Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 3 (27). С. 36–52

УДК 631.618
doi: 10.17223/19988591/27/3

Д.А. Соколов[1], С.П. Кулижский[2], С.В. Лойко[2], Е.А. Доможакова[3]

[1]Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2]Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[3]Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, г. Кызыл, Республика Тыва, Россия

Использование сканирующей электронной микроскопии для диагностики процессов почвообразования на поверхности отвалов каменноугольных разрезов Сибири

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-04-90773 мол_рф_нр)

Впервые для почв техногенных ландшафтов проведены исследования на микро- и субмикроморфологическом уровне. С использованием средств сканирующей электронной микроскопии проведена диагностика почвообразовательных процессов молодых почв, формирующихся на поверхности отвалов каменноугольных разрезов. Выявлены общие и отличительные микроморфологические признаки начальных стадий почвообразования в условиях гумидного, субгумидного, семиариадного, аридного и аридного экстраконтинентального климата. Показано, что микромасса исследуемых почв характеризуется преобладанием унаследованных породных признаков. Тонко- и грубодисперсные частицы эмбриоземов имеют пластинчатую форму. По результатам микроморфологического анализа почвенных микроарегатов и новообразований, установлено, что в условиях гумидного и субгумидного климата происходит сезонное поверхностное переувлажнение почв, создающее предпосылки для протекания глеевого и подзолистого процессов. Почвы техногенных ландшафтов аридных областей характеризуются более выраженным ксероморфизмом по сравнению с зональными. В этих условиях процесс трансформации органического вещества сопровождается не гумификацией, а мумификацией растительных остатков.

Ключевые слова: *техногенные ландшафты; почвообразовательные процессы; микроморфология; эволюция почв; эмбриоземы; отвалы угольных разрезов; зональные почвы.*

Введение

Проблема диагностики процессов почвообразования, определения скорости их протекания в молодых почвах в настоящее время является одной из самых острых, поскольку тесным образом связана с проблемой восстановления техногенных ландшафтов. Особенно она актуальна для угледобывающих регионов, где площади отвалов вскрышных и углевмещающих пород составляют несколько сотен тысяч гектаров [1, 2]. Длительное время эти объекты функци-

онируют как техногенные пустыни, тем самым наносят непоправимый вред окружающей среде и здоровью населения прилегающих территорий [3].

Минимизация негативных экологических последствий достигается в том случае, если на поверхности техногенных образований начинают протекать почвообразовательные процессы. Их направленность и интенсивность могут быть установлены только посредством многоуровневых морфогенетических исследований, которые, будучи дополненными оценкой почвообразовательного потенциала климатогенных и геогенных факторов, позволяют выявить почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов.

В настоящее время исследованию морфологических свойств почв техногенных ландшафтов уделяется достаточное внимание в таких регионах, как Дальний Восток [4–6], Средняя [7–10] и Западная Сибирь [11–14], Урал [15], а также Центральная [16] и Северо-Западная Россия [17–19]. Однако, несмотря на немалый интерес, процесс обобщения обширного материала (в основном регионального характера) в этой области находится в фазе становления и во многом сделался возможным только после появления генетической классификации почв техногенных ландшафтов [20] и выделения в классификации почв России ствола первичного почвообразования [21]. Проводимые на их основе макроморфологические исследования позволили выявить специфику дифференциации почвенного профиля молодых почв в различных климатических условиях, охарактеризовать основные почвообразовательные процессы, а в ряде случаев оценить и потенциал геогенных факторов. Однако более детальные – микро- и субмикроморфологические – исследования с использованием новейших инструментальных методов, дающие возможность в полной мере оценить характер основных и выявить сопутствующие процессы в молодых почвах, в нашей стране сегодня не проводятся.

Почвы техногенных ландшафтов как сравнительно молодые образования, не используемые в хозяйственной деятельности, до недавнего времени объектами детальных морфологических исследований не являлись [22]. В то же время, как указывает Г.В. Добровольский [23], изучение микроморфологии почв позволяет производить раннюю диагностику почвенных процессов, развитие которых находится на начальных стадиях, и прогнозировать дальнейший ход эволюции молодых почв. Подобные исследования, на взгляд авторов, возможны с применением средств электронной сканирующей микроскопии. Выявление микро- и субмикроморфологических особенностей почв техногенных ландшафтов Сибири и оценка характера протекающих в них процессов с применением таких средств и явилось целью настоящего исследования.

Материалы и методики исследований

В качестве объектов исследований выбраны молодые почвы техногенных ландшафтов, по своим свойствам резко отличающиеся от естественных почв. Важным условием выбора также явилась значительная площадь

области распространения подобных объектов, позволяющая охватить разнообразные климатические зоны. Поэтому выбор пал на почвы отвалов каменноугольных разрезов, широко представленных в различных регионах Сибирского федерального округа, где их суммарная площадь по разным оценкам составляет от 100 до 300 тыс. га. Были исследованы почвы автономных позиций техногенных объектов, расположенных в гумидном и субгумидном (горно-таежная и лесостепная зоны Кемеровской области), а также семиаридном (степи Хакасии), аридном и аридном экстраконтинентальном климате (степи Тувы). Таким образом, ряд исследованных объектов можно выстроить по степени увеличения аридности и континентальности климата (таблица).

Климатические условия почвообразования исследуемых объектов / Climatic conditions of soil formation of the studied objects

Параметры / Options	Название углеразреза / Name of the coal mine				
	Ольжерасский / Olzherassky	Листвянский / Listvyansky	Черногорский / Chernogorsky	Чаданский / Chadansky	Каа-Хемский / Kaa-Khemsky
Геоморфологический район / Geomorphological area	Кузнецкий Алатау / Kuznetsk Alatau	Кузнецкая котловина / Kuznetsk Depression	Минусинская котловина / Minusinsk Depression	Хемчикская котловина / Khemchuk Depression	Центрально-Тувинская котловина / Central Tuva Depression
Тип климата / Climate type	Гумидный / Humid	Субгумидный / Subhumid	Семиаридный / Semi-arid	Аридный / Arid	Аридный экстраконтинентальный / Arid extracontinental
Сумма активных температур, °C / Sum of active temperatures, °C	1 500–1 700	1 700–1 900	1 900–2 000	2 100–2 200	2 100–2 200
Осадки за год, мм / Precipitations, mm per year	750–1400	400–500	250–300	220–270	170–250
ГТК по Селянинову / Selyanov hydrothermal coefficient	1,9	1,5	1,2	1	0,7
Коэффициент увлажнения по Иванову / Ivanov precipitation-evaporation ratio	2,2	1,3	0,7	0,6	0,3

Для всех этих территорий характерны разновозрастные техногенные ландшафты, исходно сложенные хаотичной смесью различных по размеру обломков углевмещающих пород (аргиллиты, алевролиты и песчаники). На таком субстрате формируются молодые почвы отвалов, для которых высокая каменистость является общим свойством. Содержание каменистых фракций в профиле превышает 70%, мелкозема – от 7 до 25%, физической глины – от 2 до 8%. Помимо указанных выше обломков плотных осадочных пород в почвах отвалов угольных разрезов встречаются углистые частицы различного гранулометрического состава. В связи с этим содержание углерода в исследуемых почвах может варьировать от 2 до 15% [2].

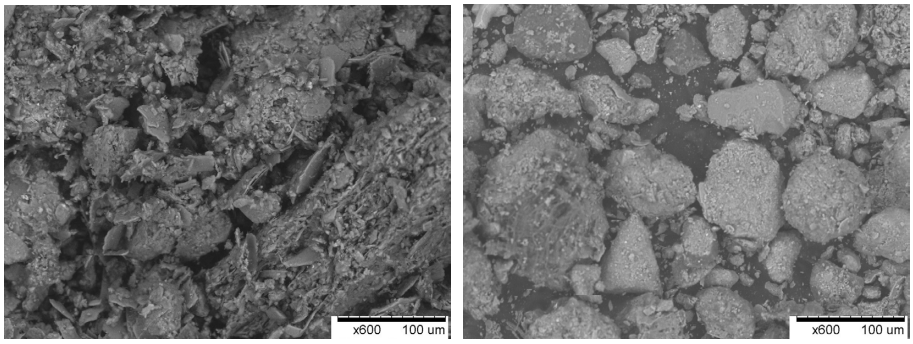
Проведенная ранее [14] макроморфологическая диагностика исследуемых почв выполнялась на основе классификации почв техногенных ландшафтов, разработанной И.М.. Гаджиевым и В.М. Курачевым [20]. В соответствии с ней на исследуемых участках были выделены инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные эмбриоземы. Установлено также, что дифференциация почв на генетические горизонты проявляется через формирование специфического для каждой климатической зоны органопрофиля. Наиболее выражен процесс дифференциации органопрофиля в условиях субгумидного климата, где на старых отвалах формируются почвы, в профиле которых выделяются гумусово-аккумулятивные, дерновые и горизонты подстилки. По мере усиления аридности и гумидности территорий степень дифференциации органопрофиля почв замедляется [24].

Для диагностики процессов почвообразования при помощи микро- и субмикроморфологических методов образцы для анализа отбирались из горизонтов верхней части почвенного профиля. Кроме того, исследовались образцы естественных почв, расположенных вблизи техногенных ландшафтов, а также почвообразующих пород, на которых они сформированы. Отобранные образцы мелкозема упаковывались в боксы. В силу причин, связанных со сложностью работы с сильнокаменистыми почвами, изготовление почвенных шлифов не выполнялось, поэтому исследовались сыпучие образцы, состоящие из агрегатов естественной размерности. Россыпь мелкозема, состоящую из агрегатов, помещали на липкую ленту, прикрепленную к предметному столику. На отвалах каждого углеразреза было обследовано по 3 почвенных профиля одного типа. Микроскопирование проводили в два этапа: 1) поиск и идентификация почвенных агрегатов и новообразований; 2) определение элементного состава поверхности выявленных объектов. Наблюдения проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 с приставкой для элементного анализа поверхности Bruker Quantax 70 при увеличении до 3 000. Элементный анализ на приставке выполнялся в режиме аналитического тока (30 кВ). Проводилась площадная съемка поверхности, совпадающая с размерами изображения, характерными для каждого из увеличений. Так, элементный состав микро-

конкреций (3 повторности для горизонта) определялся в круге диаметром 35 мкм.

Результаты исследования и обсуждение

Микро- и субмикроморфологические наблюдения показали, что грубо- и тонкодисперсный материал исследуемых почв резко отличается от такового в естественных почвах прилегающих территорий. Так, если частицы мелкозема естественных почв и лессовидного суглинка имеют близкую к сферической (окатанную) форму, то частицы мелкозема почв отвалов по своей конфигурации ближе к плитчатой или чешуйчатой форме (рис. 1). И это не случайно, поскольку почвообразующие породы исходно имеют слоистую текстуру. В дальнейшем, по мере выветривания, обломки этих пород распадаются на отдельные макро- и микропластины. Благодаря этому, а также за счет различной скорости прогревания и остывания частиц различных размеров происходит их горизонтальная ориентация в профиле. При этом образовавшийся в результате дезинтеграции мелкозем, вследствие миграции, занимает полости между более крупными отдельностями. Это обстоятельство, по нашему мнению, обусловливает свойственную эмбриоземам отвалов каменноугольных разрезов высокую плотность сложения [25], а сформированный в результате такой упаковки горизонт, несмотря на высокую каменистость, служит водоупором [26].



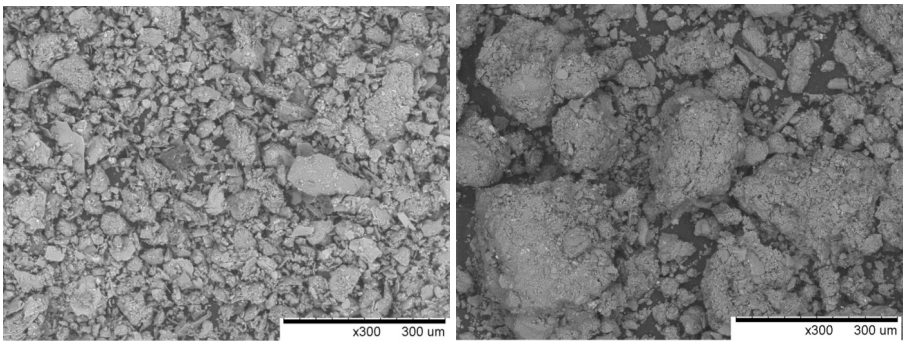
a *b*

Рис. 1. Микрофотографии фракции <0,25 мм инициального эмбриозема:
a – сформированного на техногенном элювии углевмещающих пород;
b – сформированного на лессовидном суглинке. Фото Д.А. Соколова, С.В. Лойко /

Fig. 1. Microphotographs of the fraction <0.25 mm of the initial embriozem.
a - formed on technogenic eluvium of coal-containing rocks;
b - formed on loess loam. Photo DA Sokolov, SV Loyko

Подобная слабая переработанность субстрата, на наш взгляд, является следствием его недостаточной дезинтеграции, а также низкой интенсивно-

сти структурообразующих процессов в эмбриоземах. В силу этого на фоне относительной молодости изученных почв их микромасса, как показали наши исследования, крайне редко ассоциирована в микроагрегаты. Единичные педогенные агрегаты были обнаружены нами только в гумусово-аккумулятивных эмбриоземах старых отвалов, сформированных в условиях субгумидного климата (рис. 2, *а*). В отличие от них в черноземах выщелоченных, являющихся зональными почвами для данной территории, в состав агрегатов входит практически вся почвенная микромасса (рис. 2, *б*).



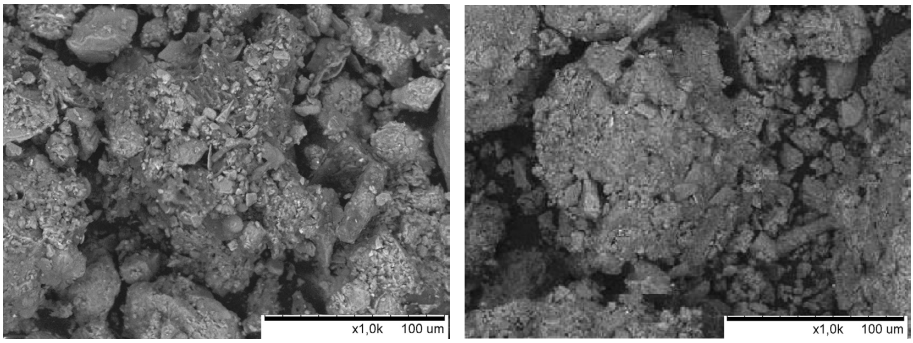
a *b*

Рис. 2. Микрофотографии фракции <0,25 мм:
а – гор. АС гумусово-аккумулятивного эмбриозема; *b* – гор. А чернозема выщелоченного тучного. Фото Д.А. Соколова, С.В. Лойко /

Fig. 2. Microphotographs of the fraction <0.25 mm:
a - AC horizon of humus accumulative embriozem;
b - A horizon of leached fertile chernozem. Photo DA Sokolov, SV Loyko

Важно отметить, что в отличие от сложноорганизованных, многопорядковых педов естественных почв в техногенных молодых почвах агрегаты формируют однопорядковую структуру. По своей форме они также отличаются: если в гумусово-аккумулятивных горизонтах естественных почв микроагрегаты имеют форму, близкую к сферической, то в исследуемых молодых почвах они представляют собой угловатые образования (рис. 3). Подобная угловатость также свидетельствует о слабой переработанности материала отвалов структурообразующими процессами и, как следствие, о преобладании унаследованных породных признаков [27].

Перечисленные микроморфологические признаки начальных стадий почвообразования можно обнаружить в молодых почвах техногенных ландшафтов практически всех регионов Сибири, где проводились наши исследования. Как было упомянуто выше, для этих регионов характерно разнообразие климатических условий, что не может не сказаться на формировании в эмбриоземах специфических почвообразующих признаков.



a *b*

Рис. 3. Почвенные микроагрегаты:
a – гор. АС гумусово-аккумулятивного эмбриозема;
b – гор. А чернозема выщелоченного. Фото Д.А. Соколова, С.В. Лойко /

Fig. 3. Soil microaggregates:
a - AC horizon of humus accumulative embriozem;
b - A horizon of leached chernozem. Photo DA Sokolov, SV Loyko

Так, в ходе исследований в образцах, отобранных на участках старых отвалов степных районов, были обнаружены продукты неполной минерализации растительных остатков. М.И. Герасимова и соавт. [27] такие продукты предлагают называть «углеподобными частицами», поскольку они имеют характерную окраску и утратили тканевое строение. Однако применение термина «углеподобные» при работе с почвами, содержащими большое количество литогенного угля и продуктов его трансформации, может привести к путанице в понятиях. На наш взгляд, наиболее удачно сущность описываемых образований может отразить термин «мумифицированное органическое вещество». На образование такой формы органического вещества в аридных экстраконтинентальных (криоаридных) климатических условиях указывал в свое время В.И. Волковинцер [28]. Крайне скудные запасы почвенной влаги, высокие температуры на фоне короткого биологически активного периода способствуют тому, что поступающие в почву растительные остатки длительное время не разлагаются, высушиваются, т.е. «мумифицируются» Это подтверждается низкими коэффициентами гумификации и свидетельствует об угнетении процессов минерализации растительных остатков [29, 30]. Иными словами, мумификация является специфическим процессом гумусообразования, характерным для зональных почв криоаридных территорий. Поэтому появление подобных образований в молодых почвах техногенных ландшафтов этих территорий объяснимо [31]. Однако проведенные нами исследования обнаружили описываемое «мумифицированное» органическое вещество в молодых почвах и других регионов, в том числе с семиаридным климатом (рис. 4). Этот факт позволяет сделать вывод о том, что формирующиеся молодые почвы данных территорий характеризуются более выраженным ксе-

роморфизмом по сравнению с зональными. Вследствие этого в техногенных ландшафтах формируются эмбриоземы лишь начальных стадий – инициальной и органо-аккумулятивной [14].

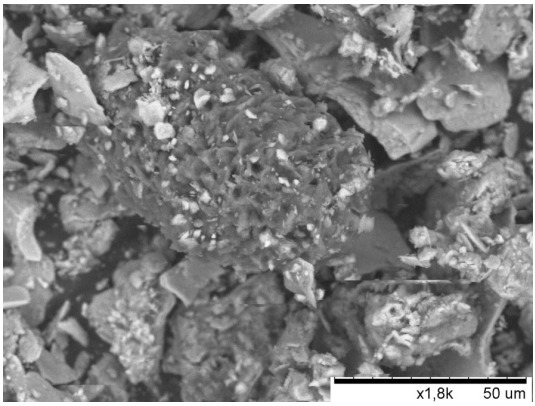


Рис. 4. Мумифицированное органическое вещество. Фото Д.А. Соколова, С.В. Лойко /

Fig. 4. Mummified organic substance. Photo DA Sokolov, SV Loyko

Совершено иная тенденция в протекании почвенных процессов была выявлена при микроморфологическом анализе мелкозема почв отвалов в субгумидных и гумидных районах. Здесь в профиле эмбриоземов отмечены новообразования железо-марганцевых микроконкреций (рис. 5). Большинство из отмечаемых новообразований имеют автохтонный характер, т.е. их нерезкие границы и сфероидальность говорят о том, что формирование этих микроконкреций проходило непосредственно в исследуемых нами почвах, а не в другой какой-либо среде. Доказательствами педогенного происхождения микроконкреций может служить их отсутствие: (1) в подстилающих породах ниже измененной почвообразованием толщи; (2) в эмбриоземах более аридных типов климата; (3) в образцах, взятых с отвалов, отсыпаемых в настоящее время, а также сформированных менее 10 лет назад. Эти доказательства не являются абсолютными, однако в совокупности с их типичным для почв строением и химическим составом можно с большой долей уверенности предполагать их педогенное происхождение.

Присутствие конкреций такой формы в зональных почвах является следствием плохого дренажа, переувлажнения и свидетельством глеевого процесса. Содержится много указаний на существование тесной связи образования железо-марганцевых конкреций и процесса оглеения [32]. Применительно к молодым почвам техногенных ландшафтов присутствие конкреций также может указывать на возникновение условий глеегенеза в связи с их существенным переуплотнением и сезонным переувлажнением. Отметим, что наличие конкреций указывает на существование в молодых

почвах контрастного окислительно-восстановительного режима, тогда как ранее в них признавалось абсолютное господство окислительных процессов [33, 13]. В зональных почвах такая контрастность режима, наряду с периодическим промыванием почвы, приводит к образованию элювиальных подзолистых горизонтов [32].

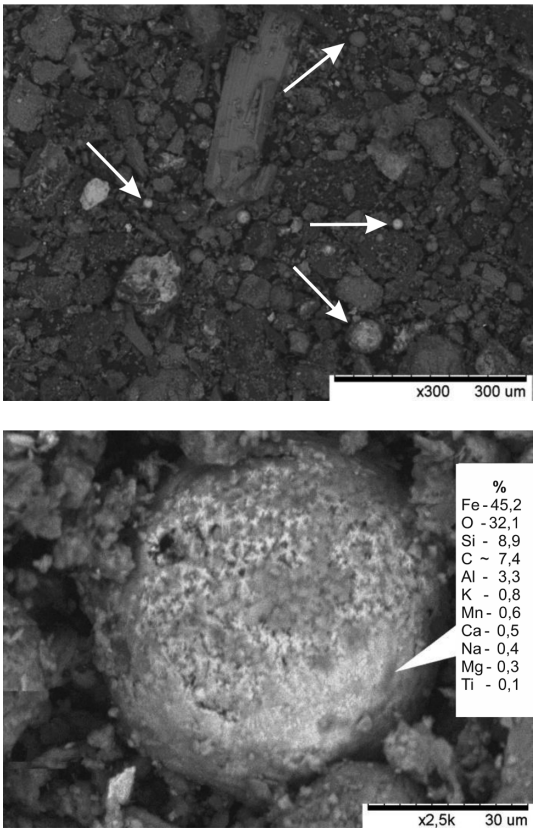


Рис. 5. Железистые новообразования в почвах техногенных ландшафтов. Фото Д.А. Соколова, С.В. Лойко /

Fig. 5. Ferruginous concretions in soils of technogenic landscapes. Photo DA Sokolov, SV Loyko

Принимая во внимание концепцию Ф.Р. Зайдельмана [34] о подзоливании как об одной из форм глееобразования, можно сделать вывод о возникновении в молодых почвах техногенных ландшафтов предпосылок для развития и глеевого и подзолистого процессов. В случае возникновения благоприятных условий дальнейшее развитие молодых почв будет сопровождаться формированием элювиальных горизонтов и выносом продуктов трансформации материала отвалов.

Рассмотренные процессы нельзя назвать главными в изученных молодых почвах субгумидных районов. На современных стадиях развития эмбриоземов ведущим остается процесс гумусонакопления. В дальнейшем при интенсификации элювиально-глеевого процесса развитие молодых почв будет проходить с формированием почв, близких по своим режимам не к черноземам, как считалось ранее [13], а к серым лесным.

Выявленное в процессе исследований единственное отличие микроконкреций, наблюдаемых в почвах техногенных ландшафтов, от таковых в зональных заключается в ином соотношении железа и марганца. На рис. 5 (нижний снимок) видно, что отношение Fe/Mn составляет 75, в то время как в дерново-подзолистых и серых лесных почвах оно колеблется в пределах от 2 (в гумусовых), до 25 (в элювиальных разной степени оглеенных горизонтах) [35–37]. По нашему мнению, такое несоответствие обусловлено не столько особенностями формирования конкреций в эмбриоземах, сколько различными методологическими подходами к их изучению. Дело в том, что при анализе железисто-марганцевых конкреций традиционными методами определяется элементный состав новообразования в целом, в то время как при использовании сканирующей электронной микроскопии анализируется только верхний его слой мощностью 1 мкм. Как было установлено В.Н. Шобой [38], формирование подобных новообразований происходит в результате биологической сегрегации с последующим физико-химическим осаждением на поверхность конкреции железа и марганца. Поскольку окислительно-восстановительные пары Fe^{2+}–Fe^{3+} и Mn^{2+}–Mn^{4+} имеют разные стандартные потенциалы, во многом определяющие растворимость этих элементов [39, 40], следует, что образование конкреции сопровождается попеременным их осаждением. В итоге она имеет дифференцированное по содержанию элементов слоистое строение. Отношение Fe/Mn говорит не о высокой степени гидроморфизма [34], а о резко контрастном окислительно-восстановительном режиме эмбриоземов.

Выводы

Таким образом, морфологические исследования почв техногенных ландшафтов Сибири с использованием сканирующей электронной микроскопии позволили выявить следующее.

1. Микромасса исследуемых почв характеризуется преобладанием унаследованных породных признаков. В силу сравнительной непродолжительности существования эмбриоземов она крайне редко ассоциирована в микроагрегаты. Единичные агрегаты свойственны гумусово-аккумулятивным эмбриоземам старых отвалов, сформированным в условиях субгумидного климата. Форма этих образований говорит о слабой переработанности субстрата структурообразовательными процессами.

2. Тонко- и грубодисперсные частицы эмбриоземов имеют пластинчатую форму. Благодаря этому в процессе функционирования молодых почв про-

исходит их уплотнение с образованием водоупорных слоев, что в условиях гумидного и субгумидного климата приводит к сезонному переувлажнению почв и создает предпосылки для глеевого и подзолистого процессов. Формируемый в результате контрастный окислительно-восстановительный режим сопровождается образованием железисто-марганцевых конкреций.

3. В гумидном климате в условиях кратковременно-застойного водного режима происходит оподзоливание верхней части профиля. Учитывая зональную специфику, дальнейшая эволюция почв будет сопровождаться формированием мощных элювиальных горизонтов и выносом продуктов трансформации материала отвалов.

4. В субгумидном климате в благоприятных условиях синхронного течения элювиально-глеевого процесса и гумусонакопления развитие молодых почв будет проходить с формированием почв, близких по своим режимам не к черноземам, как считалось ранее, а к серым лесным.

5. Почвы техногенных ландшафтов аридных областей характеризуются более выраженным ксероморфизмом по сравнению с зональными. В этих условиях процесс трансформации органического вещества сопровождается не гумификацией, а мумификацией растительных остатков. В итоге эволюция почв на поверхности отвалов каменноугольных разрезов достигает только органо-аккумулятивной, реже – дерновой стадии почвообразования.

Литература

1. *Потапов В.П., Мазикин В.П., Счастливцев Е.Л., Вашлаева Н.Ю.* Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск : Наука, 2005. 660 с.
2. *Андроханов В.А., Курачев В.М.* Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
3. *Глушков А.Н., Бондарь Г.В., Мун С.А., Ларин С.А., Браиловский В.В., Чухров Ю.С., Магарилл Ю.А., Зинчук С.Ф., Грищенко С.В., Кузнецова Л.Н., Дмуховская Е.А., Нильсен Н.Т.* Заболеваемость раком легкого населения угледобывающих районов России и Украины // Здравоохранение РФ. 2009. № 5. С. 37–40.
4. *Костенков Н.М., Пуртова Л.Н.* Общие закономерности формирования почв на отвальных породах и их гумусовое состояние // Вестник КрасГАУ. 2009. № 6. С. 17–23.
5. *Комачкова И.В.* Экологическое состояние почв техногенных ландшафтов юга Приморья // Вестник КрасГАУ. 2012. № 2. С. 68–73.
6. *Назаркина А.В., Крупская Л.Т., Арефьева О.Д., Дербенцева А.М., Трегубова В.Г., Самчинская Л.П., Бровко П.Ф., Костенков Н.М., Степанова А.И., Волобуева Н.Г., Черновалова А.В.* Техногенная трансформация свойств почв угольных и горнопромышленных комплексов. Владивосток : Изд. Дом ДВФУ, 2012. 143 с.
7. *Чупрова В.В., Шугалей Л.С.* Особенности макроморфогенеза почв на отвалах угольных разрезов Назаровской котловины // Вестник КрасГАУ. 2007. № 1. С. 61–70.
8. *Бабаев М.В., Кураченко Н.Л.* Микроструктурная организация почв техногенных ландшафтов Назаровской котловины // Вестник КрасГАУ. 2011. № 7. С. 66–72.
9. *Лопатовская О.Г., Двуреченский В.Г., Лазарева С.Д., Киселева Н.Д.* Почвы техногенных ландшафтов гипсового рудника «Новонукутский» в Приангарье // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Биология. Экология. 2012. № 2. С. 81–87.
10. *Шугалей Л.С., Чупрова В.В.* Почвообразование в техногенных ландшафтах лесостепи Назаровской котловины Средней Сибири // Почвоведение. 2012. № 3. С. 246–256.

11. *Рагим-Заде Ф.К.* Техногенные элювии вскрышных пород угольных месторождений Сибири, оценка их пригодности для восстановления почвенного покрова : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1977. 22 с.
12. *Курачев В.М., Андроханов В.А.* Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. № 3. С. 255–261.
13. *Андроханов В.А.* Специфика и генезис почвенного покрова техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2005. №5. С. 795–800.
14. *Соколов Д.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Госсен И.Н.* Особенности формирования почв техногенных ландшафтов в различных природно-климатических зонах юга Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 364. С. 225–229.
15. *Махонина Г.И.* Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2003. 356 с.
16. *Солнцева Н.П., Герасимова М.И., Рубилина Н.Е.* Морфогенетический анализ техногенно преобразованных почв // Почвоведение. 1990. № 8. С. 124–129.
17. *Абакумов Е.В., Гагарина Э.И.* Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на Северо-Западе Русской равнины. СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 2006. 208 с.
18. *Переверзев В.Н., Ивлиев А.И., Горбунов А.В., Ляпунов С.М.* Первичное почвообразование на отвалах обогащения апатито-нефелиновых руд Кольского полуострова // Почвоведение. 2007. № 8. С. 1006–1013.
19. *Абакумов Е.В., Максимова Е.И., Лагода А.В., Копцева Е.М.* Почвоообразование на отвалах карьеров по добыче известняка и глин в районе г. Ухта // Почвоведение. 2011. № 4. С. 417–423.
20. *Гаджиев И.М., Курачев В.М.* Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск : Наука, 1992. 305 с.
21. *Полевой* определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
22. *Турсина Т.В., Морозова Т.Д.* Основные этапы развития микроморфологии почв в России // Почвоведение. 2011. № 7. С. 878–893.
23. *Добровольский Г.В., Шоба С.А.* Растровая электронная микроскопия почв. М. : Изд-во Мос. ун-та, 1978. 144 с.
24. *Соколов Д.А.* Географо-генетическая концепция характеристики почв отвалов каменноугольных разрезов Сибири // Природно-техногенные комплексы: рекультивация и устойчивое функционирование : материалы международной научной конференции. Новосибирск ; Новокузнецк, 2013. С. 173–178.
25. *Семина И.С., Беланов И.П., Шипилова А.М., Андроханов В.А.* Природно-техногенные комплексы Кузбасса: Свойства и режимы функционирования. Новосибирск : Наука, 2013. 396 с.
26. *Госсен И.Н.* Водопроницаемость почв на участках рекультивации различного направления // Рекультивация нарушенных земель в Сибири. Кемерово, 2009. С. 8–10.
27. *Герасимова М.И., Губин С.В., Шоба С.А.* Микроморфология почв природных зон СССР. Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 1992. 214 с.
28. *Волковинцер В.И.* О почвообразовании в степных котловинах юга Сибири // Почвоведение. 1969. № 8. С. 3–11.
29. *Куминова А.В.* Растительный покров Алтая. Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1960. 205 с.
30. *Волковинцер В.И.* Степные криоаридные почвы. Новосибирск : Наука, 1978. 208 с.
31. *Гуркова Е.А.* Почвенно-географическая специфика Центрально-Тувинской котловины : автореф. дис. … канд. биол. наук. Новосибирск, 2009. 19 с.
32. *Зайдельман Ф.Р.* Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М. : КДУ, 2009. 720 с.

33. *Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М.* Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 151 с.
34. *Зайдельман Ф.Р.* Подзоло- и глееобразование. М. : Наука, 1974. 208 с.
35. *Ковалев Р.В., Корсунов В.М., Шоба В.Н.* Процессы и продукты почвообразования в темнохвойных лесах. Новосибирск : Наука, 1981. 121 с.
36. *Шоба С.А., Балабко П.Н.* Микростроение и состав марганцево-железистых новообразований почв лесной зоны // Микроморфология, диагностика почв и почвообразовательных процессов. М. : Наука, 1983. С. 21–33.
37. *Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С.* Классификация, свойства и информационное значение марганцево-железистых конкреционных новообразований // Память почв. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. С. 314–351.
38. *Шоба В.Н.* Миграция и аккумуляция продуктов почвообразования в дерново-глубокоподзолистых поверхностно-оглеенных почвах Салаира : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1978. 20 с.
39. *Кауричев И.С., Орлов Д.С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М. : Колос, 1982. 247 с.
40. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М. : Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. 184 с.

Поступила 12.02.2014 г.; повторно 15.07.2014 г.; принята 25.07.2014 г.

Авторский коллектив:
Соколов Денис Александрович – канд. биол. наук, н.с. лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия). E-mail: sokolovdenis@mail.ru
Кулижский Сергей Павлинович – д-р биол. наук, проректор по социальным вопросам Томского государственного университета (г. Томск, Россия). E-mail: kulizhskiy@yandex.ru
Лойко Сергей Васильевич – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Томского государственного университета (г. Томск, Россия). E-mail: s.loyko@yandex.ru
Доможакова Евгения Александровна – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биоразнообразия и геоэкологии Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (г. Кызыл, Республика Тыва, Россия). E-mail: sollygeohennet@mail.ru

Tomsk State University Journal of Biology. 2014. № 3 (27). P. 36–52

***Denis A. Sokolov[1], Sergey P. Kulizskiy[2], Sergey V. Loyko[2], Evgenia A. Domozhakova**

[1]Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation.
E-mail: sokolovdenis@mail.ru
[2]Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.
[3]Tuvan Institute for the Exploration of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Republic of Tuva, Russian Federation.

Using electronic scanning microscopy for diagnostics of soil-forming processes on the surface of coal-mine dumps in Siberia

The aim of our research was to define micro- and submicromorphological features of soils of technogenic landscapes of Siberia by using electronic scanning microscopy and to evaluate the character of the ongoing processes.

We studied young soils of technogenic landscapes formed on the surface of coal-mine dumps and widely presented in different regions of West-Siberian Federal District. We analyzed soils of autonomic positions of technogenic landscapes located in humid, sub-humid (mountain-taiga and forest-steppe zones of Kemerovo oblast), semi-arid (the steppe of Khakassia), arid and arid extra-continental (the steppe of Tuva) climate.

The results of our research showed that micro-mass of soils under consideration is characterized by prevalence of inherited rock properties. It is very rarely associated into micro-aggregates in view of relatively short time of embryozems existing. Single aggregates are peculiar to humus-accumulative embryozems of old dumps formed under conditions of sub-humid climate. The shape of such formations is evidence of inefficient retreatment of substrate by structure-organizing processes. Moreover, finely and roughly dispersed particles of embryozems are plate-shaped. Due to it, in the process of functioning, young soils are consolidated, forming a waterproof stratum, what leads to seasonal waterlog of soils and creates prerequisites for gley and podzol processes under conditions of humid and sub-humid climate. We established that in humid climate under conditions of short-time stagnant water regime, there is podzolization of the upper part of soil profile. Taking into account the zonal specifics, later evolution of soils will be accompanied by forming thick eluvial horizons and removing products of dump material transformation. In sub-humid climate with favorable conditions of coincident gley and podzol processes and humus accumulating, the development of young soils will go on with forming of soils with properties close not to chernozems, as thought previously, but forest grey soils. Soils of technogenic landscapes of arid regions are characterized by more expressed xeromorphism in comparison with zonal soils. Under these conditions, the process of organic substance transformation is accompanied not by humification but mummification of organic residues. As a result, soil evolution on coal-mine dump surface only comes up to organo-accumulative, rarely peat, stage of soil-formation.

Acknowledgments: This work was supported by RFBR (13-04-90773 мол_рф_нр).

The article contains 5 fig., 1 table, 40 ref.

Keywords: man-caused landscapes; soil-forming processes; micromorphology; evolution of soils; embryozems; coal-mine dumps; zonal soils.

References

1. Potapov VP, Mazikin VP, Schastlivtsev EL, Vashlayeva NY. Geoekologiya ugledobyvayushchikh rayonov Kuzbassa [Geo-ecology of Kuzbass coal mining areas]. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch Publishing House; 2005. 660 p. In Russian
2. Androkhanov VA, Kurachev VM. Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie tekhnogennykh landshaftov: dinamika i otsenka [Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and evaluation]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House; 2010. 224 p. In Russian
3. Glushkov AN, Bondar GV, Mun SA, Larin SA, Brailovsky VV, Chukhrov YuS, Magarill YuA, Zinchuk SF, Grishchenko SV, Kuznetsova LN, Dmukhovskaya YeA, Nilsen NT. The incidence of lung cancer in coal-mining regions of Russia and Ukraine. *Health Care of the Russian Federation*. 2009;6:17-23. In Russian
4. Kostenkov NM, Purtova LN. General regularities of soil forming on debris and their humus state. *Krasnoyarsk State Agrarian University Journal.* 2009;5:37-40. In Russian
5. Komachkova IV. Soil ecological condition in the Southern Primorye technogenic landscapes. *Krasnoyarsk State Agrarian University Journal.* 2012;2:68-73. In Russian
6. Nazarkina AV, Krupskaya LT, Aref'eva OD, Derbentseva AM, Tregubova VG, Samchinskaya LP, Brovko PF, Kostenkov NM, Stepanova AI, Volobueva NG, Chernovalov AV. Tekh-

nogennaya transformatsiya svoystv pochv ugol'nykh i gornopromyshlennykh kompleksov [Technogenic transformation of soil properties of coal and metallurgical complexes]. Vladivostok: Far Eastern Federal University Publishing House; 2012. 143 p. In Russian
7. Chuprova VV, Shugalei LS. Characteristics of soils macro-morphogenesis on surface of the Nazarovskaya depression coal mines. *Krasnoyarsk State Agrarian University Journal.* 2007;1:61-70. In Russian
8. Babaev MV, Kurachenko NL. Soil microstructural organization in technogenic landcapes of the Nazarovskaya depression. *Krasnoyarsk State Agrarian University Journal.* 2011;7:66-72. In Russian
9. Lopatovskaya OG, Dvurechensky VG, Lazareva SD, Kiseleva ND. Soils of technogenic landscapes at Novonukutsky gypsum mine in Preangaria. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Biology. Ecology.* 2012;2:81-87. In Russian
10. Shugalei LS, Chuprova VV. Soil formation in the technogenic forest-steppe landscapes of the Nazarovskaya depression in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2012;3:246-256. doi: 10.1134/S1064229312030106
11. Ragim-Zade FK. Tekhnogennye elyuvii vskryshnykh porod ugol'nykh mestorozhdeniy Sibiri, otsenka ikh prigodnosti dlya vosstanovleniya pochvennogo pokrova [Technogenic residual rocks of overburden coal deposits in Siberia and assessment of their suitability for soil restoration] [CandSci Dissertation Abstract]. Novosibirsk: ISSA SB AS USSR; 1977. 22 p. In Russian
12. Kurachev VM, Androkhanov VA. Klassifikatsiya pochv tekhnogennykh landshaftov [Classification of technogenic landscapes soils. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal.* 2002;3:255-261. In Russian
13. Androkhanov VA. Spetsifika i genezis pochvennogo pokrova tekhnogennykh landshaftov [Characteristics and genesis of soil surface of technogenic landscapes]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal.* 2005;5:795-800. In Russian
14. Sokolov DA, Kulizskiy SP, Domozhakova EA, Gossen IN. Soil forming features under different environmental conditions in man-caused landscapes of South Siberia. *Tomsk State University Journal.* 2012;364:225-229. In Russian
15. Makhonina GI. Ekologicheskie aspekty pochvoobrazovaniya v tekhnogennykh ekosistemakh Urala [Environmental aspects of soil formation in technogenic ecosystems of the Urals]. Yekaterinburg: Ural University Publishing House; 2003, 356 p. In Russian
16. Solntseva NP, Gerasimova MI, Rubilina NE. Morfogeneticheskiy analiz tekhnogenno preobrazovannykh pochv. Pochvovedenie. Morphogenetic analysis of technologically transformed soils. *Soviet Soil Science.* 1990;8:124-129. In Russian
17. Abakumov EV, Gagarina EI. *Pochvoobrazovanie v posttekhnogennykh ekosistemakh kar'erov na Severo-Zapade Russkoy ravniny* [Soil formation in post-mining ecosystems on the North-West of the Russian plain]. Saint Petersburg: Publishing House of Saint Petersburg University; 2006. 208 p. In Russian
18. Pereverzev VN, Ivliev AI, Gorbunov AV, Lyapunov SM. Primary pedogenesis in the tailings of apatite-nepheline ores on the Kola Peninsula. *Eurasian Soil Science.* 2007;8:900-906. doi: 10.1134/S1064229307080133
19. Abakumov EV, Maksimova EI, Lagoda AV, Koptseva EM. Soil formation in the quarries for limestone and clay production in the Ukhta region. *Eurasian Soil Science.* 2011;4:380-385. doi: 10.1134/S1064229311040028
20. Gadzhiev IM, Kurachev VM. Ekologiya i rekul'tivatsiya tekhnogennykh landshaftov [Ecology and reclamation of technogenic landscapes]. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch Publishing House; 1992. 305 p. In Russian
21. Polevoy opredelitel' pochv Rossii [Russian soil field guide]. Ostrikova KT, editor. Moscow: Soil institute in name of VV Dokuchaev; 2008. 182 p. In Russian

22. Tursina TV, Morozova TD. Major stages of the development of soil micromorphology in Russia. *Eurasian Soil Science.* 2011;7:809-823. doi: 10.1134/S1064229311070143
23. Dobrovolsky GV, Shoba SA. Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya pochv [Raster electron microscopy of soils]. Moscow: Moscow University Publishing House; 1978. 144 p. In Russian
24. Sokolov DA. Geografo-geneticheskaya kontseptsiya kharakteristiki pochv otvalov kamennougol'nykh razrezov Sibiri [Geographic and genetic characteristics of the concept of soil dumps of coal mines of Siberia]. *Prirodno-tekhnogennye kompleksy: rekul'tivatsiya i ustoychivoe funktsionirovanie* [In: Natural and Technogenic Systems: Recultivation and Sustainability. Proc. of the International Conference]. Novosibirsk-Novokuznetsk: Izdatel'stvo Okarina; 2013. p. 173-178. In Russian
25. Semina IS, Belanov IP, Shipilova AM, Androkhanov VA. Prirodno-tekhnogennye kompleksy Kuzbassa: Svoystva i rezhimy funktsionirovaniya [Natural and industrial complexes of Kuzbass: Properties and modes of operation]. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch Publishing House; 2013. 396 p. In Russian
26. Gossen IN. Vodopronitsaemost' pochv na uchastkakh rekul'tivatsii razlichnogo napravleniya [Water permeability of soil on restoration areas of different kinds]. *Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' v Sibiri* [In: Recultivation of disturbed lands in Siberia]. Kupriyanov AN, editor. Kemerovo: Publishing House; 2009. p. 8-10. In Russian
27. Gerasimova MI, Gubin SV, Shoba SA. Mikromorfologiya pochv prirodnykh zon SSSR [Soil micromorphology on natural areas of the USSR]. Pushchino: ONTI PCS RAS; 1992. 214 p. In Russian
28. Volkovintser VI. O pochvoobrazovanii v stepnykh kotlovinakh yuga Sibiri [On soil formation in steppe depressions on the south of Siberia]. *Pochvovedenie.* 1969;8:3-11. In Russian
29. Kuminova AV. Rastitel'nyy pokrov Altaya [Vegetation cover of the Altai Mountains]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Academy of Sciences USSR Publishing House; 1960. 205 p. In Russian
30. Volkovintser VI. Stepnye krioaridnye pochvy [Steppe cryoarid soils]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publishing House; 1978. 208 p. In Russian
31. Gurkova EA. Pochvenno-geograficheskaya spetsifika Tsentral'no-Tuvinskoy kotloviny [Soil and geographical specifics of the Central Tuva depression] [CandSci Dissertation Abstract]. Novosibirsk: ISSA SB RAS Publishing House; 2009. 19 p. In Russian
32. Zaidel'man FR. Genezis i ekologicheskie osnovy melioratsii pochv i landshaftov [Genesis and ecological basis of soils and landscape modifications]. Moscow: KDU Publishing House; 2009. 720 p. In Russian
33. Androkhanov VA, Kulyapina ED, Kurachev VM. Pochvy tekhnogennykh landshaftov: genezis i evolyutsiya [Soils of technogenic landscapes: genesis and evolution]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing House; 2004. 151 p. In Russian
34. Zaidel'man FR. Podzolo- i gleeobrazovanie [Podzolization and gleyzation]. Moscow: Nauka Publishing House; 1974. 208 p. In Russian.
35. Kovalev RV, Korsunov VM, Shoba VN. Protsessy i produkty pochvoobrazovaniya v temnokhvoynykh lesakh [Processes and products of soil formations in dark coniferous forests]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publishing House; 1981. 121 p. In Russian
36. Shoba SA, Balabko PN. Mikrostroenie i sostav margantsevo-zhelezistykh novoobrazovaniy pochv lesnoy zony [Microstructure and composition of manganese and ferriferous concretions of forest soils]. *Mikromorfologiya, diagnostika pochv i pochvoobrazovatel'nykh protsessov* [In: Micromorphology, diagnostis of soils and soil formation processes]. Targulian VO, editor. Moscow: Nauka Publishing House; 1983. p. 21-33. In Russian
37. *Zaidel'man FR, Nikiforov AS.* Klassifikatsiya, svoystva i informatsionnoe znachenie margantsevo-zhelezistykh konkretsionnykh novoobrazovaniy [Classification, properties and

informative value of manganese and ferriferous concretions]. *Pamyat' pochv* [In: Memory soil: Soil as a Memory of Biosphere-Geosphere-Antroposphere Interactions]. Targulian VO, Goryachkin SV, editors. Moscow: Publishers LKI; 2008. p. 314-351. In Russian.

38. *Shoba VN.* Migratsiya akkumulyatsiya produktov pochvoobrazovaniya v dernovo-glubokopodzolistykh poverkhnostno-ogleenykh pochvakh Salaira [Migration and accumulation of soil formation products in sod and deeply podzolic surfaced gleyed soils of Salair] [Cand-Sci Dissertation Abstract]. Novosibirsk: ISSA SB AS USSR; 1978. 20 p. In Russian
39. *Kaurichev IS, Orlov DS.* Okislitel'no-vosstanovitel'nye protsessy i ikh rol' v genezise i plodorodii pochv [Redox processes and their role in genesis and fertility of soils]. Moscow: Kolos Publishing House; 1982. 247 p. In Russian
40. *Vodyanitsky YN.* Tyazhelye i sverkhtyazhelye metally i metalloidy v zagryaznennykh pochvakh [Heavy and extra-heavy metals and metalloids in contaminated soils]. Moscow: VV Dokuchaev Soil Science Institute; 2009. 184 p. In Russian

Received 12 February 2014;
Revised 15 July 2014;
Accepted 25 July 2014

Sokolov DA, Kulizskiy SP, Loyko SV, Domozhakova EA. Using electronic scanning microscopy for diagnostics of soil-forming processes on the surface of coal-mine dumps in Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;3(27):36-52. doi: 10.17223/19988591/27/3 In Russian, English summary.