

УДК 57.044:(631.483+581.524.34)

О. В. ШЕРГИНА*, Т. А. МИХАЙЛОВА*, О. В. КАЛУГИНА*, О. А. ПРОЙДАКОВА**

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск

**Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск

ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЧВЕННОГО И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТВАЛАХ

В пределах промышленного отвала крупного химического производства исследовано состояние почв и растительности по комплексу параметров. Выделено несколько типов эмбриоземов (инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые, гумусово-аккумулятивные), которые можно рассматривать как последовательные стадии техногенного почвообразования. Установлена высокая щелочность почв ($pH_{водн}$) отвала — от 11–13 в инициальном эмбриоземе до 8–9 в гумусово-аккумулятивном, а также существенный дисбаланс элементов в почвенном поглощающем комплексе, что обусловлено значительным содержанием карбонатов кальция. Делается вывод, что на техногенном отвале происходит взаимосвязанная трансформация эмбриоземов и растительности, тренд которой направлен в сторону самовосстановления нарушенной территории.

Ключевые слова: промышленный отвал химического производства, стадии техногенного почвообразования, эмбриоземы, растительность.

Within the boundaries of the industrial dump of a large chemical production facility, we investigated the state of the soils and vegetation for a set of parameters. The study identified several types of embryozems (initial, organic-accumulative, soddy, and humus-accumulative) which can be regarded as consecutive stages of technogenic soil formation. High alkalinity of the soils (pH_{wat}) of the dump was found to vary from 11–13 in initial embryozem to 8–9 in humus-accumulative embryozem, and a substantial imbalance of elements was detected in the soil absorption complex, which is due to considerable content levels of calcium carbonates. It is concluded that the technogenic dump involves the ongoing interconnected transformation of embryozems and vegetation, with a trend toward self-recovery of the disturbed territory.

Keywords: industrial dump of chemical production, stages of technogenic soil formation, embryozems, vegetation.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В промышленных зонах многих городов Приангарья наблюдается увеличение объемов токсичных отходов как результат несовершенных технологий их очистки. По данным Минпромэнерго РФ [1], из общего количества отходов, которые образуются в электроэнергетике, химической и нефтехимической промышленности Иркутской области, около 30 % используется как вторичное сырье в других отраслях промышленности, 20 % сжигается, остальное складировается на полигонах. Промышленные отходы, сосредоточенные в отвалах и хвостохранилищах, изменяют сложившееся естественное состояние окружающих природных экосистем. На таких территориях, являющихся очагами высокой концентрации загрязняющих веществ, происходит организация особого типа экологических систем, компоненты которых подвергаются непрерывному негативному воздействию и характеризуются специфическими свойствами и режимами функционирования. В этом случае можно говорить о выраженном процессе изменения природных экосистем, что в первую очередь проявляется в нарушении их ключевых компонентов — растительности и почв.

Среди публикаций, связанных с изучением воздействия техногенных отходов промышленности на экосистемы, преобладают работы, рассматривающие влияние горнодобывающей промышленности на компоненты окружающей среды [2–8]. Направленность таких исследований в основном чисто практическая и связана с вопросами посттехногенной рекультивации почв и восстановления растительных сообществ. В то же время имеется гораздо меньше сведений о воздействии на почвенный покров и растительность отходов химического производства [9–11]. В частности, недостаточно проработаны такие аспекты, как временная динамика взаимосвязанного преобразования почв и фитоценозов на техногенных территориях, пути оптимизации почвообразования и функционирования растительности в условиях техногенеза. Также единичны исследования, касающиеся процессов начального техногенного почвообразования в зонах химических производств и выявления биогеохимических взаимосвязей между компонентами экосистем.

© 2015 Шергина О. В. (sherolga80@mail.ru), Михайлова Т. А. (mikh@sifibr.irk.ru),

Калугина О. В. (phytotox@sifibr.irk.ru), Пройдакова О. А. (proyd@igc.irk.ru)

Цель данной работы — в пределах промышленного отвала крупного химического производства исследовать особенности формирования почв и растительности, выявить основной тренд изменения этих компонентов и показать возможность самовосстановления почвенно-растительного покрова на нарушенной территории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского Иркутской области (основан в 1669 г.). В 2010–2012 гг. в городе насчитывалось более 20 предприятий (ТЭЦ, ООО «Усо́льхимпром», ОАО «Усо́лье-Сибирский Силикон», ОАО «ПО «Усо́льмаш»», ОАО «Усо́льхимфарм», ООО «Усо́льский солепромысел» и др.). Поскольку большинство предприятий сконцентрировано в северо-восточной части города, здесь образовалась единая техногенная зона, где в течение продолжительного периода складировались отходы химических производств ООО «Усо́льхимпром», ОАО «Усо́льхимфарм», ТЭЦ. При анализе космических снимков Иркутской области (программа Google Earth 6.2.2.6613) обнаружено, что площадь промышленных отвалов г. Усо́лья-Сибирского составляет 350 га, а шлейф распространения техногенных отходов прослеживается по розе ветров еще на 15–20 км.

Территория, на которой расположен город, входит в зону подтаежных хвойных лесов Приангарья и характеризуется большим разнообразием фоновых (ненарушенных) почв, как правило, высокого естественного плодородия и значительной буферной способности [12]. При сравнении участков промышленных отвалов с ненарушенными лесными территориями обнаруживаются резкие различия экосистем по характеристикам почв и состоянию растительности. Для исследований нами был выбран крупный отвал отработанных отходов химического производства, расположенный в 10 км северо-западнее главного корпуса ООО «Усо́льхимпром» (рис. 1). Общая площадь района работ составляла

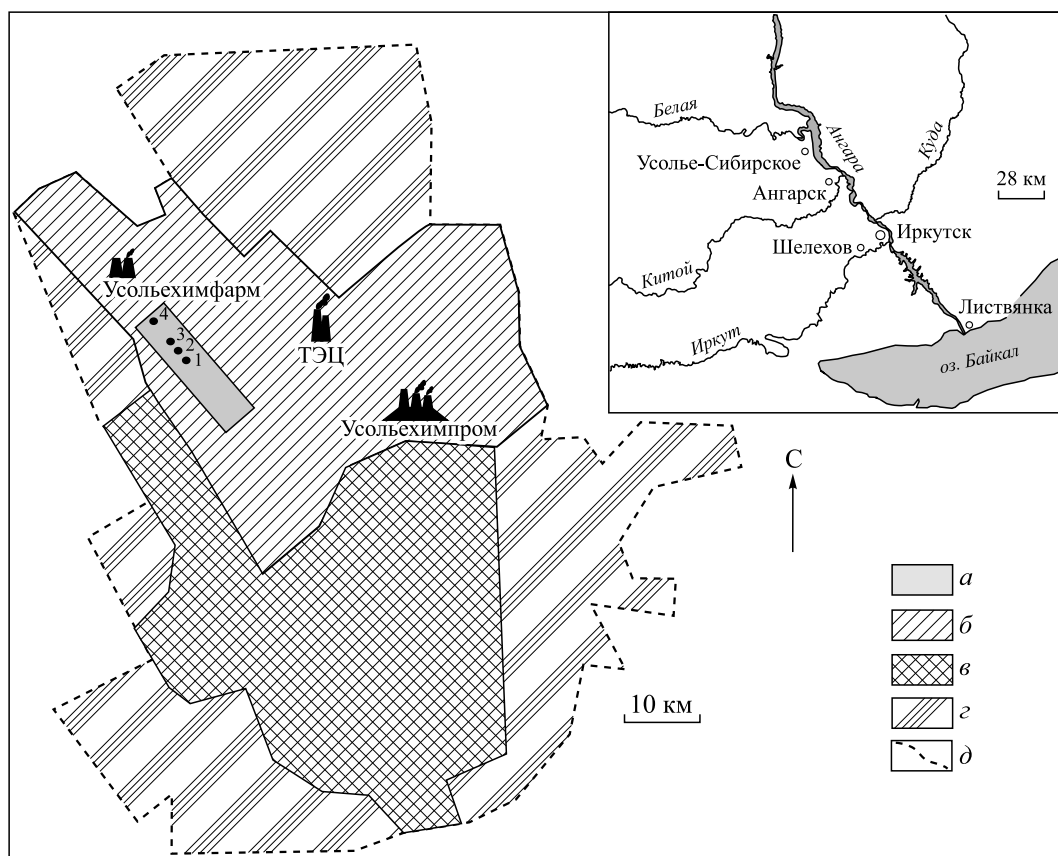


Рис. 1. Расположение промышленного отвала и обследованных тест-участков на территории г. Усо́лья-Сибирского.

1–4 — номера тест-участков. *a* — зона техногенного отвала; *b* — промышленная зона; *v* — жилая застройка; *z* — городские леса; *d* — территориальные границы города.

более 30 га. По результатам изучения эдафических и дендрологических параметров, формирование этого отвала началось 40–45 лет назад; в настоящее время он недействующий.

Для оценки состояния почв и растительности выбрано четыре тест-участка, располагающихся в радиальном направлении на расстоянии 1,5; 2,5; 3,5 и 5,5 км от центральной части отвала. На каждом тест-участке в 2010–2013 гг. проводилось изучение стадий техногенного преобразования почв по классификации В. М. Курачева и В. А. Андроханова [13], выполнялись геоботанические описания согласно методике П. Д. Ярошенко [14], исследовалось жизненное состояние древесных растений [15], проводился отбор почвенных проб методом полнопрофильного исследования разрезов и посредством отбора средних (объединенных) проб из верхних (0–10 см) горизонтов почв квадратно-конвертным способом в пятикратной повторности, а также растительных образцов с 5–6 деревьев сосны 30–40-летнего возраста на содержание химических элементов и для оценки нарушений биогеохимической миграции [16]. Образцы серой лесной почвы и хвои деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) отбирали на нескольких фоновых территориях, расположенных в сосновых лесах с ненарушенным почвенным покровом и удаленных от промышленной зоны г. Усолья-Сибирского на 80–150 км (с. Тальяны, долина р. Тойсук; д. Мутовка, долина р. Белой; пос. Нижний Кочергат, долина р. Голоустной). Фоновые значения для почв и растений соответствуют средним величинам показателей всех обследованных территорий.

Содержание химических элементов в почвенных и растительных пробах определялось методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии, пламенной фотометрии, фотоколориметрирования с использованием оборудования Байкальского аналитического центра (ЦКП — Байкал) Иркутского научного центра СО РАН [17–19]. Валовое содержание химических элементов в листьях и хвое растений устанавливали после предварительного озоления проб в муфельной печи. Подвижные формы элементов извлекались из почв однонормальным раствором соляной кислоты. Анализ ртути в подстилке, состоящей из органического материала, производился с помощью беспламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии (метод «холодного пара») [20]. Исследование физических параметров почв выполнялось по традиционным методикам; интенсивность дыхания почв — методом Галстяна и Штатнова [21]. Фитотоксичность почв изучалась по международному стандарту ИСО 11269-1 [22]. Техногенное воздействие на почвы определялось по расчету суммарного показателя концентрации (Zc) химических элементов [23] и степени опасности, позволяющей охарактеризовать интегральное загрязнение почв [24]. Для обработки данных использовали компьютерные статистические и геоинформационные программы «Среда статистических вычислений R, MapInfo».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

При натурных обследованиях территории отвала в первую очередь обращает на себя внимание сильное изменение почвенного покрова. Специфика его петрографического, химического составов и пространственной дифференциации определяется особенностями техногенного воздействия. Наши исследования показали, что формирование почв отвала в техногенной зоне г. Усолья-Сибирского происходило преимущественно путем непосредственного погребения естественных почв под пластинами твердых отходов промышленного производства. При этом немаловажную роль сыграли эрозионные процессы на прилегающих территориях, ускоряющие формирование техногенных наносов различной мощности.

В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов [13], в промышленной зоне нами выделено несколько типов эмбриоземов: инициальные, к которым относятся собственно техногенные поверхностные образования (ТПО), представляющие собой отходы промышленного производства; органо-аккумулятивные; дерновые; гумусово-аккумулятивные (табл. 1). На основании проведенного эдафического и дендрологического обследования сосны обыкновенной, произрастающей на техногенных почвах, возраст формирования инициального эмбриозема составляет около 20 лет, органо-аккумулятивного — 25–30, дернового — 30–35, гумусово-аккумулятивного — 40–45 лет.

Приведенный ряд последовательных изменений эмбриоземов можно рассматривать как стадии техногенного почвообразования на обследованном отвале. Морфологической особенностью эмбриоземов является слабая степень дифференциации их минеральной части на генетические горизонты. Так, в инициальных эмбриоземах, или ТПО, какие-либо органогенные горизонты полностью отсутствуют, в органо-аккумулятивных обязательно присутствует органическая подстилка, в дерновых отмечается наличие хорошо сформированной дернины, в гумусово-аккумулятивных существует вы-

Таблица 1

Характеристика эмбриоземов на территории промышленного отвала г. Усолья-Сибирского

Номер тест-участка	Тип почвы	Формула почвенного профиля, по [13]	Морфологические характеристики горизонтов почвенного профиля
1	Инициальный эмбриозем	R1–R2(R3)	R1 – белесоватый мелкозем с вкраплением каменистой породы серого и черного цветов, интенсивно вскипает от HCl R2(R3) — сильнокаменистая порода серого цвета с вкраплением обломков плотной породы черного цвета, не имеющая признаков физического выветривания, интенсивно вскипает от HCl
2	Органо-аккумулятивный эмбриозем	O–R1–R2(R3)	O — светло-бурая плохо разложившаяся подстилка из травянистых остатков, опада сосновой хвои, листьев деревьев и мелких веточек мощностью 1–3 см
3	Дерновый эмбриозем	O–AY–BER–BR–R(R1, R2)	AY — бурая плотная многолетняя дернина, сформированная живыми и отмершими корешками травянистых и древесных растений, мощностью 2–4 см BER — серый мелкозем, видны гумусовые потеки, живые корни травянистых и древесных растений, мелкие обломки плотных пород серого и черного цвета, вскипает от HCl BR — серый мелкозем с небольшим вкраплением каменистой породы черного цвета, интенсивно вскипает от HCl
4	Гумусово-аккумулятивный эмбриозем	O–AR–BEL–BER–BR–R(R1, R2)	AR — темно-бурый гумусово-аккумулятивный горизонт, прокрашенный органическим веществом, пронизанный живыми корнями растений, мощностью более 5 см, вскипает от HCl BEL — темно-серый мелкозем с единичным вкраплением каменистой породы, хорошо прогумусирован, видны корни растений, вскипает от HCl

раженная гумусированная толща. Другой характерный морфологический признак эмбриоземов — наличие в почвенном профиле техногенного мелкозема одинакового петрографического состава, что выявляется при оптическом анализе почв. Таким образом, исследования свидетельствуют, что развитие эмбриоземов во времени непосредственно связано как с накоплением органического вещества и его преобразованием при гумусообразовании, так и с процессом физического выветривания ТПО, в результате которого образуются разнодисперсные фракции техногенного мелкозема, приуроченные к различной глубине залегания почвенных горизонтов.

По физическим свойствам эмбриоземы, особенно инициальные, отличаются высокой водопроницаемостью, однако их поверхность не защищена от частых процессов высушивания и ветровой эрозии. В результате для почв характерны высокая впитывающая способность и быстрая испаряемость с поверхности. В середине вегетационного периода среднестатистические значения количества влаги, выраженные в долях от ее объема, в верхних слоях инициального эмбриозема составляют 7–10 %, органо-аккумулятивного — 10–12, дернового — 16–20, гумусово-аккумулятивного — 18–23 %. Следовательно, наиболее напряженный режим по обеспеченности влагой складывается для инициального эмбриозема. В зоне максимального техногенного воздействия, расположенной ближе всего к центру промышленного отвала, наблюдается быстрое иссушение незащищенной поверхности формирующихся почв. Подобная ситуация свойственна засушливым территориям с распространением супесчаных почв.

Особенность химических свойств исследуемых типов почв заключается в высокой щелочности их верхних горизонтов. Например, для инициального эмбриозема $pH_{\text{водн}}$ составляет 11–13, при следующих стадиях почвообразования она постепенно снижается от 10–12 (органо-аккумулятивный эмбриозем) до 8–9 (гумусово-аккумулятивный).

Известно, что эмбриоземам свойственна повышенная активность биохимических процессов, что является одной из характерных особенностей молодых почв техногенных экосистем [25]. В наших исследованиях это подтверждается данными о высоком уровне эмиссии CO_2 из верхних горизонтов. Наибольшие ее значения (более 25 мг/10 г почвы в сутки) регистрируются для органо-аккумулятивных эмбриоземов, для дерновых — 15–20, для гумусово-аккумулятивных — 10–15 мг/10 г почвы в сутки. Фоновые значения эмиссии CO_2 для гумусовых горизонтов серых лесных почв региона составляют 8–12 мг/10 г почвы в сутки.

Таблица 2

Коэффициенты концентрации* загрязняющих элементов в верхних горизонтах эмбриоземов

Химический элемент	Эмбриозем			
	инициальный	органом-аккумулятивный	дерновый	гумусово-аккумулятивный
Sr	29,6	25,3	22,5	21,3
Th	18,7	14,7	8,5	7,2
Ca	18,3	14,3	11,2	8,4
Mo	17,6	13,7	9,1	8,2
Se	15,4	12,2	10,1	7,5
B	13,2	10,2	6,5	5,4
As	10,5	8,1	6,1	5,8
Na	8,5	7,8	6,3	5,1
Cu	8,2	6,5	4,4	4,1
Pb	8,1	6,3	4,1	3,9
Cr	7,8	5,8	4,8	4,6
Cd	7,2	5,2	3,1	2,5
Zn	6,7	4,8	3,9	3,3
Ni	5,8	3,2	1,7	1,5
Li	3,8	2,5	1,9	1,4
U	3,6	2,3	2,1	1,7

* Коэффициенты концентрации вычислялись как отношение содержания элемента в эмбриоземе к его содержанию в незагрязненной серой лесной почве.

эмбриоземов. По нашим сведениям, формирование эмбриоземов происходило на промышленном отвале, в состав которого входило большое количество карбоната кальция. При химическом преобразовании до гидрокарбонатов и бикарбонатов в процессе гидролиза это соединение и определило высокую щелочность почвенных растворов изучаемых эмбриоземов.

Особо следует сказать о ртути, поскольку в производственном процессе предприятия ООО «Усоле-химпром» использовался ртутный электролиз, что привело к значительному загрязнению этим токсичным элементом почв города и его окрестностей [26]. Наши исследования показали, что в органической подстилке гумусово-аккумулятивного эмбриозема содержание ртути составляет 0,08 мг/кг, дернового — 0,1, органом-аккумулятивного — 0,12 мг/кг, что в 6,4; 8 и 9,6 раза соответственно превышает региональные фоновые концентрации (0,011–0,015 мг/кг) этого элемента.

Сильно нарушенные эдафические условия на рассматриваемом отвале сопровождаются также повышенной токсичностью по отношению к растениям. Для оценки фитотоксичности почв в качестве тест-объекта использовались семена пшеницы сорта «Иркутская озимая». При испытаниях установлено, что каждая стадия почвообразования характеризуется определенным изменением морфометрических показателей растений пшеницы. Так, наименьшая длина проростков и первого листа обнаруживается при использовании вытяжки из образцов инициального эмбриозема, показатель фитотоксичности которого очень высок и превышает значения для фоновых почв на 47,3 %, органом-аккумулятивного — на 39,6 %, гумусово-аккумулятивного — на 26,8 %.

При натуральных обследованиях тест-участков отвала обнаружено, что каждой стадии техногенного почвообразования соответствует распространение определенных растительных сообществ. На инициальных эмбриоземах растительность представлена небольшими пионерными группировками, сложными в основном сорными видами (*Artemisia absinthium* L., *Polygonum aviculare* L. s. l., *Atriplex* L.). На органом-аккумулятивных эмбриоземах помимо сорных видов в небольшом количестве отмечаются злаки и осоки, также встречаются небольшие куртины кустарников (*Padus avium* Miller, *Caragana arborescens* Lam., *Hippophaë rhamnoides* L., *Salix* sp.) и единичные низкорослые сильно угнетенные деревья (*Pinus sylvestris* L., *Populus* sp., *Betula pendula* Roth.). На дерновых эмбриоземах процент проективного

Определение непосредственного показателя загрязнения почв — содержания в них токсичных металлов — выявило, что их концентрации максимальны в инициальном и органом-аккумулятивном эмбриоземах, о чем свидетельствуют рассчитанные коэффициенты концентрации (Кс) этих элементов (табл. 2). Поскольку в загрязненных почвах отмечается высокое содержание многих химических элементов, был рассчитан суммарный показатель их концентраций, характеризующий интегральное техногенное воздействие на почвы: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n — число определяемых элементов. Для инициального эмбриозема Z_c составляет 143,2; для органом-аккумулятивного — 107,8; для дернового — 75,8; для гумусово-аккумулятивного — 65,4. При этом критические значения Z_c по степени опасности, позволяющие охарактеризовать суммарное загрязнение, таковы: при $Z_c < 16$ загрязнение считается неопасным; при $16 < Z_c < 32$ — умеренно опасным; при $32 < Z_c < 128$ — опасным; при $Z_c > 128$ — чрезвычайно опасным [24]. Следовательно, уровень загрязнения инициального эмбриозема характеризуется как чрезвычайно опасный, остальных эмбриоземов — как опасный.

При исследовании кислоторастворимых форм кальция и натрия (см. табл. 2) установлено, что уровень кальция в верхних горизонтах эмбриоземов в 8,4–18,3 раза превышает фоновое значение, натрия — в 5,1–8,5 раза. Высокое содержание кальция объясняется химическим составом техногенного субстрата

Морфометрические показатели побегов и хвои сосны обыкновенной на эмбриоземах и незагрязненных почвах

Параметр	Эмбриозем			Серые лесные почвы
	органо-аккумулятивный	дерновый	гумусово-аккумулятивный	
Количество хвоинок на побеге 2-го года жизни, шт.	38,21 ± 4,98	43,12 ± 3,57	61,53 ± 5,52	112,5 ± 6,81
Масса хвои на побеге 2-го года жизни, г	1,72 ± 0,11	1,83 ± 0,12	3,71 ± 0,25	11,73 ± 0,64
Масса 100 хвоинок, г	3,81 ± 0,38	4,84 ± 0,25	6,95 ± 0,34	10,61 ± 0,21
Длина побегов 2-го года жизни, см	5,24 ± 0,41	5,80 ± 0,36	8,66 ± 0,61	18,38 ± 0,85
Длина хвои, мм	30,53 ± 3,43	35,48 ± 4,88	42,36 ± 5,27	62,13 ± 6,25
Ширина хвои, мм	1,17 ± 0,12	1,24 ± 0,13	1,30 ± 0,15	1,54 ± 0,22
Общая поверхность хвои, см ²	0,91 ± 0,13	1,12 ± 0,18	1,42 ± 0,23	2,85 ± 0,27

покрытия более высокий. В растительных группировках преобладают *Achillea millefolium* L., *Artemisia absinthium* L., *Bromopsis inermis* (Leysser) Holub, *Trifolium hybridum* L., *T. repens* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Potentilla anserina* L., *Medicago sativa* L. Древесная и кустарниковая растительность представлены отдельными группами. На участках отвала, где формируются гумусово-аккумулятивные эмбриоземы, нередко сложные растительные группировки, проективное покрытие травяного покрова колеблется от 30 до 50 %, в его состав входит 12–15 видов. Наблюдаются небольшие массивы древесной растительности смешанного состава.

Визуально как травянистая, так и древесная растительность отвала сильно отличаются от таковой на ненарушенных почвах. Нами детально проанализировано состояние сосны обыкновенной — вида-индикатора, наиболее чувствительного к воздействию техногенного загрязнения. Обнаруживается, что произрастающие на дерновых и гумусово-аккумулятивных эмбриоземах молодые деревья сосны очень ослаблены. На это указывает изменение целого ряда параметров. Так, высота ствола 30–40-летних деревьев не превышает 4 м (на фоновых территориях — 6 м), диаметр — 0,08 м (фоновые значения — 0,15 м); нарушено формирование корневой системы деревьев (появляется поверхностная корневая система и плохо развиваются всасывающие корешки); видоизменяются боковые побеги (из-за отмирания почек роста происходит их искривление); распространены стволовые гнили и раковые заболевания деревьев (поражение охватывает до 60 % насаждений); повышается до 60–70 % уровень дефолиации крон деревьев (в фоновых условиях — 10–15 %); снижается до 2–3 лет продолжительность жизни хвои (на ненарушенных территориях — 5–6 лет). Значительно изменяется и ряд других морфометрических показателей побегов и хвои деревьев сосны (табл. 3). Максимальные отклонения зафиксированы для деревьев, произрастающих на органо-аккумулятивных эмбриоземах: длина побегов снижается до 3,5 раза, длина хвои — до двух, масса хвои на побегах — до семи, количество пар хвоинок на побеге — до трех, общая поверхность хвои — до трех раз.

При химико-аналитическом исследовании образцов хвои сосны обнаружены значительные различия в накоплении элементов-загрязнителей у деревьев, произрастающих на эмбриоземах разных стадий почвообразования, в сравнении с деревьями на незагрязненных (фоновых) почвах (табл. 4). Самые высокие концентрации валовых форм элементов-поллютантов в ассимиляционных органах сосны регистрируются на территориях, где развиваются первичные процессы почвообразования, т. е. формируются органо-аккумулятивные эмбриоземы. На других типах эмбриоземов в хвое происходит снижение концентрации этих элементов, но фоновому уровню они не достигают.

Содержание элементов-загрязнителей в ассимиляционных органах древесных растений в значительной степени обусловлено интенсивным перераспределением этих элементов в системе почвенного профиля эмбриоземов. Тесные связи выявлены между накоплением кислоторастворимых форм тяжелых металлов в верхних горизонтах почв и их валовым содержанием в ассимиляционных органах древесных растений. Так, получена прямая зависимость между содержанием цинка и меди в эмбриоземах и их концентрацией в хвое деревьев (рис. 2). Исходя из этих данных, можно утверждать, что при подщелачивании почв идет процесс высвобождения ионов ряда тяжелых металлов в почвенный

Содержание элементов в хвое сосны, произрастающей на эмбриоземах промышленных отвалов г. Усолья-Сибирского и почвах фоновых территорий

Элемент, мг/кг сухого вещества	Эмбриозем			Серые лесные почвы
	органно-аккумулятивный	дерновый	гумусово-аккумулятивный	
Pb·10	6,89 ± 0,06	6,15 ± 0,05	5,16 ± 0,03	1,23 ± 0,02
Cd·10	2,32 ± 0,07	1,83 ± 0,06	1,64 ± 0,05	0,23 ± 0,04
Cu·10	0,78 ± 0,03	0,64 ± 0,02	0,51 ± 0,02	0,20 ± 0,03
Zn·10 ²	2,99 ± 0,09	2,58 ± 0,09	1,76 ± 0,06	0,41 ± 0,06
Mn·10 ²	7,49 ± 0,08	5,01 ± 0,08	4,32 ± 0,07	1,73 ± 0,05
Fe·10 ²	5,31 ± 0,17	3,46 ± 0,11	2,49 ± 0,09	0,97 ± 0,08
Al·10 ²	11,52 ± 0,14	7,08 ± 0,12	6,55 ± 0,09	1,85 ± 0,07
Ca·10 ³	71,76 ± 0,95	65,78 ± 0,83	63,38 ± 0,68	5,98 ± 1,19
Mg·10 ³	43,18 ± 0,09	35,72 ± 0,11	27,32 ± 0,14	5,46 ± 0,71
K·10 ³	13,32 ± 0,08	10,94 ± 0,06	7,27 ± 0,04	1,49 ± 0,06
Na·10 ²	4,25 ± 0,84	4,02 ± 0,81	3,32 ± 0,67	0,81 ± 0,04

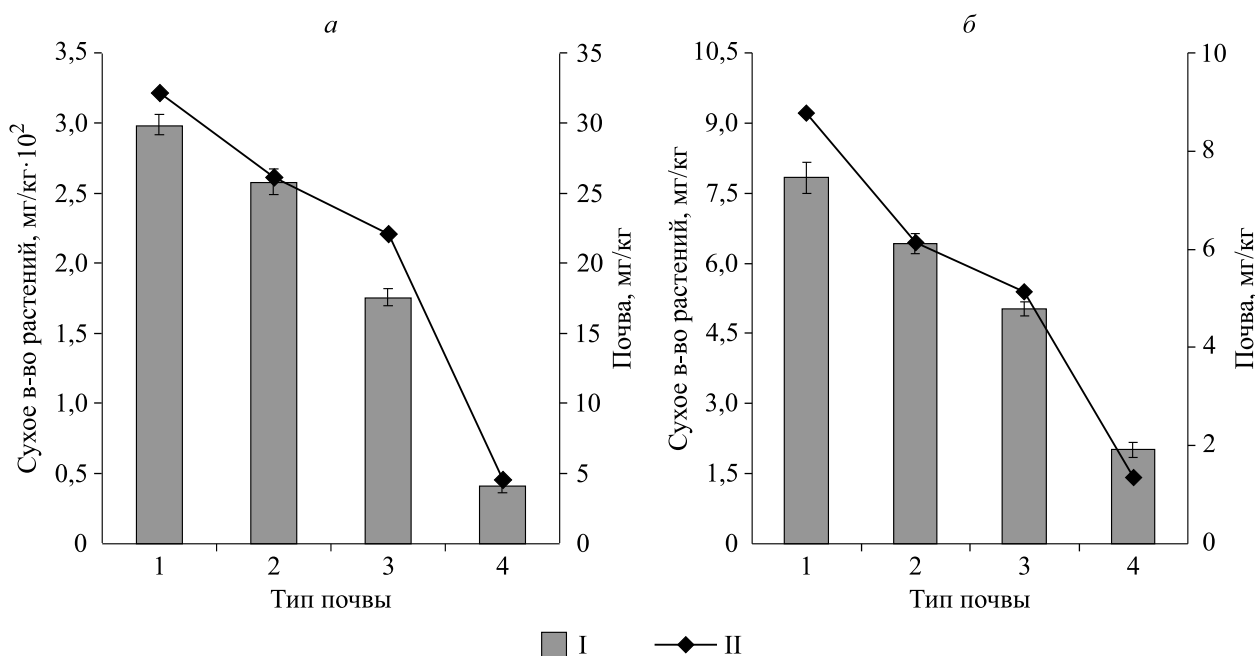


Рис. 2. Содержание валовых форм цинка (а) и меди (б) в хвое сосны (I) и верхних горизонтах почв (II).

Почва: 1 — органно-аккумулятивный эмбриозем, 2 — дерновый эмбриозем, 3 — гумусово-аккумулятивный эмбриозем, 4 — серая лесная.

раствор, образование растворимых карбонатных комплексов металлов и дальнейшее их активное поступление из горизонтов эмбриоземов в ассимиляционные органы растений через корневую систему.

Установлено также, что основной причиной увеличения в хвое сосны валовых концентраций кальция и натрия является изменение кислоторастворимых форм этих элементов в почвенных вытяжках. На это указывают высокие коэффициенты корреляции между их уровнем в почве и хвое ($r = 0,85-0,97$). Поскольку значительные концентрации анализируемых элементов, особенно кальция, содержатся в исследуемых почвах в виде легкорастворимых солей, они обладают высоким потенциалом миграции в почве и легко поступают в корневую систему и далее в ассимиляционные органы древесных растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории промышленного отвала крупного химического производства по морфологическим признакам выделено несколько типов эмбриоземов: инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые, гумусово-аккумулятивные, которые можно рассматривать как последовательные стадии техногенного почвообразования. На основании эдафического и дендрологического обследования установлен временной период формирования почв: от 20 лет для инициальных эмбриоземов до 45 лет для гумусово-аккумулятивных. Эмбриоземы характеризуются слабой степенью дифференциации их минеральной части на генетические горизонты, высокой впитывающей способностью и быстрой испаряемостью с поверхности. В верхних горизонтах техногенных почв обнаружено значительное содержание таких элементов-загрязнителей, как стронций, торий, молибден, селен, бор, мышьяк. По суммарному показателю их концентраций инициальные эмбриоземы отнесены к категории чрезвычайно опасного загрязнения, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные — опасного загрязнения. Установлена высокая щелочность почв (максимальный $pH_{\text{водн}}$ 13) и значительное содержание карбонатов кальция в почвах. Показатели фитотоксичности эмбриоземов превышают фоновые величины в 6–10 раз.

Каждой стадии техногенного почвообразования соответствует распространение определенных растительных сообществ. На инициальных эмбриоземах выделяются пионерные группировки, сложенные в основном травянистыми сорными видами, на органо-аккумулятивных встречаются злаки, осоки, кустарники, на дерновых и гумусово-аккумулятивных представлены различные группы травянистой и древесной растительности. Состояние растений на всех типах почв отличается разной степенью угнетения. Деревья сосны 30–40-летнего возраста, произрастающие на органо-аккумулятивных эмбриоземах, характеризуются сильно сниженными морфометрическими параметрами побегов и хвои. В ассимиляционных органах регистрируется высокий уровень элементов-загрязнителей, в некоторых случаях превышающий фоновые концентрации в 10–12 раз. Наличие прямых достоверных связей между содержанием этих элементов в хвое деревьев и верхних горизонтах эмбриоземов свидетельствует об активном их поступлении в организм растения через корневую систему.

На основе полученных данных можно заключить, что на обследованном техногенном отвале происходит взаимосвязанная трансформация эмбриоземов и растительности, тренд которой направлен в сторону самовосстановления почвенно-растительного покрова.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту № 0343-2014-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный** портал PROTOWN.RU [Электронный ресурс]. — <http://www.protown.ru/russia/obl/> (дата обращения: 15.12.2013).
2. **Махонина Г. И., Чибрик Т. С.** Некоторые закономерности процессов естественного восстановления растительного и почвенного покрова на отвалах открытых разработок Урала // Теоретические и практические проблемы рекультивации нарушенных земель. — М.: Колос, 1975. — С. 344–347.
3. **Баталов А. А., Мартъянов Н. А., Кулагин А. Ю., Горюхин О. Б.** Лесовосстановление на промышленных отвалах Предуралья и Южного Урала. — Уфа: Изд-во Башк. науч. центра УрО АН СССР, 1989. — 140 с.
4. **Гаджиев И. М., Курачев В. М., Рагимзаде Ф. К.** Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. — Новосибирск: Наука, 1992. — 305 с.
5. **Куприянов А. Н., Морсакова Ю. В.** Начальные этапы формирования растительного покрова на техногенных экотопах Кузбасса // Сиб. экол. журн. — 2008. — Т. 15, № 2. — С. 255–261.
6. **Андроханов В. А., Овсянникова С. В., Курачев В. М.** Техноземы: свойства, режимы, функционирование. — Новосибирск: Наука, 2000. — 200 с.
7. **Андроханов В. А., Курачев В. М.** Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 224 с.
8. **Сёмина И. С., Беланов И. П., Шипилова А. М., Андроханов В. А.** Природно-техногенные комплексы Кузбасса: свойства и режимы функционирования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. — 396 с.
9. **Чибрик Т. С., Елькин Ю. А.** Формирование фитоценозов на нарушенных промышленностью землях (биологическая рекультивация). — Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991. — 220 с.
10. **Гусев А. П.** Первичная сукцессия на отвалах фосфогипса (Гомельский химический завод, Белоруссия) // Экология. — 2006. — № 3. — С. 232–235.
11. **Евдокимова Г. А.** Процессы первичного почвообразования на нефелинсодержащих отходах (на примере хвостохранилищ ОАО «Апатит») // Вестн. Кольск. науч. центра РАН. — 2010. — № 1. — С. 34–47.

12. Шергина О. В. Лесные почвы фоновых территорий // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2013. — Т. 6, № 1. — С. 223–237.
13. Курачев В. М., Андроханов В. А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сиб. экол. журн. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 255–261.
14. Ярошенко П. Д. Геоботаника. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. — 474 с.
15. Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатьева О. В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. — 134 с.
16. International co-operative programmer on assessment and monitoring of air pollution on forests in the ECE region. Soil and plant expert panel draft report / Ed. by M. Starr. — Finland: National Board of Waters and Environment, 1990. — 66 p.
17. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А. И. Ермакова. — Л.: Агропромиздат, 1987. — 430 с.
18. Пройдакова О. А., Цыханский В. Д., Матвеева Л. Н. и др. Физико-химические методы при определении макро- и микроэлементов в объектах окружающей среды // Геохимия техногенеза. — Новосибирск: Наука, 1986. — С. 124–130.
19. Пройдакова О. А., Васильева И. Е. Способ совершенствования схем пробоподготовки и атомно-абсорбционного анализа геохимических проб // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2009. — Т. 75, № 4. — С. 6–15.
20. Таусон В. Л., Меньшиков В. И., Андрулайтис Л. Д. Ртуть в галените: анализ форм нахождения в связи с градуировкой сфалерит-галенитового геотермометра // Геохимия. — 1989. — № 7. — С. 936–949.
21. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А. В. Соколова. — М.: Наука, 1975. — 656 с.
22. Фомин Г. С., Фомин А. Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. — М.: Протектор, 2001. — 304 с.
23. Саег Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
24. Выборов С. Г., Павелко А. И., Шукин В. Н., Янковская Э. В. Оценка степени опасности загрязнения почв по комплексному показателю нарушенного геохимического поля // Современные проблемы загрязнения почв: Материалы Междунар. науч. конф. Москва, 24–28 мая 2004 г. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — С. 195–197.
25. Гумусообразование в техногенных экосистемах / Ред. Р. В. Ковалева. — Новосибирск: Наука, 1986. — 166 с.
26. Гордеева О. Н., Рязанцева О. С. Формы нахождения ртути в почвах природно-техногенных ландшафтов Приангарья // Современные проблемы геохимии: Материалы Всерос. науч. конф. Иркутск, 12–17 сент. 2011 г. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2011. — С. 152–156.

Поступила в редакцию 3 июня 2014 г.