

**ЭКОЛОГИЯ
ECOLOGY**

УДК 631.483+631.487

Ф. Н. Лисецкий

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, Россия
E-mail: liset@bsuedu.ru

**ПРЕДПОСЫЛКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ ВСКРЫШНЫХ
ПОРОД И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ САМОЗАРАСТАНИЯ
В ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ**

В регионе Курской магнитной аномалии при разработке железорудного сырья открытым способом в результате отвалообразования вскрышных пород формируется арена для самозараствания плодородных и потенциально плодородных пород четвертичного возраста. Группа полидисперсных и полиминеральных горных пород, и близких им техногенных грунтосмесей обладают плодородием, что отражается в довольно высоких скоростях формирования гумусового горизонта эмбриональных почв за первые три десятилетия ренатурации. Цель исследования состояла в определении совокупности свойств (содержания органического вещества, основных элементов питания, микроэлементов) в полидисперсных горных породах, которые в виде вскрышных пород и грунтосмесей, формируемых горнорудной промышленностью, создают литогенную основу для формирования эмбриональных почв. Первичное плодородие горных пород обусловлено наличием органического вещества (от 0,2 до 0,8 %), а при значительной карбонатности отличия различных типов почвообразующих пород более существенно определяются их обеспечением валовыми формами фосфора, чем калия. Аэротехногенный привнос материала за первые десятилетия благоприятствует накоплению эссенциальных элементов в процессе формирования эмбриональных почв. Понимание различий эдафотопов по эффективности сукцессий создаёт основу для корректировки сценариев ренатурации карьерно-отвальных геоконплексов путём подбора рекультивационных травосмесей, имеющих наибольшее эколого-биологическое соответствие эдафическим условиям.

Ключевые слова: ренатурация отвалов, почвообразование, эмбриональные почвы, геохимия пород, плодородие пород.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № FZWG-2023-0011.

Для цитирования: Лисецкий Ф. Н. Предпосылки потенциальной пригодности вскрышных пород и оценка эффективности их самозарастания в почвенно-геохимическом аспекте // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 112–129.

F. N. Lisetskii

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: liset@bsuedu.ru

PREREQUISITES FOR THE POTENTIAL SUITABILITY OF OVERBURDEN ROCKS AND ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THEIR SELF-OVERGROWING IN THE SOIL-GEOCHEMICAL ASPECT

In the Kursk Magnetic Anomaly region, during the development of iron ore deposits by open-pit mining, as a result of waste rock dumping, an arena for self-overgrowing of fertile and potentially fertile rocks of the Quaternary age is formed. A group of polydisperse and poly-mineral rocks and similar technogenic soil mixtures have fertility, which is reflected in the fairly high rates of formation of the humus horizon of embryonic soils during the first three decades of renaturation. The purpose of the study was to determine the set of properties (content of organic matter, basic nutritional elements, microelements) in polydisperse rocks, which in the form of waste rock and soil mixtures formed by the mining industry create a lithogenic basis for the formation of embryonic soils. The primary fertility of rocks is determined by the presence of organic matter (from 0.2 to 0.8 %), and with significant carbonate content, the differences between different types of soil-forming rocks are more significantly determined by their provision with gross forms of phosphorus than potassium. Aerotechnogenic input of material during the first decades favors the accumulation of essential elements in the process of formation of embryonic soils. Understanding the differences in edaphotopes by the efficiency of successions creates the basis for adjusting scenarios for the renaturation of quarry-dump geocomplexes by selecting reclamation grass mixtures that have the greatest ecological and biological correspondence to edaphic conditions.

Keywords: renaturation of mine waste dumps, soil formation, embryonic soils, rock geochemistry, rock fertility.

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2023-0011.

For citation: Lisetskii F. N. (2025), Prerequisites for the potential suitability of overburden rocks and assessment of the efficiency of their self-overgrowing in the soil-geochemical aspect, *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Pskov State University. Series “Natural and physical and mathematical sciences”], vol. 18, no. 2, pp. 112–129. (In Russ.).

Введение. Возрастающее внимание к феномену образования ренатурационных экосистем с автогенными процессами становления почвенно-растительного покрова обусловлен тем обстоятельством, что традиционные технологии горнотехнического и биологического этапов рекультивации нарушенных земель в техногенных ландшафтах довольно затратные и не всегда эффективны. При разработках месторождений полезных ископаемых наблюдается самовосстановление нарушенных земель в карьерно-отвальных геоконструкциях, что определяет исследовательский интерес с точки зрения решения экологических проблем, затрагивающих и смежные земельные участки вблизи отвалов пород [2; 3; 12; 33]. Обширный круг научных работ посвящён изучению формирования примитивных первичных почв при самозаращении промышленных отвалов в различных почвенно-климатических условиях [7; 11; 16; 25; 39; 40; 46].

На железорудных отвалах вегетативно подвижные и способные к семенному возобновлению виды древесных растений, используемые для озеленения техногенных ландшафтов, в благоприятных по эколого-эдафическим условиям микролокалитетах формируют разные по площади микросайты [19]. Оценки травянистых растительных группировок в лесостепных условиях самозаращения железорудных отвалов Курской магнитной аномалии (КМА) показали, что через 32–35 лет количество высших растений на 1 кв. м достигает от 15–16 до 26–43. Регенерация биоценозов в экотопах с благоприятным субстратом для поселения высших растений происходит ускоренными темпами, что определяет наиболее активную трансформацию минеральной части в зоне ризосферы. Поэтому максимальные скорости формирования гумусового горизонта почв (от 1,5–2 мм/год) отмечены при возрасте почв около 30 лет. При возрасте молодых геосистем от 35 до 50 лет и далее наступает этап устойчивого функционирования геосистемы, когда происходит стабилизация структуры и регенерационных процессов. Скорость воспроизводства почвы снижается, в фитоценозе происходит постепенная стабилизация видового состава, сокращается доля рудеральных видов. Натурные наблюдения эффективности процесса самозаращения промышленных отвалов, формирования автогенных сукцессий растительности позволяют оценить потенциал и эффективность этих процессов в целях формирования управляемых траекторий ренатурирования почвенно-растительного покрова на нарушенных землях. Биодиагностика эффективности автогенных сукцессий (по видовому разнообразию и продуктивности) может быть использована для корректировки фитомелиоративных технологий с целью повышения их адаптивности к конкретным эдафотопам техногенных ландшафтов.

Результатами изучения потенциального плодородия горных пород и грунтосмесей с полей рекультивации было установлено, что большинство из них благоприятные для растений по агрохимическим показателям [30]. Из всего многообразия пород и грунтосмесей вскрыши выделяют три основные группы: 1) потенциально плодородные; 2) малоплодородные; 3) фитотоксичные. Пригодными породами, на которых процессы самозаращения проходят достаточно эффективно, являются лёсс, лессовидные суглинки, красно-бурые суглинки, зеленовато-серые карбонатные глины, аллювиальные песчано-глинистые отложения [24].

Суммарная площадь нарушенных земель в Белгородской области, прежде всего за счёт разработки месторождений полезных ископаемых, по новым данным составляет 9151 га из-за разработки железорудных месторождения КМА (Лебединский и Стойленский ГОКи), а также общераспространенных полезных ископаемых на более чем 300 карьерах [23]. В карьерах КМА породы четвертичного возраста классифицируются в целях биологической рекультивации как пригодные плодородные (гумусированный слой почвы от 0,5 до 1 м) и пригодные потенциально плодородные (суглинок лессовидный (мощностью от 5 до 25 м), глины (мощностью до 10 м), линзы песка, торфа). Основными пороодообразующими минералами четвертичных пород выступают гидрослюды и каолинит. Процентное соотношение плодородных и потенциально плодородных пород в карьерах ЛГОКа и СГОКа составляет 10 и 6 % соответственно. При сложившейся к настоящему времени ситуации с темпами ежегодной рекультивации в зоне КМА для полной ликвидации экологического следа от нарушения литогенной основы ландшафтов необходимо порядка четырёх десятилетий. В этой связи постоянно формируется площади нарушенных земель под самозарастанием.

Цель исследования — раскрытие предпосылок формирования плодородия полидисперсных горных пород и их потенциальной пригодности в составе вскрышных пород для повышения эффективности эколого-реабилитационных мероприятий в техногенных ландшафтах.

Территориальный объект исследования. Сопряжённые по топографическому градиенту почвы (чернозёмы типичные тяжелосуглинистые, Белгородская область) трёх степеней эродированности сравнивали по 9 показателям физико-химических, агрохимических и агрофизических свойств материнских пород. В вертикальном профиле почво-грунтов различали подпочвенную породу (горизонт С), в которой нашли отражение специфические процессы педогенеза (чаще как материнскую породу), и залегающую ниже подстилающую породу (горизонт D). Помимо обобщённых данных по содержанию органического вещества (ОВ, %) в глубоких горизонтах почвенных профилей привлечены результаты оценок содержания валовых форм калия и фосфора у различных по карбонатности почвообразующих пород степной зоны. Для условий урбозкосистемы минеральная основа эмбриональной почвы была сепарирована в дистиллированной воде из почвенно-растительного покрова, сформированного на асфальтовом покрытии за 45 лет между тепловой электростанцией и оживлённой железной дорогой (промышленная зона центральной части города Белгорода). Фоновая почва выбрана на северном склоне горы Аю-Даг (Крым). До побережья Чёрного моря расстояние составляет 1 км и поэтому в бризовый период (апрель-сентябрь) возможна геохимическая миграция морских солей на сушу [41]. Как показано ранее [14], после заброса талассофильных элементов с морскими аэрозолями происходит их последующая аккумуляция в верхнем почвенно-растительном слое из-за его депонирующего потенциала. Минеральный слой молодой почвы сформирован за 3–3,5 века на диабазе, не затронутом выветриванием, под покровом бриофитов.

Основные методы исследования. Окраску почв (в сухом состоянии) определяли с использованием шкалы Манселла [43]. Определение органического углерода в почве проводили путём окисления ОВ раствором $K_2Cr_2O_7$ в серной кислоте до образования угольной кислоты. Концентрацию макроэлементов и микроэлементов в почвах и породах определяли методом измерения массовой доли металлов и оксидов в порошковых пробах с использованием метода рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре (*Spectroscan Max-GV*). При наличии недопустимых расхождений между результатами первой и второй повторности, они дополнялись последующими повторениями до достижения приемлемого результата.

Результаты исследования. До периода широкомасштабных исследований промышленных отвалов в техногенных ландшафтах с целью рекультивации земель (60–80 гг. XX в.) часто можно было встретить утверждение, что почва обладает уникальным атрибутивным свойством — плодородием, позволяющим через совокупность её свойств удовлетворять потребность растений. Прогресс в оценке потенциального плодородия вскрышных пород по результатам сравнения плодородия почв и пород [1; 6; 24 и др.] показал, что полидисперсные и полиминеральные горные породы и близкие им техногенные грунтосмеси имеют широкий диапазон в проявлении плодородия, но в первичных экотопах степень его реализации сопряжена с биологическими особенностями определённых типов растительности. Таким образом, помимо почв и горные породы обладают плодородием в результате длительного воздействия на них биосферных процессов, вследствие чего у них отмечается присутствие органических веществ, ископаемой флоры и фауны, а в некоторых случаях, — и погребённых почв, новообразований и иных признаков почвообразовательных процессов, обогативших породы биогенными питательными веществами [24]. Синлитогенное почвообразование затронуло рыхлые осадочные породы четвертичного, неогенового и палеогенового возрастов. В силу того, что на отвальных геоконплексах породы вскрыши представлены грунтосмесями, то целесообразно обратиться к ненарушенным породам четвертичного возраста, которые исследованы в обнажениях и разрезах, рассмотрев особенности их химического состава.

Почвообразовательный процесс под влиянием климатической изменчивости ритмически сопровождался погребением его результатов на протяжении 0,8 млн лет, а на глубине 27–28 м (по скважине в Одесской области) отмечается самый нижний ярус красно-бурой погребенной почвы [4, рис. 3]. Ритмика процессов аккумуляции пылеватых карбонатных четвертичных пород, которые вмещают многочисленные палеопочвы, отражает прерывистый субаэральный процесс, обусловленный общепланетарными климатическими колебаниями [5]. Разрез лёссовой толщи на VII террасе левого берега р. Днестр у с. Роксоланы показывает, что стратиграфически здесь можно определить 7 почвенных образований от верхнего дофиновского горизонта ($15820 \pm 880 \div 20190 \pm 1200$ ^{14}C , лет) с двумя ископаемыми почвами на глубине 3,6 м до мартоношского горизонта (800000 ± 87000 ^{14}C , лет) [31], а визуальнo в толще лёсса до 15–16 м видны пять тёмных горизонтов ископаемых почв (рис. 1). Причерноморский горизонт (на юге Северного Причерноморья мощностью от 0,3–0,5 м до 3–3,5 м), залегающий выше дофиновского, суммарно включает четыре ископаемые

почвы [32]. Верхнепричерноморский горизонт лёсса, датированный 13,0–10,3 тыс. л. н., соотносится с эпохой «финального позднего палеолита» [32, с. 8], при этом в ландшафте доминировала степная растительность ксерофитного облика с господством видов семейства маревых с участием злаков и полыни [4, с. 86]. Верхние слои причерноморского горизонта выступают материнской породой современных почв, а растительные остатки указанных видов, прежде всего, мортмасса корней, могли определять накопление в лёссе органического углерода.



Рис. 1. Разрез лёссовой толщи на VII террасе р. Днестр у с. Роксоланы (фото автора)

Так как в оценках секвестрации органического углерода (SOC) принято опираться только на содержание SOC в верхнем слое почвы (0–30 см), научный обзор [38], направленный на устранение недостатка обобщений о вкладе значительной части SOC, которая хранится в глубоких слоях (61–175 см), акцентирует внимание на решающем значении этого вклада в повышение точности оценок глобальных запасов углерода. В этой связи рассмотрим оценки органического вещества в породах, которые для биологической рекультивации классифицируются как потенциально плодородные. Ранее [28] при анализе шести разных типов вскрышных пород КМА (отвалы Лебединского, Стойленского и Михайловского ГОКа) был установлен диапазон содержания ОБ, который находился в границах от 0,10 до 0,44 %.

Среднее содержание ОВ у лёссовидных суглинков на глубинах от 1,3 до 3,0 составляет $0,76 \pm 0,39$ %, у лёссов на глубинах от 2 до 10 м — 0,4–0,5 % (табл. 1). Им уступают по содержанию ОВ красно-бурые глины (0,20–0,32 %). Красно-бурые суглинки и глины имеют ограничения потенциального плодородия, что объективно показывают величины их бонитета, определённого путём сравнения продуктивности люцерны синегибридной за 6 лет относительно эталона (лессовидного суглинка), 84 и 50 соответственно [24]. Уступают лёссовидным суглинкам по содержанию ОВ и другие виды пород: мело-мергели содержат 0,20 % [8], глины огнеупорные — 0,07 % [27].

Таблица 1

Содержание органического вещества (ОВ, %) в глубоких горизонтах почвенных профилей

Порода	Глубина, м	ОВ, %	Источник
Лёсс	2–2,5	0,50	[15]
Лёсс	10	0,43	[15]
Лёссовидный суглинок (частиц < 0,01 = 56,4 %), 10YR 6/4	1,3–1,4	0,50	[34, с. 34]
Лёссовидный суглинок (частиц < 0,01 = 59,4 %), 10YR 6/4	1,4–1,5	1,10	[34, с. 91]
Лёссовидный суглинок (частиц < 0,01 = 51,2 %), 10YR 6/4	1,55–1,65	0,80	[34, с. 21]
Лёссовидный суглинок	1–3	0,64–0,75	Автор
Лёссовидная глина (частиц < 0,01 = 73,6 %), 7.5YR 4/6	1,1–1,2	0,60	[34, с. 25]
Глина красно-бурая (частиц < 0,01 = 51,2 %), 7.5YR 4/4	1,3–1,4	0,20	[34, с. 58]
Глина красно-бурая верхнеплиоценовая и нижнеплейстоценовая	2,8	0,32	Автор
Древнеаллювиальные карбонатные отложения (частиц < 0,01 = 70,68 %), 10YR 7/3	1,4–1,5	0,70	[34, с. 37]

При формировании эмбриональных почв на отвалах вскрышных пород педогенез минует процесс первичного выветривания из-за того, что горные породы обладают стартовым уровнем плодородием при наличии ОВ, которое диагностируется не только его наличием, но и ряда эссенциальных (питательных) элементов для растений [22]. Проведённое ранее изучение продуктивности на нарушенных землях показало, что горные породы среднего и тяжёлого гранулометрического состава содержат в достаточных количествах макро- и микроэлементы (кроме азота и фосфора) [24].

Проанализированные шесть типов почвообразующих пород, представленных в степной зоне, которые по содержанию карбонатов отличаются до 4 раз, в большей мере различаются по содержанию валовых форм фосфора, чем калия (табл. 2).

Таблица 2

Обеспеченность валовыми формами калия и фосфора различных по карбонатности почвообразующих пород (ПП) степной зоны (n=33)

№ типа ПП*	CaO, %	K ₂ O, %	P ₂ O ₅ , %
1	12,78±0,84	1,61±0,07	0,21±0,04
2	9,94±1,82	1,61±0,27	0,14±0,03
3	38,93±0,94	0,88±0,06	0,26±0,08
4	24,34±0,98	1,19±0,04	0,16±0,01
5	25,16±1,35	1,48±0,12	0,35±0,06
6	22,04±5,43	1,29±0,08	0,16±0,01
Среднее	22,20	1,34	0,21
V, %	46	21	37

*1 — карбонатные светло-коричневые суглинки; 2 — карбонатные коричневые суглинки, подстилаемые известняками; 3 — коричневый и серый суглинистый элювий известняков; 4 — элювий известняков и глинистый элювий слабо-коричневого цвета; 5 — элювий известняков и карбонатные суглинки коричневого цвета; 6 — коричневатого- и красновато-жёлтый элювий известняков.

Трансформацию в результате почвообразовательного процесса элементов, указанных в таблице 2, отражают данные по профилю целинной дерново-карбонатной почвы на элювий известняков возрастом рубежа плиоцен-миоцена неогеновой системы (табл. 3). Результатом длительного выщелачивания карбонатов из горизонта А (Почва-1) стало уменьшение их содержания в 3,8 раз, при увеличении по сравнению с почвообразующей породой концентрации калия и фосфора в 4,1 и 4,8 раз соответственно. Примечательно, что подстилающие слои известняков (ниже 4 м) характеризуются некоторым обогащением в сравнении с вышележащим горизонтом С фосфором, но особенно калием. Молодая (со II в. н. э.) дерново-карбонатная почва на элювии плотных известняков (Почва-2) из-за наличия карбонатного геохимического барьера и её материнская порода незначительно отличаются по трём химическим элементам (оксидам). Тренды биогенного накопления фосфора и калия только начали проявляться.

Лессовидный суглинок (ЛС) как материнская порода менее карбонатная, чем элювий известняков, и в меньшей степени (на сопоставимых глубинах) обогащена фосфором. В горизонте А почвы 1800-летнего возраста при наличии карбонатного геохимического барьера наметился слабый тренд аккумуляции содержания валовых форм калия и фосфора по сравнению с материнской породой. Горные породы с высокой карбонатностью на больших глубинах (3–4 м) обеднены в сравнении с гумусово-аккумулятивным горизонтом почв валовыми формами фосфора (в 4,4 раза) и калия (в 2,5 раза). Лессовидный суглинок (на глубине 1,2 м) более обеспечен, чем сильнокарбонатные породы, как калием (в 2,8 раза), так и фосфором (в 1,2 раза).

Эрозионные катены позволяют установить закономерности регенерации гумусового горизонта, которые могут быть применены для управления процессами природного воспроизводства почв в антропогенно нарушенных геосистемах [10]. В данном исследовании привлечены результаты по опорным разрезам почв трёх степеней

эродированности на одной педотопокатене. Сравнение физико-химических свойств представлено для верхней и нижней части почвообразующей породы (лессовидного суглинка) тяжелосуглинистого гранулометрического состава (табл. 4).

Таблица 3

Распределение химических элементов профилю целинной (полноголоценовой) дерново-карбонатной почвы на элювии неогеновых известняков (Почва-1), молодой (со II в. н. э.) дерново-карбонатной почвы на элювии сарматских известняков (Почва-2)

Объект	Зона отбора, глубины	Цвет (сухой) по шкале Манселла		CaO, %	K ₂ O, %	P ₂ O ₅ , %
Почва-1 (Д-К)	Гор. А, 0–15 см	10 YR 3/3	тёмно-коричневый	9,94	1,53	0,81
Порода	Гор. D, с 2,8 м	10 YR 8/2	белый	37,63	0,37	0,17
Порода	Гор. D, с 4 м	10 YR 8/1	белый	37,55	0,88	0,25
Почва-2 (Д-К)	Гор. А, 0–21 см	10 YR 6/3	слабо-коричневый	23,85	1,59	1,04
Материнская порода	Гор. С, с 0,9 м	10 YR 6/2,5	светло-коричневый	25,31	1,46	0,94
Материнская порода	Гор. С (ЛС), с 1,2 м	10 YR 5/4	желтовато-коричневый	13,68	1,72	0,26

Основные макроэлементы минерального питания растений (N, P, K) в почве по своему соотношению подчиняются закону ограничивающего (лимитирующего) фактора (закону минимума Либиха), т. е. недостаток определённого макроэлемента нельзя компенсировать за счёт другого, с повышенным содержанием. В том, что касается классификации пригодности вскрышных горных пород для биологической рекультивации, то амплитуда частичной компенсации ограничивающих факторов другими является более узкой, чем в зональных породах, а в числе четырёх агрохимических групп по степени пригодности выделяют отдельную группу — «потенциально плодородные, пригодные для биологической рекультивации, но бедные азотом» [30]. Как показывают обобщённые данные по почвам заповедных территорий [34], в гор. С на глубинах 1,20–1,65 м содержание общего азота составляет от 0,03 до 0,05 %, а легкогидролизуемого азота по Корнфилду от 39 до 55 мг/кг. Эти величины в среднем уступают содержанию в горизонте А в 10,5 и 6,2 раз соответственно.

Эрозионная абразия чернозёмов в её предельном выражении, которую относят к кризисному уровню эродированности (< 2 % ОВ), характеризуется утратой наиболее трудно восполняемого почвенного ресурса — инертного гумуса [18]. У эродированных почв нижняя часть гор. С характеризуется содержанием ОВ на уровне 0,3–0,5 %, при этом при существенном снижении по сравнению с верхними слоями гор. С суммы поглощённых оснований и легкогидролизуемого азота, величины снижения содержания подвижного фосфора и обменного калия не так существенны (см. табл. 4). Используя принятые в агрохимии градации по обеспеченности почв подвиж-

ными формами N, P₂O₅, K₂O (мг/100 г), очень низкая (при pH 5–6 и более) обеспеченность легкогидролизуемым азотом составляет <3, обеспеченность подвижным фосфором (при вытяжке Мачигина) <1, обеспеченность обменным калием — от 0 до 5. На примере лёссовидных суглинков, отобранных из горизонта С лесостепных чернозёмов разной степени эродированности, можно сделать вывод, что в гор. С критически недостаточна обеспеченность породы легкогидролизуемым азотом (при среднем его содержании 1,5 мг/100 г). Обеспеченность подвижным фосфором оценивается как средняя (при среднем его содержании 2,4 мг/100 г), а обеспеченность обменным калием низкая (при среднем содержании 6,9 мг/100 г).

Процессы ренатурации, которые отмечаются на нерекультивированных землях в результате формирования почвенно-растительного покрова на вскрышных породах, предотвращают пыление отвалов и техногенное загрязнение смежных угодий. Ещё в 1940 г. Б. Б. Полюнов обратил внимание на необходимость сосредоточения на «конкретных проявлениях первых стадий почвообразования на скалах, покрытых лишайниками и мхами» [29, с. 328]. Результатами изучения начального почвообразования на отвалах в сухих степях было установлено, что в результате природных педогенных процессов за 20–30 лет образуются биогенные корки толщиной около 3 см с характерным наличием живых корней трав и мхов, которые способны защитить отвальный материал от дефляции и водной эрозии [35]. Ранее предполагали, что биологические корки, обычно состоящие из цианобактерий, лишайников и мхов, ускоряют денудацию, но исследования на Великой Китайской стене показали, что, покрытые биокоркой участки снижали эрозионную способность за счёт прочно связанных полимеров на 2–48 % [36]. Результатами изучения процесса образования почвоподобных тел на породах *in situ* в современных экстремальных условиях Восточной Антарктиды, как одной из лучших доступных природных моделей для изучения органо-минеральных взаимодействий «филогенетического возраста» (от цианобактерий, грибов и лишайников к минералам), было установлено, что относительно простые эндолитические системы микробного и / или криптогамного происхождения используют принципы стабилизации ОВ, поразительно сходные наблюдаемым в современном педогенезе [42].

Согласно Классификации почв России (2004), выделяется отдел слаборазвитых почв, со слабым проявлением педогенных процессов и лишённые генетических горизонтов, но имеющие отличительные признаки в верхней части породы. Эмбриональные почвы, представленные на рисунке 2, сформированы без материнских пород, а их минеральная матрица, это незначительное участие результатов выветривания плотных пород или определённый вклад техногенных субстратов. Отдельный источник — это аэрозоли различного генезиса. В результате самозаращения нарушенных земель в техногенных ландшафтах происходит формирование специфического почвенного покрова, для которого предложено выделять основные типы молодых почв — эмбриоземов: инициальные, органоаккумулятивные и дерновые [13]. Объекты, которые при наличии растительного покрова из низших растений формируют минеральную матрицу преимущественно в результате биогеохимической трансформации мортмассы и аэрального привноса вещества, могут быть отнесены к инициальным эмбриоземам, морфологической особенностью которого служит отсутствие (либо примитивность) профиля [13].

Физико-химические, агрохимические и агрофизические свойства материнских пород у лесостепных чернозёмов тяжелосуглинистых на лёссовидном суглинке

Таблица 4

Почвенные горизонты, глубина отбора образцов, см	ОВ, %	Р _{Нкол.}	мг/экв на 100 г				мг/100 г				Физическая глина, частицы < 0,01 мм
			сумма поглощённых оснований	в г. ч.		подвижный Р	обменный К	легкогидролизуемый N			
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺						
Чернозём типичный слабосуглинистый на лёссовидном суглинке											
Ск 73–108 (80–90)	1,2	7,2	25,3	22,3	3,0	2,8	8,3	2,2	58,3		
Сж 108–160 (130–140)	0,3	7,3	17,3	15,0	2,3	2,2	6,1	1,0	61,7		
Чернозём типичный среднесуглинистый на лёссовидном суглинке											
Ск 48–83 (55–65)	1,4	7,3	23,2	20,6	2,6	2,5	7,3	2,0	55,1		
Сж 83–150 (110–120)	0,4	7,4	16,3	14,3	2,0	2,0	6,4	0,6	60,3		
Чернозём типичный карбонатный сильносуглинистый на лёссовидном суглинке											
Ск 25–58 (30–40)	1,3	7,3	24,7	21,4	3,3	2,8	7,7	2,2	54,5		
Сж 58–160 (80–90)	0,5	7,5	18,1	15,9	2,2	2,1	5,3	0,8	56,3		

Для понимания указанных выше феноменов важен анализ вещественного состава педогенных масс, формируемых при инициальном почвообразовании той или иной длительности. Вещественный состав эмбриональных почв (без участия продуктов выветривания пород) формируется при участии глобальных и промышленных аэрозолей, а также продуктов разложения низших растений (мхов и лишайников). Например, минеральная часть почвы, которая сформировалась на асфальте за 45 лет в промышленной зоне города (рис. 2, В), позволила оценить среднегодовую скорость педогенеза без участия материнской породы в 0,49 т/га. Решающую роль в формировании почвоподобного субстрата имел мох дикранум (*Dicranum*), который сформировал на асфальте с песчаной фракцией покров в 10–12 мм толщиной, а его масса составила 4,13 т/га.

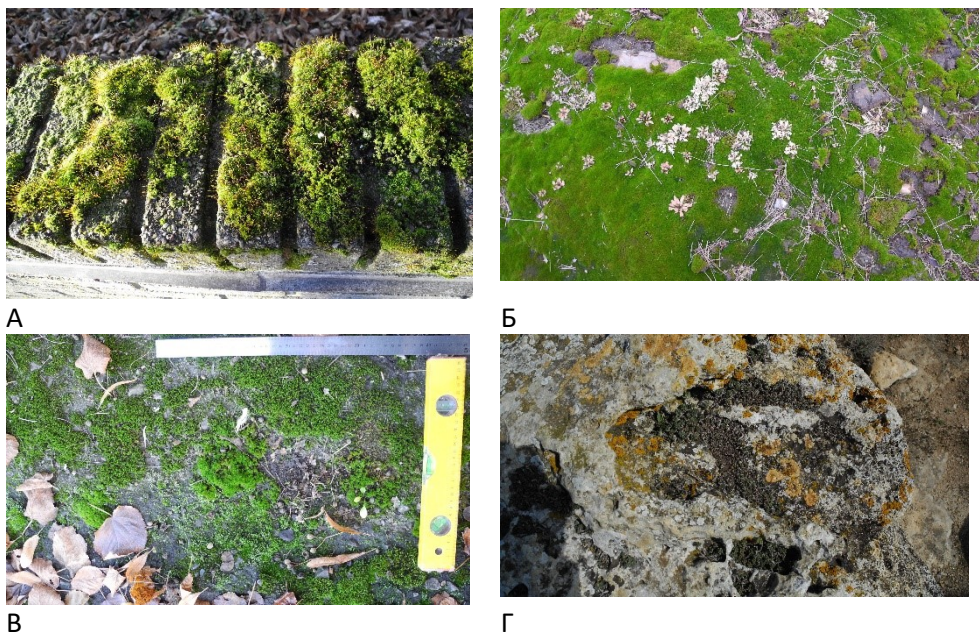


Рис. 2. Примеры биологической колонизации каменных (асфальто-бетонных) поверхностей и формирования эмбриональных почв в различных климатических условиях (годовых сумм осадков (P)): А — зона широколиственных лесов (г. Орхус, Дания, P = 720 мм в год); Б — зона лесостепи (г. Белгород, P = 550 мм в год; на щебне); В — там же (на асфальте); Г — низкогорный субсредиземноморский район (ЮВ Крым, округа Херсонеса, известняковая ограда античного надела № 133, P = 380 мм в год)

В техногенных геоэкосистемах почвы проходят стадию внутреннего развития (эмбриогенеза), когда медленно накапливаемые количественные изменения всё ещё не перешли в качественные, заметные в морфологическом облике почв (помимо формирования дернинного горизонта и маломощного горизонта А) [26]. В первые десятилетия на отвалах техногенных ландшафтов формируются молодые почвы, которые

в процессе саморазвития находятся на динамичной стадии гумусонакопления, и поэтому могут быть названы органо-аккумулятивными литостратами [17]. Многолетние исследования скорости формирования почв на отвалах вскрышных пород в условиях лесостепи и степи показывает, что за время самозаращения отвалов от 10 до 33 лет формируется от 25 до 70 мм гумусового горизонта (в среднем $48,3 \pm 6,4$ мм) при средней скорости формирования $2,5 \pm 0,6$ мм/год. Ранее [21], используя выборку обобщённых педохронологических данных, была получена зависимость скорости формирования гумусового горизонта чернозёмных почв на породах суглинистого состава (V , мм/год) от времени (T , годы): $V = 6/(t+1)^{0,4}$. Эта зависимость, отражающая развёрнутую во времени закономерность изменения ускорения процесса формирования гумусового горизонта в биоклиматических условиях чернозёмообразования на полидисперсных горных породах, показывает, что при увеличении длительности педогенеза от 50 к 60 годам скорость формирования гумусового горизонта почв резко уменьшается. Это обусловлено тем, что процесс гумусонакопления вступает в равновесие с факторами педогенеза раньше, чем другие горизонтообразующие процессы (состав почвенного поглощающего комплекса, минералогический состав и др.) [20].

Обзор оценок среднегодового поступления вещества внеземной природы в атмосферу Земли, полученных разными методами [45] показал разброс величин (в килотоннах в год) от $2,0 \pm 0,6$ (измерение лидаром) до 10 ± 2 (результаты исследования гренландского льда). Считается [9], что на долю континентальных аэрозолей приходится не более 40 % от суммы минеральных выпадений из атмосферы ($1,0 \pm 0,1$ т/(год·км²), а в поступлении космической пыли значима роль «летучих» микроэлементов, которыми в пределах 1–2 порядков обогащены почвы в сравнении с породами земной коры, а наземные растения обогащены теми же микроэлементами, по сравнению с почвами уже на несколько порядков. В городах и промышленных зонах к природным источникам загрязнения воздуха добавляются выхлопные газы автотранспортных средств, в результате сжигания ископаемого топлива производственные выбросы, в т. ч. сажа (тонкодисперсные частицы углерода), различные углеводороды, соединения свинца и других тяжёлых металлов [44]. Атмосферные аэрозоли содержат как следовые металлы, такие, к примеру, как U, Mg, Li, Ca, Sr, As, антропогенные элементы (в их числе: Sb, Cu, Pb, Se), питательные вещества и биологический материал [37].

Если средняя величина коэффициентов превышений содержания 22 макро- и микроэлементов в 45-летней почве в промышленной зоне города над фоновой почвой с длительным педогенезом (рис. 3) составила 2,44, то для семи «летучих» элементов (K, Cr, Cu, Zn, As, Rb, Pb) она меньше (1,57), что связано с более медленными темпами поступления из источников внеземной природы, по сравнению с техногенной пылью.

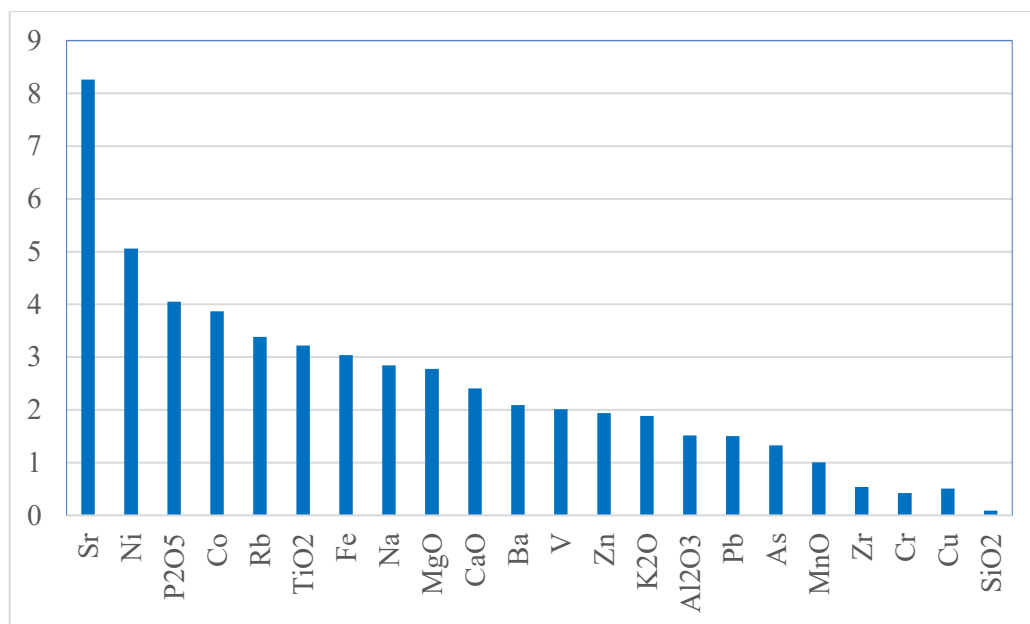


Рис. 3. Коэффициенты превышения концентрации химических элементов в эмбриональной почве промышленной зоны города (см. рис. 2, В) по сравнению с эмбриональной почвой фоновой территории (ООПТ)

Важно отметить, что более концентрированный в геохимическом отношении воздушный бассейн урбозкосистем может стимулировать почвообразование, т. к. по совокупности ряда необходимых питательных элементов для растений (К, Mg, Ca, P, Mn, Fe, Ni, Zn) средняя величина тех коэффициентов превышений содержания над фоном, которые были $>1,0$, составила 1,94. Таким образом, аэротехногенный привнос материала за первые десятилетия (до достижения уровней предельно допустимых концентраций загрязнителей) способствует накоплению эссенциальных элементов в процессе формирования эмбриональных почв.

Выводы. В основных карьерах Курской магнитной аномалии (Лебединский и Стойленский ГОКи) от 6 до 10 % от объёма (при мощности в карьерах до 25 м) занимают породы четвертичного возраста, которые в целях биологической рекультивации классифицируются как пригодные плодородные и потенциально плодородные. Полидисперсные и полиминеральные горные породы и близкие им техногенные грунты обладают плодородием, поэтому ренатурация отвалов проходит достаточно эффективно, особенно на лёссах, лёссовидных и красно-бурых суглинках. Лёссы и лёссовидные суглинки на глубинах от 1,3 до 10 м содержат от 0,4 до 0,8 % органического вещества, тогда как его содержание у красно-бурых глин меньше (0,2–0,3 %). Сопоставление шести типов почвообразующих пород степной зоны, которые при разной карбонатности (диапазон варьирования содержания карбонатов кальция составляет от 19 до 58 % при средней величине 35 %), показало, что их отличия более значительно определяются обеспеченностью валовыми формами фосфора, чем калия.

Скорость формирования гумусового горизонта эмбриональных почв в первые три десятилетия ренатурации может достигать 6 мм/год при средней величине 2,5 мм/год, что обусловлено различиями почвообразовательной эффективности автогенных сукцессий в мозаике эдафотопов, присущих техногенным ландшафтам. Скорость накопления в эмбриональной почве промышленной зоны города химических элементов в целом выше в 1,6 раз, чем поступление вещества внеземной природы в атмосферу Земли за счёт семи «летучих» элементов (K, Cr, Cu, Zn, As, Rb, Pb). В промышленной зоне урбоэкосистем формирование инициальных эмбриоземов возрастом до полувека стимулируется аэротехногенным поступлением ансамбля питательных элементов для растений (K, Mg, Ca, P, Mn, Fe, Ni, Zn).

Литература

1. Адерихин П. Г., Усков Б. В., Дудкин Ю. И., Брехов М. Т. Потенциальное плодородие вскрышных пород КМА. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1977. 224 с.
2. Альберг Н. И. Самовосстановление нарушенных при горных разработках территорий // Вестник ВСГУ. 2011. № 1 (32). С. 172–175.
3. Андроханов В. А., Богуславский А. Е., Соколов Д. А. [и др.] Почвенно-экологическая оценка рекультивации отвалов угольных месторождений // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31. № 1. С. 1–12.
4. Артюшенко А. Т., Пашкевич Г. А., Карева Е. В. Развитие растительности юга Украины в антропогене по данным спорово-пыльцевого анализа // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1972. № 39. С. 82–89.
5. Астахов В. И., Пестова Л. Е., Шкатова В. К. Лёссовиды Российской Федерации: распространение и возраст // Региональная геология и металлогения. 2021. № 87. С. 42–60.
6. Бекаревич Н. Е., Масюк Н. Т., Сидорович Л. П. К вопросу о плодородии почв и пород // Освоение нарушенных земель. М.: Наука, 1976. С. 5–26.
7. Бурыкин А. М. Почвообразование на отвалах вскрышных пород // Земледелие. 1990. № 8. С. 28–30.
8. Бурыкин А. М. Темпы эрозии почв в естественных и техногенных ландшафтах // Почвоведение. 1986. № 12. С. 80–89.
9. Голенецкий С. П., Жигаловская Т. Н., Голенецкая С. И. Роль атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава почв и растений // Почвоведение. 1981. №. 2. С. 41–48.
10. Голёусов П. В., Малышев А. В. Воспроизводство профиля чернозёма при различной степени нарушения военными действиями // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 3. С. 463–472.
11. Гуртовая В. Н., Шоба С. А. Особенности почвообразования на карбонатных суглинках при рекультивации отвалов // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. 1978. № 3. С. 125–131.
12. Данилов Р. А., Черданцева Е. С. Исследование почвенно-экологического аспекта отвалов // Научно-исследовательские публикации. 2016. № 2 (34). С. 155157.

13. Двуреченский В. Г., Соколов Д. А., Середина В. П. Качественная оценка почв техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2018. Т. 48. № 3. С. 53–61.
14. Добровольский В. В. Геохимическое земледование. М.: Владос, 2008. 207 с.
15. Етеревская Л. В., Мамонтова Е. Г. Качественный состав гумуса и микроморфология примитивных почв на лессовых отвалах // Рекультивация земель. Тарту, 1975. С. 250–257.
16. Келеберда Т. Н. Почвообразование на промышленных отвалах под лесной растительностью // Почвоведение. 1978. № 9. С. 109–115.
17. Киселева И. В. Особенности формирования почвенного и растительного покрова при самозарастании и рекультивации техногенных ландшафтов юга Дальнего Востока России // Владивосток: ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, 2023. 106 с.
18. Козут Б. М. Оценка уровней эродированности черноземов по относительной степени их гумусированности // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2015. № 78. С. 59–69.
19. Коришков И. И., Мазур А. Е., Красноштан О. В., Лаптева Е. В., Заричнюк В. В. Устойчивость и жизненные формы древесных растений на железорудных отвалах Криворожья // Відновлення порушених природних екосистем: мат-ли Тр. міжнар. конф., Донецьк, 7–9 жовтня 2008 р. Донецьк: ТОВ Цифрова типографія, 2008. С. 267–273.
20. Лисецкий Ф. Н. Воспроизводство почв в степных экосистемах разного возраста // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 19. № 6. С. 819–829.
21. Лисецкий Ф. Н. Скорость образования гумусового горизонта черноземных почв и установление допустимой нормы смыва // Черноземы Молдавии и их рациональное использование. Тезисы докладов научной конференции (6 июня 1983 г.), Кишинёв, 06 июня 1983 г. Кишинев: Молдавский НИИ почвоведения и агрохимии имени Н. А. Димо, 1983. С. 128.
22. Лисецкий Ф. Н. Углерододепонирующий потенциал эмбриональных почв на вскрышных породах Старооскольского железорудного района // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 2. С. 59–77.
23. Мануйлов А. А., Голусов П. В. Технология ренатурирования техногенно нарушенных геосистем на примере меловых карьерно-отвальных геоконплексов // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47. № 2. С. 316–326.
24. Масюк Н. Т. Экология нарушенных горных пород: состав, свойства, ресурсы, классификация // Проблемы охраны, рационального использования и рекультивации чернозёмов. М.: Наука, 1989. С. 113–132.
25. Махонина Г. И. Скорость гумусонакопления на самозарастающих отвалах Урала // Растения и промышленная среда. Свердловск, 1990. С. 22–33.
26. Махонина Г. И. Экологические аспекты почвообразования техногенных экосистем Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2003. 356 с.

27. Махонина Г. И., Чибрик Т. С. Естественное восстановление и вопросы рекультивации отвалов месторождений огнеупорных глин Южного Урала // Рекультивация земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых: Тез. докл. координ. совещ. Тарту, 1975. С. 158–163.
28. Пигорев И. Я., Буланова Ж. А. Агрохимические свойства вскрышных пород, как условие почвообразовательного процесса и рекультивации КМА // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Лесниково, 18 мая 2017 го. Лесниково: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т. С. Мальцева, 2017. С. 111–114.
29. Полюнов Б. Б. Первые стадии почвообразования на массивно-кристаллических породах // Почвоведение. 1945. № 7. С. 327–339.
30. Попов В. М., Рагим-Заде Ф. К., Трофимов С. С. Классификация вскрышных пород Кузбасса по пригодности для биологической рекультивации // Рекультивация в Сибири и на Урале. Новосибирск: Наука, 1970. С. 25–41.
31. Путеводитель экскурсий А–7, С–7. Молдавия и Одесская область. XI конгресс по изучению четвертичного периода. М.: ВИНТИ, 1982. 46 с.
32. Сапожников И. В. Хроностратиграфическое обоснование для общей и региональных периодизаций позднего палеолита Евразии // Археология, этнография и антропология Евразии. 2004. № 3. С. 2–11.
33. Снытко В. А., Нефедьева Л. Г., Дубынина С. С. Тенденции восстановления нарушенных земель // География и природные ресурсы. 1988. № 1. С. 56–61.
34. Соловиченко В. Д., Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Голузов П. В. Красная книга почв Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. 138 с.
35. Belobrov V. P., Lebedeva M., Abrosimov K. N., Grebennikov A. M., Torochkov E. L., Ryashko A. I. Microdiagnostics of initial pedogenesis on a phosphogypsum dump // Spanish Journal of Soil Science: SJSS. 2018. No. 8 (2). P. 183–193.
36. Cao Y., Bowker M. A., Delgado-Baquerizo M., Xiao B. Biocrusts protect the Great Wall of China from erosion // Science Advances. 2023. No. 9 (49). eadk5892.
37. Dastrup D. B., Carling G. T., Collins S. A., Nelson S. T., Fernandez D. P., Tingey D. G., Aanderud Z. T. Aeolian dust chemistry and bacterial communities in snow are unique to airshed locations across northern Utah, USA // Atmospheric environment. 2018. Vol. 193. P. 251–261.
38. Dubeux Jr, J. C., Lira Junior M. D. A., Simili F. F., Bretas I. L., Trumpp K. R., Bizzuti B. E., Garcia L., Oduor K. T., L. Queiroz M. D., Acuña J. P., Mendes C. T. Deep soil organic carbon: A review // CABI Reviews. 2024. No. 19 (1). DOI: 10.1079/cabi-reviews.2024.0024.
39. Feng Y., Wang J., Bai Z., Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review // Earth-Science Reviews. 2019. No. 191. P. 12–25.
40. Fettweis U., Bens O., Hüttel R. F. Accumulation and properties of soil organic carbon at reclaimed sites in the Lusatian lignite mining district afforested with Pinus sp. // Geoderma. 2005. No. 129 (1–2). P. 81–91.
41. Lisetskii F. Biogeochemical features of soil formation without parent rock in natural conditions and in an urban environment // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. 1010. 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012018.

42. Mergelov N., Mueller C. W., Prater I., Shorkunov I., Dolgikh A., Zazovskaya E., Shishkov V., Krupskaya V., Abrosimov K., Cherkinsky A., Goryachkin S. Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth // Scientific Reports. 2018. No. 8 (1). P. 3367.

43. Munsell A. H. Munsell soil color charts. New Windsor, N. Y.: Gretag Macbeth, 2000.

44. Nasyrov I. A., Mavrin G. V., Miftahov M. N. Air pollution investigation by organic compounds in the city // Eurasia J Biosci. 2018. No. 12. P. 297–301.

45. Ogurtsov M. G., Raspopov O. M. Possible impact of interplanetary and interstellar dust fluxes on the Earth's climate // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. No. 51 (2). P. 275–283.

46. Rumpel C., Skjemstad J. O., Knicker H., Kögel-Knabner I., Hüttl R. F. Techniques for the differentiation of carbon types present in lignite-rich mine soils // Organic geochemistry. 2000. No. 31 (6). P. 543–551.

Сведения об авторе

Лисецкий Федор Николаевич — доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра, Институт наук о Земле, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия.

E-mail: liset@bsuedu.ru

About the authors

Prof. **Fedor Lisetskii**, Department of Nature Management and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia.

E-mail: liset@bsuedu.ru

Поступила в редакцию 14.04.2025 г.

Поступила после доработки 19.05.2025 г.

Статья принята к публикации 21.05.2025 г.

Received 14.04.2025.

Received in revised form 19.05.2025.

Accepted 21.05.2025.