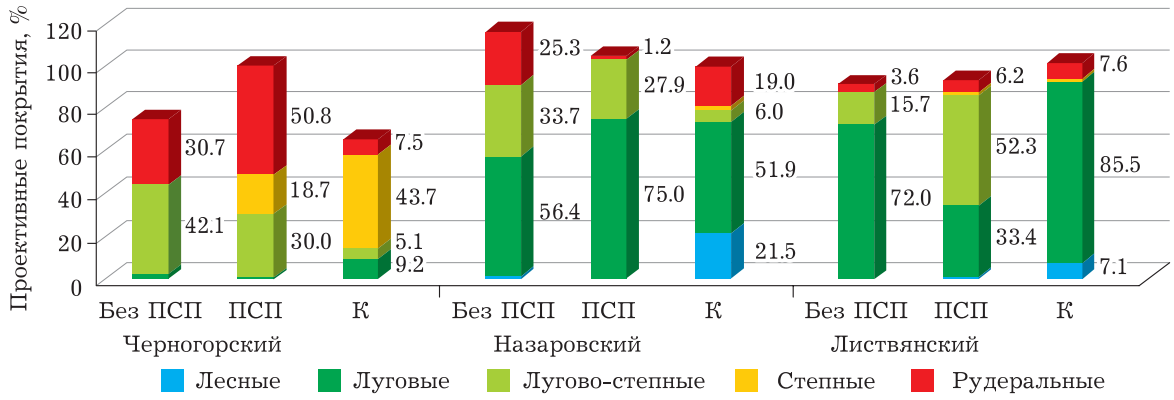

Рис. 6. Проективные покрытия эколого-ценотических групп Черногорского, Назаровского и Лиственского разрезов. Обозн. см. рис. 5.

превышает их в 1.4 раза. Однако на отвалах не выражено участие в проективном покрытии лесных видов, составляющих более 1/5 части проективного покрытия травостоя на контрольном участке. На Лиственском разрезе отмечается самое низкое проективное покрытие рудеральных видов, причем на отвалах оно ниже, чем на контрольном участке в 1.2–2.1 раз; при высоком участии луговых видов выделяется группа лугово-степных видов (15.7–52.3 %), не характерных для фонового (контрольного) участка, а лесные виды на отвалах в проективном покрытии также не выражены.

Грунтовые воды карьерных выработок

В рассматриваемых участках продуктивные пласты угля находятся ниже уровня водоносного горизонта, который вскрывается горными выработками. В процессе добычи для избежания затопления карьера проводится откачка поступающих вод. После завершения эксплуатации, если при рекультивации карьерная выемка не ликвидируется, то на ее месте формируется озеро, в питании которого принимают участие как грунтовые, так и поверхностные воды. Для рассматриваемых участков в формирование химического состава вносят вклад почвы и породы отвалов, которые благодаря дисперсности имеют высокую проницаемость для осадков.

Природные воды описываемых климатических зон гидрокарбонатные натриево-кальциевые, с минерализацией до 1 г/л. Как видно из диаграмм на рис. 7, в водах карьерных выработок заметно возрастает концентрация сульфат-иона, в отдельных случаях он выходит на первое место; в катионном составе увеличивается доля натрия (уч. Черногорский), воды других

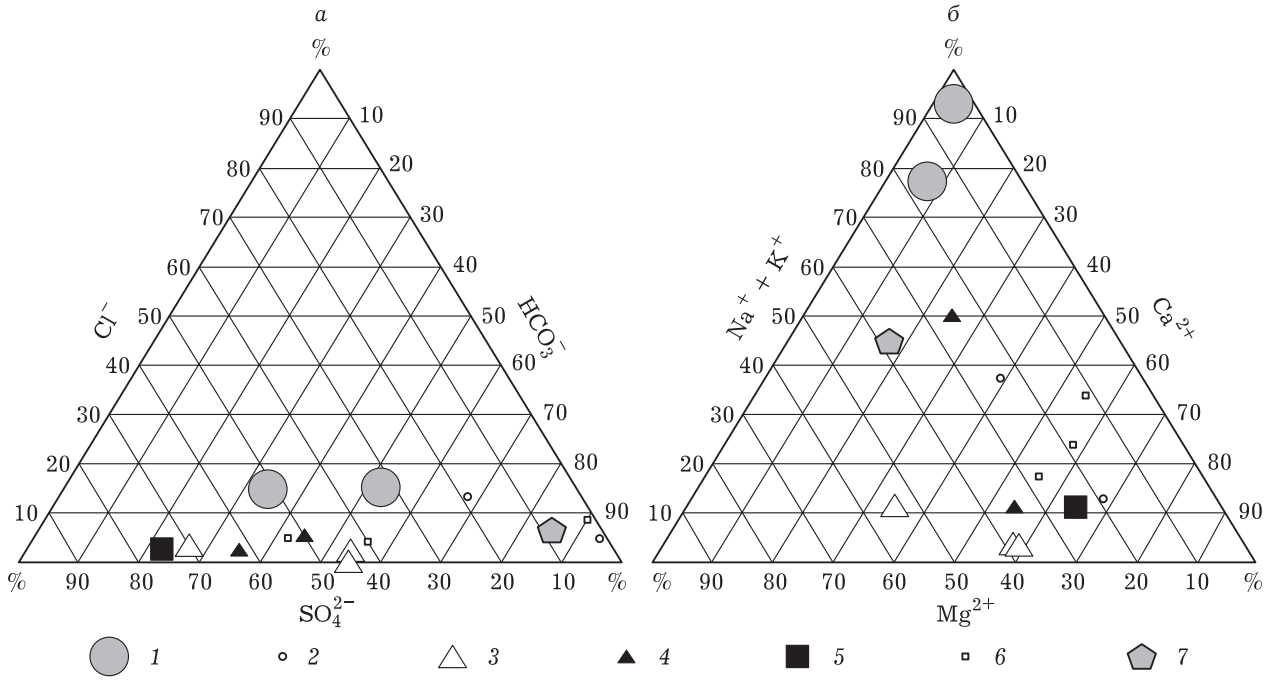

Рис. 7. Анионный (*а*) и катионный (*б*) состав карьерных вод. Усл. обозн. (участок, минерализация): *1* – Черногорский, >3000 г/л; *2* – Черногорский, 0–500 г/л; *3* – Листвянский, 1000–3000 г/л; *4* – Листвянский, 500–1000 г/л; *5* – Назаровский, 1000–3000 г/л; *6* – Назаровский, 0–500 г/л; *7* – осредненный химический состав грунтовых вод [16].

участков магниево-кальциевые. Воды – основные, pH находится в интервале 6.5–8.3; минерализация изменяется от 0.3 до 3.5 г/л. В водах отмечаются превышения ПДК по железу и марганцу, что является характерной особенностью исследуемого региона [16]. Из тяжелых металлов в единичных пробах отмечается превышение ПДК по Ni (~20 %).

Сформированные гидрогеохимические аномалии практически не выходят за пределы затопленных карьерных выемок. В случаях, когда из этих озер вытекают водотоки, они очень быстро при смешении с другими ручьями разбавляются и становятся неотличимыми по составу от фоновых водотоков.

Влияние температурного режима почв отвалов на процессы восстановления почвенного покрова

Концентрации большинства элементов в техногенных отложениях попадают в диапазон значений, фиксируемых в незатронутых техногенными преобразованиями почвенных разрезах. В некоторых случаях техногенные отложения увеличивали значения местного фона для отдельных элементов, но эти превышения не выходили за границы регионального фона [17, 18]. Исследование показало, что формирование отвалов вскрышных пород при разработке угольных месторождений не приводит к образованию крупных геохимических аномалий на поверхности. Извлеченная порода содержит небольшое количество углистых частиц.

В извлеченной на поверхность породе были установлены минералогические преобразования – растворение сульфидов и разложение карбонатов (сидерита и доломита). При разложении сидерита железо осаждалось *in situ* в виде гетита или гидрогетита. В водоемах, которые сформировались в подножии отвалов отмечается повышенная минерализация (до 3.5 г/л). Увеличивается содержание сульфатов.

Оценив параметры температурного режима исследуемых почв, можно утверждать, что почвы, сформированные на отвалах углевмещающих пород, в целом характеризуются более высокой теплообеспеченностью по сравнению с естественными (зональными) почвами. В наибольшей степени это проявляется на Черногорском угольном разрезе Хакасии, где суммы БАТ верхнего (0–5 см) слоя техноземов и эмбриоземов на 1000–1200 °С выше, чем в естественных почвах. Отмеченные в нижних горизонтах аномально высокие температуры свидетельствуют о пирогенных процессах, протекающих в отвале. Поскольку процессы самовозгорания отвала затрагивают достаточно удаленные друг от друга участки (рекультивации – с техноземами,

и самозарастания – с дерновыми эмбриоземами), можно сделать вывод, что самовозгорание проявляется по всей толще отвала.

В сложенных рыхлыми осадочными породами отвалах Назаровского угольного разреза специфика температурного режима почв, по всей видимости, связана с особенностями режима увлажнения, определяемыми более высокой водоудерживающей способностью гумусовых горизонтов техноземов и черноземов. В лишенных этих горизонтов эмбриоземах прогревание профиля почв происходит быстрее и более равномерно. В результате суммы БАТ в эмбриоземах на 200–450 °С выше, чем в черноземах и техноземах.

В условиях подтайги Кузбасса суммы БАТ в слое 0–5 см естественных почв выше, чем в почвах техногенных ландшафтов. Очевидно, что на температурный режим почв существенно повлияла высокая пастбищная нагрузка на естественных ненарушенных почвах и умеренная – на участках с отсыпкой ПСП. На участках самозарастания, где по причине отсутствия выпаса надземная фитомасса не отчуждается, сумма БАТ верхней части почв эмбриоземов была минимальной в ряду исследуемых почв. Таким образом, оценивая вышеописанные особенности теплового режима исследуемых почв, можно выделить специфические факторы, его определяющие. Во-первых, общее геотермическое состояние ландшафта, зависящее от того, подвержен ли рассматриваемый объект процессам самовозгорания, как глубоко от поверхности они протекают и какая часть затронута пирогенезом. Во-вторых, состояние растительных сообществ, обусловленное как их видовым составом, так и характером использования нарушенных территорий. И в-третьих, на тепловой режим почв инициальной стадии существенное влияние оказывает цвет почвообразующего субстрата, определяемый количеством в нем углистых включений.

Особенности температурного режима эмбриоземов отражаются на эколого-ценотической структуре живого напочвенного покрова. Так, на отвалах Хакасии, где зональный ксероморфизм усиливается наиболее существенным превышением суммы БАТ (по сравнению с контрольным участком), отмечается торможение формирования растительных группировок на стадии простых фитоценозов вследствие преобладания рудерального компонента. Следует отметить, что нанесение ПСП на отвалах Хакасии способствует увеличению только количественного показателя травостоя – его общего проективного покрытия, но не обеспечивает качественного улучшения видового состава, который является неотъемлемым признаком восстановления экосистем. Таким образом, растительные сукцессии на отвалах Хакасии (как с нанесением ПСП, так и без нанесения) не приводят к формированию растительного покрова, приближенного по своим характеристикам к первоначальному.

В условиях лесостепи Красноярского края видовое обилие травостоя на отвалах, сопоставимое с контрольным участком, свидетельствует о благоприятности условий произрастания как на ПСП, так и без него. Однако некоторое превышение суммы БАП в поверхностном слое эмбриоземов сопровождается сохранением высокой доли рудеральных видов и почти полным отсутствием лесных травянистых видов, требующих значительной мезофитизации корнеобитаемого горизонта. В итоге это способствует формированию травянистых сообществ с внутренней структурой, смещенной на одну ступень в сторону ксероморфизации по сравнению с участками естественного восстановления послепахотных угодий на зональных почвах.

Более благоприятный температурный режим эмбриоземов в зоне подтайги Кузбасса способствует формированию на отвалах травянистых фитоценозов, не уступающих, а при нанесении ПСП даже превосходящих по видовому обилию и структуре проективного покрытия – самозарастающих залежных участков. Вероятно, снижение суммы БАТ способствует лучшему сохранению влаги в приповерхностном слое почвы, что обеспечивает более благоприятный водно-воздушный режим для произрастания луговых видов, по сравнению с условиями зональных серых лесных почв. Отсутствие в проективном покрытии существенного количества лесных видов объясняется, вероятно, большей удаленностью участков отвалов от естественных лесных массивов в сравнении с контрольными участками, а не гидротермическими особенностями самих эмбриоземов. Таким образом, ход восстановительных сукцессий живого напочвенного покрова при самозарастании отвалов в подтаежных районах Кузбасса наиболее соответствует естественному, а формирующиеся фитоценозы приближены по своим характеристикам к зональным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования участков рекультивации отвалов позволили сделать следующее заключение.

Геохимический фон сформированных систем существенно не отличается от фоновых значений участков, прилегающих к наблюдаемым. Наличие в техногенном элювии частиц угля при их окислении приводит к увеличению температуры в породах отвала. Добавка в субстрат частиц угля в долгосрочной перспективе может вызвать снижение окислительно-восстановительного потенциала почвенных разрезов, что скажется на условиях миграции элементов. Влияние примеси углистых частиц в разрезе будет также сказываться на выделении тепла вследствие окисления последних кислородом воздуха. Отмеченные в разрезе минералогические преобразования имеют в большей степени научное, нежели прикладное значение. Сформированные на месте карьерных выработок гидрохимические аномалии достаточно локальны, вытекающие из этих озер водотоки очень быстро становятся неотличимыми от близлежащих ручьев по мере разбавления фоновыми водотоками.

В сформированных почвах и растительном покрове отмечаются превышения ПДК по Ni, Cu, As и Zn, что связано с исходным фоном для этих элементов. Как правило, фоновые (контрольные) почвы содержат более высокие их концентрации по сравнению с эмбриоземами и техногенным элювием. В техногенном элювии и супесях, используемых в качестве ПСП, содержания этих элементов ниже, чем в почвообразующих субстратах фоновых почв.

Увеличение температуры техноземов и эмбриоземов очевидно влияет на расход атмосферных осадков и испарение и тем самым сказывается на обеспеченности влагой растительных сообществ, формирующихся на отвалах. Поэтому все исследуемые техногенные ландшафты характеризуются меньшей по сравнению с контрольными участками долей влаголюбивых лесных и луговых видов. Проведение рекультивации посредством нанесения ПСП способствует минимизации негативных эффектов, связанных с повышением температур почв отвалов, и ускорению восстановления зональных растительных сообществ. Отсыпка нарушенных поверхностей ПСП способствует снижению сумм БАТ техноземов и приближению их к значениям, свойственным зональным почвам. Наиболее заметно это проявляется в лесостепи на отвалах Назаровского буроугольного месторождения, где формирование корнеобитаемого слоя способствует снижению суммы БАТ на 300 °С на глубине 5 см и достижению значений зональных почв на глубине 25 см. На отвалах КАТЭК травянистые фитоценозы восстанавливаются, но со смещением в сторону ксероморфизма.

В условиях повышенного увлажнения подтайги Кемеровской области на отвалах Листвянского каменноугольного месторождения почвы техногенных ландшафтов характеризуются меньшей теплообеспеченностью, чем естественные. Однако и в этом слое формирование искусственного корнеобитаемого слоя с отсыпкой ПСП приближает значения суммы БАТ к зональным, что, по всей видимости, положительно сказывается на увеличении количества видов растений. В условиях подтайги Кузбасса восстановление фитоценозов на отвалах с нанесением ПСП соответствует таковому на залежах.

В меньшей степени положительный эффект от нанесения ПСП проявляется на подверженных самовозгоранию отвалах Черногорского каменноугольного разреза степной зоны Хакасии. Аномально высокие значения сумм БАТ, увеличивающиеся с глубиной, не только отрицательно сказываются на видовом богатстве растительных сообществ, но минимизирует долю степных зональных видов, характерной особенность которых является развитие мощных корневых систем. При этом формирование искусственного корнеобитаемого слоя способствует поселению и закреплению на отвалах лугово-степных видов, господствующих в естественных ландшафтах. На отвалах Хакасии восстановление фитоценозов не происходит даже при нанесении ПСП. Для полноценной рекультивации необходимы дополнительные мероприятия, в частности внесение семян степного разнообразия поверх ПСП. Такой подход опробован для степных ландшафтов Кузбасса, где показал свою эффективность [19].

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН (исследования морфологических и температурных свойств почвенных профилей), ИГМ СО РАН (минералогические и геохимические исследования), при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05086 (полевые и аналитические работы, геоботанические исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Министерство энергетики РФ. Деятельность. Уголь. Об отрасли [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://minenergo.gov.ru/node/433 (дата обращения: 21.04.2022).

2 Sokolov D. A., Androkhanov 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. No. 56. P. 6–32.

3 Андроханов В. А., Курачев В. М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: Динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
4 Андроханов В. А., Овсянникова С. В., Курачев В. М. Техноземы: Свойства, режимы, функционирование. Новосибирск: Наука, 2000. 200 с.
5 Полевая геоботаника / Под ред. Е. М. Лавренко, А. А. Корчагина. Т. 5. Л.: Наука, 1976. 320 с.
6 Зверев А. А. Информационные технологии в изучениях растительного покрова: Учеб. пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 304 с.
7 Манаков Ю. А., Стрельникова Т. О., Куприянов А. Н. Формирование растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбасса. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 167 с.
8 Соколов Д. А., Кулижский С. П., Лим А. Г., Гуркова Е. А., Нечаева Т. В., Мерзляков О. Э. Сравнительная оценка методов определения педогенного органического углерода в углесодержащих почвах // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2017. № 39. С. 29–43.
9 Богуславский А. Е., Андроханов В. А., Колмагорова Ю. О., Ужогова А. А., Госсен И. Н., Саева О. П. Геохимический фон тяжелых металлов в почвах и растениях на участках отвалов угольных месторождений // Изв. Алтайского отд-ния Русского геогр. о-ва. 2021. № 2 (61). С. 40–50.
10 Водяницкий Ю. Н., Сивцов А. В. Образование ферригидрита, фероксигита и вернадита в почвах // Почвоведение. 2004. № 8. С. 986–999.
11 Dang Z., Liu C., Haigh M. J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils // Environ. Pollut. 2002. Vol. 118. P. 419–426.
12 СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (Увт. Постановлением Главного гос. санитар. врача РФ от 28.01.2021 № 2) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 30.04.2022).
13 123-4/281-8-87. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200086835 (дата обращения: 30.04.2022).
14 Уфимцев В. И., Андроханов В. А., Куприянов О. А., Уфимцев Ф. Г. Плодородный слой почвы как фактор восстановления зональных фитоценозов на отвалах угольной промышленности //Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2019. № 6 (136). С. 64–71.
15 Уфимцева М. Д., Терехина Н. В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 339 с.
16 Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. Изд. 2-е испр. и доп. М.: Недра, 1998. 367 с.
17 Экогеохимия Западной Сибири. Тяжелые металлы и радионуклиды / под ред. Г. В. Полякова. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 248 с.
18 Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: СО РАН, 2001. 229 с.
19 Пат. RU 2016148996 A3, 2018.