



УДК 631.48:551.72(553.31)

DOI: 10.19110/geov.2023.11.2

Палеопочвы кровли протерозойского фундамента территории Курской магнитной аномалии

Т. В. Алексеева¹, А. П. Любарова², А. О. Алексеев¹

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино
alekseeva@issp.serpukhov.su

² Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург

Данная работа посвящена мультидисциплинарному исследованию палеопочв, развитых в кровле докембрийского фундамента в районе г. Старый Оскол (Белгородская область). Маломощные палеопочвы сформированы на коре выветривания (КВ) железистых сланцев и диагенетически преобразованной КВ железистых кварцитов, что стало причиной их сидеритизации. Обе породы пиритизированы. В районе проведения работ (карьер Стойленского ГОКа) КВ имеет додевонский возраст. Палеопочвы сформированы под одинаковой литофитной примитивной бескорневой растительностью. Изученные палеопочвы отнесены к инситу, биотичным, литоэкстремальным. В качестве триггера для их развития выступала пиритизация почвообразующих пород. Как следствие, процессы химического преобразования преобладали над физическими. Обе палеопочвы отнесены к кислым сульфатным. Они не формировали сплошного почвенного покрова, который охарактеризован как пятнистый. Изученная ранее на данной территории палеопочва, образованная на КВ железистых кварцитов, имеет такой же генезис. Видится, что в прошлые геологические эпохи почвы этого типа имели широкое распространение.

Ключевые слова: кора выветривания, сульфиды, сульфатно-кислые палеопочвы, бертьерин, гипс, железосодержащие минералы.

Paleosols of the Proterozoic basement roof of the Kursk magnetic anomaly area

T. V. Alekseeva¹, A. P. Lubarova², A. O. Alekseev¹

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS, Pushchino

² Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg

This work represents the results of multidisciplinary study of paleosols from the weathered roof of Precambrian basement (Stary Oskol, Belgorod region). Shallow paleosols were developed from ferruginous shale and diagenetically modified weathering crust of ferruginous quartzite which led to its sideritization. At the studied location (quarry of the Stoilensky mining and processing plant) the age of weathering crust is pre-Devonian. Both rocks contain pyrite. Paleosols developed under similar primitive lithophytic vegetation. The studied paleosols are identified as in situ, biotic, of extreme pedogenesis. The trigger for their development was the pyritization. As a result, the chemical weathering prevailed under physical and biological ones. Both soils were attributed to acid-sulfate. Paleosols have not developed the continuous cover. The paleosols previously discovered in this area were developed from ferruginous quartzite and are also attributed to the acid-sulfate type. It seems that this soil type was widely distributed in the past.

Keywords: weathering crust, sulfides, acid-sulfate paleosol, berthierine, gypsum, Fe-minerals.

Введение

Ископаемые почвы (палеопочвы) маркируют стратиграфические несогласия и являются важнейшими палеоархивами, сохраняющими информацию о континентальных этапах развития территории. Будучи биокосным телом, палеопочвы, как и современные почвы, — это сложные для изучения природные объекты, еще более усложненные «вуалью времени»; они требуют комплексного и во многом индивидуального подхода к изучению и пониманию условий и процессов их формирования.

Данная работа посвящена мультидисциплинарному исследованию двух профилей палеопочв, обнаруженных в ходе полевых работ 2021 г. на территории Стойленского ГОКа (Старый Оскол, Белгородская обл.) в кровле докембрийского фундамента (СШ — 51° 15'; ВД — 37° 44') (рис. 1). Палеопочвы характеризуются очень хорошей сохранностью. Они развиты на коре выветривания (КВ) железистых сланцев и диагенетически преобразованной КВ железистых кварцитов, приведшей к их сидеритизации. В районе проведения работ КВ имеет додевонский возраст (Савко, 2002).

Для цитирования: Алексеева Т. В., Любарова А. П., Алексеев А. О. Палеопочвы кровли протерозойского фундамента территории Курской магнитной аномалии // Вестник геонаук. 2023. 11(347). С. 18–25. DOI: 10.19110/geov.2023.11.2

For citation: Alekseeva T. V., Lubarova A. P., Alekseev A. O. Paleosols of the Proterozoic basement roof of the Kursk magnetic anomaly area. Vestnik of Geosciences, 2023, 11(347), pp. 18–25, doi: 10.19110/geov.2023.11.2

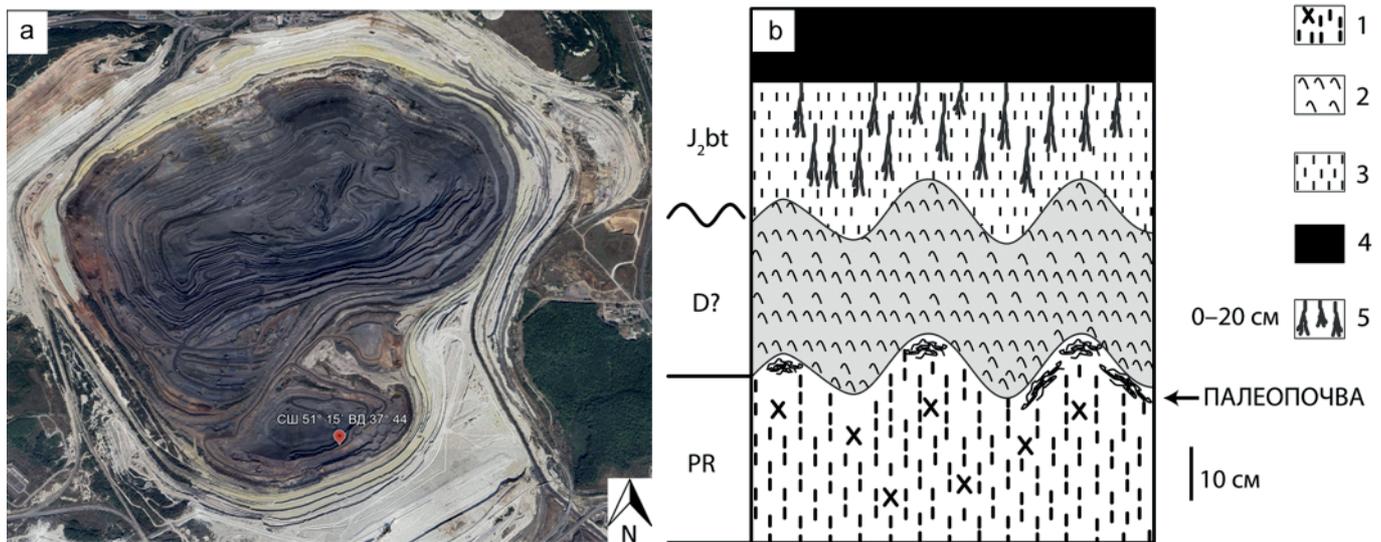


Рис. 1. Схема карьера с обозначением объектов исследования (а); схематическая колонка разреза (b): 1 — породы фундамента; 2 — оглиненные породы; 3 — пески; 4 — углисто-глинистые породы; 5 — густая сеть корневых вертикальных образований

Fig. 1. The scheme of quarry with paleosols location (a); schematic stratigraphic column (b): 1 — rocks of Proterozoic basement; 2 — mudstone; 3 — sand; 4 — organic-rich mudstone; 5 — dense network of vertically oriented rhizoliths

Ее диагенетические преобразования начались в первой половине позднедевонского времени (Меркушова, Никулин, 2015; Савко, 2002). КВ перекрывается породами осадочного чехла, образованного отложениями девона, юры, мела и плейстоцена/голоцена.

Работа является продолжением исследований обнаруженной в этом карьере ранее в непосредственной близости палеопочвы, сформированной на КВ железистых кварцитов (Алексеева и др., 2021). Было показано, что изученная палеопочва является аналогом современной кислой сульфатной почвы.

Методы исследования

Минеральный состав валовых образцов палеопочв был изучен методом рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-3, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, Ni-фильтр, шаг сканирования 0.1° , время сканирования 10 с). Элементный состав образцов изучали рентген-флюоресцентным методом (Bruker Jaguar, Германия). Магнитную восприимчивость определяли на приборе KLY-2 Kappabridge (Чехословакия). Структурное состояние железа исследовали методом мессбауэровской спектроскопии (MS-1104 Em-спектрометр, источник $60 \text{ mCi } ^{57}\text{Co}$ в матрице Cr, Россия). Спектры получены при комнатной температуре (270K) и температуре жидкого азота (80K). Субмикроскопическое исследование морфологии минеральных зерен проводили методом сканирующей электронной микроскопии с микрозондом (SEM-EDX Tescan Vega 3, Чехия). Изучение строения растительных тканей проводилось методом оптической микроскопии в шлифах и методом СЭМ. Состав стабильных изотопов С растительных остатков изучен масс-спектрометрически (Thermo Scientific Delta V Isotope Ratio Mass Spectrometer, США). Цветовые индексы даны по шкале Манселла.

Для оценки степени преобразованности материала под воздействием выветривания и почвообразо-

вания использовали отношения химических элементов (геохимические индексы):

Al/Ti ;

$\text{MIA} = \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]}{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]} \times 100$;

$\text{IOL} = \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]}{[\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]} \times 100$;

$\text{CIA} = \frac{[\text{Al}_2\text{O}_3]}{[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]} \times 100$ (Babechuk et al., 2014).

Результаты исследований

Морфологическое описание палеопочв

Палеопочва в кровле сидеритолита развита фрагментарно (СШ — $51^\circ 15' 12.8''$; ВД — $37^\circ 44' 06.9''$). Морфологически почвообразование проявляется в виде пятен «выедания» (пятен растворения или каверн) на поверхности плотной породы (рис. 2, а–с). Площадь каверн составляет приблизительно 50×50 см. Почвообразующая порода (слой 1) красного цвета (10R 4/4), твердая, плотная, преимущественно массивная. Глубина проработки породы процессами почвообразования (мощность профиля) достигает 7–10 см. Материал почвенного профиля (слой 2) разбит трещинами, по которым на всю его глубину внедрены растительные остатки, формирующие участки скопления углисто-вещества, частично пиритизированного. Кровля палеопочвы (слой 3) мелкобугристая. Высота бугорков составляет около 1 см. Цвет кровли неоднородный, пятнистый, изменяется от светло-красного (10R 7/3) до светло-серого (2.5Y 7/1) и углисто-черного. Каверны между бугорками заполнены углефицированной органикой, мягкой, чешуйчатой, плотно «прикипевшей» к поверхности породы. Мелкозем в кавернах отсутствует, но формируется пудрозем (тонкая светлая присыпка). Наличие морфологически выраженных ризолитов не выявлено. Палеопочва перекрыта пачкой слоистых оглиненных пород.

Палеопочва на коре выветривания железистых сланцев также развита фрагментарно (СШ — $51^{\circ} 15' 13.4''$; ВД — $37^{\circ} 44' 07.0''$). Темно-красные (2.5 YR 3/6) массивные твердые сланцы в подошве палеопочвы (слой 1) (рис. 2, d) выше, в пределах профиля палеопочвы (слой 2), становятся неоднородно осветленными: имеет место чередование зон бледно-коричневых (2.5 Y 7/4) со светлыми коричневато-серыми (2.5 Y 6/2). Мощность этого слоя достигает 6–7 см. Кровля палеопочвы (слой 3) оглинена, осветлена до почти белого цвета (2.5Y 7/1). Она имеет выраженный кавернозно-мелкобугристый рельеф. Поверхность кровли покрывают углефицированные и частично пиритизированные растительные остатки, плотно прилегающие к поверхности. Мощность мата достигает 3 см. Присутствие морфологически выраженных ризолитов здесь также не выявлено.

Аналитические характеристики палеопочв

На рис. 3 представлены дифрактограммы сидеритола и палеопочвы, на нем сформированной. Порода является практически мономинеральной, сидеритовой, с примесями гематита и пирита. Минеральный состав материала, слагающего почвенный профиль (слой 2), идентичен породе, несмотря на видимые морфологические различия, касающиеся в первую очередь твердости и цвета. Изучение материала кровли палеопочвы (бугры и заполнение каверн) выявило рост содержания пирита и наличие новообразованной фа-

зы — водного сульфата Mn с изоморфной примесью Fe и Zn (илезит). Фаза характеризуется наличием следующих дифракционных рефлексов (в Å): 5.54, 4.53, 4.00, 3.47, 3.31, 3.00. Минерал является одним из продуктов окисления сульфидов.

В таблице 1 приведены данные по химическому составу палеопочвы и величины некоторых геохимических индексов. Все изученные образцы сильно ожелезнены. Содержание Fe_2O_3 составляет почти 60 %. Профиль палеопочвы химически дифференцирован. От подошвы к кровле падает содержание Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO, MnO. Резко возрастает содержание серы: в кровле оно составляет почти 17 %. Источником ее, скорее всего, является пиритизированный растительный материал. Этим фактом можно объяснить и рост величины потерь при прокаливании. В кровле палеопочвы отмечен рост величины геохимических индексов MIA, IOL, Al/Ti, свидетельствующий о нарастании степени преобразованности материала. Поведение химических элементов и индексов согласуется с изменениями морфологических признаков материала, слагающего кровлю палеопочвы.

Судьба железа — типоморфного для этой палеопочвы элемента — дополнительно изучалась методом мессбауэровской спектроскопии. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Почвообразующая порода помимо сидерита (72 %) содержит высокоокристаллизованный гематит (16 %)

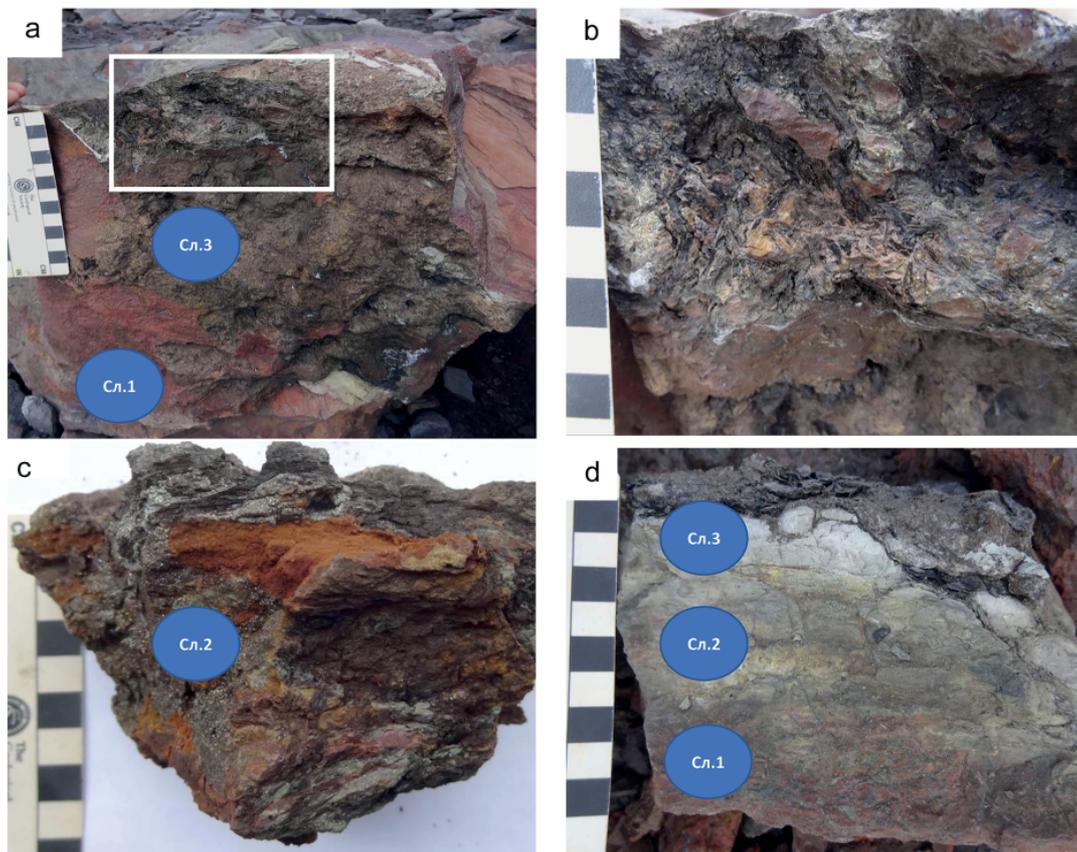


Рис. 2. Фото профилей палеопочв с обозначением слоев: а — палеопочва на сидеритолите, вид сверху; б — фрагмент рис. 1.1 с рельефом кровли палеопочвы и углефицированными остатками растительности; с — деталь строения профиля палеопочвы на сидеритолите с демонстрацией пиритизированных фрагментов растительных остатков; д — палеопочва на КВ железистых сланцев

Fig. 2. Photos of paleosol profiles: a — paleosol developed from sideritilite, top of the profile; b — fragment of Fig. 1.1 showing the surface of the top of the paleosol profile with coalified plant fragments; c — part of the paleosol profile developed from sideritilite showing the pyritized plant fragments; d — paleosol developed from the ferruginous shale

**Таблица 1.** Элементный состав и некоторые геохимические индексы палеопочв по данным XRF (%)**Table 1.** Chemical composition and selected geochemical indexes of the studied paleosols, in % (XRF data)

Разрез, слой Section, layer	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	S	ППП, %*	MIA**	IOL***	Al/Ti
ПП на сидеритоците / PS on sideritolite													
3	0.75	0.68	38.02	0.00	0.39	0.01	0.82	0.07	16.97	41.9	96.62	98.09	179.89
2	3.47	3.37	57.85	0.02	1.12	0.01	2.12	0.28	0.21	31.1	94.67	94.63	76.82
1	5.40	4.60	58.99	0.03	1.89	0.00	3.44	0.43	0.03	24.6	92.10	92.17	66.31
ПП на сланцах / PS on shales													
3	8.21	8.43	46.43	0.03	0.56	0.01	1.14	0.21	4.34	30.6	96.78	86.99	125.23
2	27.83	24.68	27.12	0.23	0.12	0.01	0.87	0.02	3.45	15.3	97.89	65.05	47.07
1	28.46	23.90	36.33	0.27	0.10	0.01	1.22	0.03	0.18	9.1	97.77	67.91	39.23

*Потери при прокаливании (loss on ignition)

**MIA — мафический индекс преобразованности (mafic index of alteration)

***IOL — индекс латеритизации (index of lateritization)

Таблица 2. Минералогия соединений железа в % от валового содержания железа (по данным мессбауэровской спектроскопии)**Table 2.** Iron mineralogy of paleosols in % from bulk Fe content (Moessbauer spectroscopy)

Раздел, слой Section, layer	МВ 10 ⁻⁸ SI м ³ кг ⁻¹	Секстет, % Sextette, %	Дублет, % Doublet, %	Цветовой индекс Color index
ПП на сидеритоците / PS on sideritolite				
Слой 3 Layer 3	45	нет	пирит / Pyrite 59.8 сидерит / Siderite 25.9 сульфат Fe / Sulphate Fe 15.4	10R 7/3 и 2.5Y 7/1
Слой 2 Layer 2	107	нет	сидерит / Siderite 100	не определяли not determined
Слой 1 Layer 1	176	гематит* / Hematite* 16.3	сидерит / Siderite 71.8 арсенопирит / Arsenopyrite 8.9 пирит / Pyrite 3.0	10R 4/4
ПП на сланцах / PS on shales				
Слой 3 Layer 3	83	нет	бертьерин Fe ²⁺ 7.4 Bertierine Fe ³⁺ 0.9 сидерит / Siderite 66.8 пирит / Pyrite 25.1	2.5Y 7/1
Слой 2 Layer 2	72	гематит* / Hematite* 2.0	бертьерин Fe ²⁺ 41.8 Bertierine Fe ³⁺ 29.9 пирит / Pyrite 17.7 сидерит / Siderite 8.5	2.5Y 7/4 и 2.5Y 6/2
Слой 1 Layer 1	79	гематит* / Hematite* 11.9 гематит** / Hematite** 3.3	бертьерин Fe ²⁺ 47.5 Bertierine Fe ³⁺ 9.6 пирит / Pyrite 17.7 сидерит / Siderite 8.5	2.5YR 3/6

МВ — магнитная восприимчивость

* высокоокристаллизованный гематит (H= 511 кЭ при 270 К и 535 кЭ при 80К)

** слабоокристаллизованный гематит (H= 495 кЭ при 270 К)

МВ — magnetic susceptibility

* highly crystallized hematite (H= 511 kOe at 270 K and 535 kOe at 80 K)

** weakly crystallized hematite (H= 495 kOe at 270 K)

(H= 511кЭ при 270К и 535кЭ при 80К), также присутствующий сульфиды — пирит и арсенопирит (в сумме 12 %).

Материал кавернозной кровли профиля палеопочвы теряет значительную часть железа (табл. 1), которая сопровождается падением величины магнитного сигнала и изменением в соотношении Fe-содержащих фаз: почти в 3 раза сокращается доля сидерита, отсутствует гематит, резко возрастает доля пирита, появляется Fe-сульфат.

Результаты изучения материала кровли палеопочвы методом СЭМ с микрозондом свидетельствуют об имевших место процессах преобразования первичных минералов и формирования новых фаз (рис. 4). Пирит в этой части профиля формируется по биогенным структурам; новообразованный сидерит формирует своеобразные кристаллические ростки; сульфаты представлены гипсом и микрокристаллической формой Fe-содержащего сульфата.

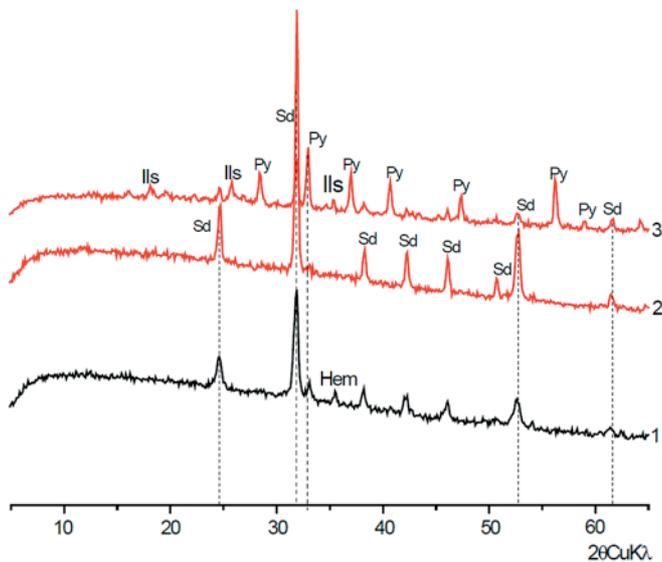


Рис. 3. Минеральный состав палеопочвы на сидеритолите: 1 — сидеритолит; 2 — материал почвенного профиля; 3 — кровля профиля. Обозначения: Sd — сидерит, Py — пирит, Ils — илезит, Hem — гематит

Fig. 3. Mineralogical composition of paleosol developed from sideritolite: 1 — parent material — sideritolite; 2 — paleosol profile, central part; 3 — topsoil. Abbreviations: Sd — siderite; Py — pyrite; Ils — ilesite; Hem — hematite

Таким образом, кровля этого почвенного микропрофиля несет комплекс признаков, свидетельствующих об имевших место преобразованиях сидеритолита в субаэральных окислительных обстановках. Наличие пирита в сидеритолите и его трансформационные преобразования, в том числе окисление с формировани-

ем гипса и промежуточных фаз, могут говорить о том, что изученная палеопочва является аналогом современной кислой сульфатной почвы. Свидетельством агрессивности среды, характерной для этого типа почв, являются, например, зерна К-полевого шпата, поверхность которых несет черты массового растворения по плоскостям спайности (рис. 4, а).

На рис. 5 представлены дифрактограммы железистого сланца и палеопочвы, на нем сформированной. Доминирующими фазами в составе сланца являются слоистые 7Å-минералы — бертьерин и каолинит, в качестве примесей содержатся сидерит и пирит. Такая минеральная ассоциация типична для железорудных кор выветривания КМА — продуктов фанерозойского выветривания докембрийский пород. Было показано, что бертьерин является главным силикатом в составе этих руд (Никулин, Савко, 2015). Бертьерин имеет схожие с каолинитом рентген-дифрактограммы, а также идентичное поведение кристаллической решетки после прокаливания при 550 °С: оба минерала при этом переходят в рентгеноаморфное состояние. Вместе с тем бертьерин, содержащий в решетке Fe²⁺ и Fe³⁺, надежно диагностируется по мессбауэровским спектрам (см. ниже). Материал палеопочвенного профиля демонстрирует отличия от почвообразующей породы, которые проявляются в перераспределении содержания перечисленных выше фаз. В кровле палеопочвы резко возрастает доля сидерита на фоне снижения концентрации слоистых силикатов.

Данные мессбауэровской спектроскопии подтверждают и дополняют результаты рентгеновской дифрактометрии. В таблице 2 показано, что сланец содержит около 15 % гематита, который представлен двумя раз-

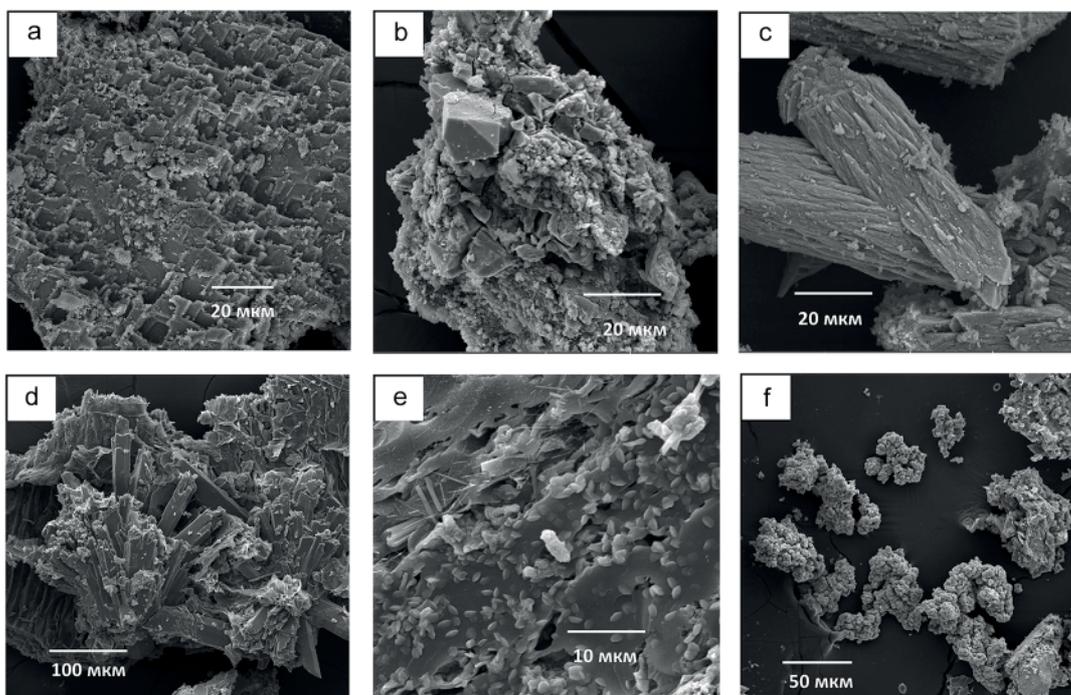


Рис. 4. Электронно-микроскопические фотографии преобразованных и новообразованных минеральных фаз в кровле палеопочвы на сидеритолите: а — выветривание зерна К-полевого шпата; б — пиритизация растительных остатков; с — морфология кристаллов новообразованного сидерита; д — гипсовая роза; е — микрокристаллы Fe-сульфата; ф — пиритизированные биогенные структуры

Fig. 4. SEM photographs of transformed and new-formed minerals from the topsoil on sideritolite: а — weathering of K-feldspar; б — pyritized plant fragments; с — crystals of new-formed siderite; д — gypsum «rose»; е — microcrystals of Fe-sulphate; ф — pyritized biogenic structures

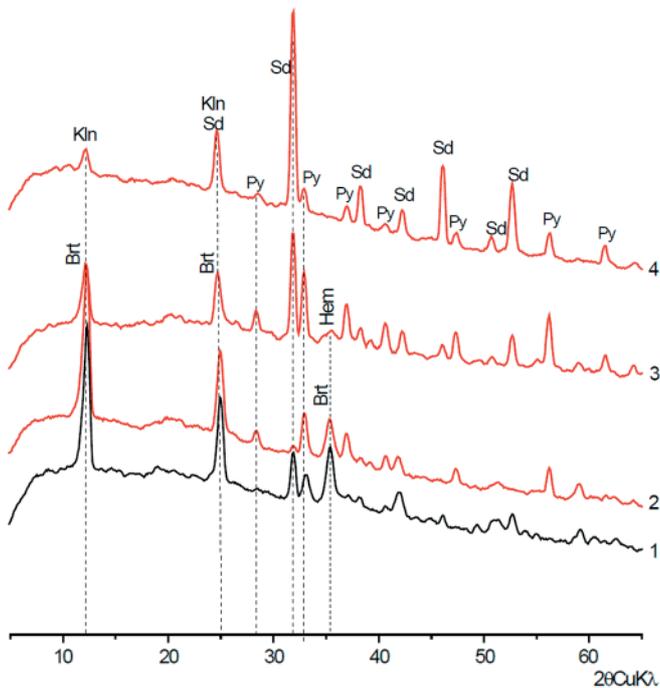


Рис. 5. Минеральный состав палеопочвы на КВ железистых сланцев: 1 — железистый сланец; 2 — материал почвенного профиля; 3 — пудровый материал из каверн кровли палеопочвы; 4 — материал бугров на поверхности палеопочвы. Обозначения: Brt — бертьерин, Kln — каолинит, Sd — сидерит, Py — пирит, Hem — гематит

Fig. 5. Mineralogical composition of paleosol developed from shale: 1 — parent material — ferruginous shale; 2 — paleosol profile, central part; 3 — powder material from microdepressions in the top of the paleosol; 4 — material of micromounds in the top of the paleosol. Abbreviations: Brt — berthierine; Kln — kaolinite; Sd — siderite; Py — pyrite; Hem — hematite

ностями — высоко- и слабоокристаллизованной при преобладании первой. В спектре выделены 2 дублета, отнесенные к бертьерину: для дублета Fe^{2+} — $IS = 1.117$ мм/сек и $Qs = 2.45$ мм/сек (47.5 %), для дублета Fe^{3+} — $IS = 0.3$ мм/сек и $Qs = 1.1$ мм/сек (9.6 %) (MacKenzie, Berezowski, 1984; Mössbauer Mineral Handbook..., 2002). Материал кавернозной кровли палеопочвы ожелезнен, в качестве основной фазы выступает сидерит. Гематит отсутствует, а доля Fe, принадлежащего бертьерину, сокращается с 57 до 8 %. Существенная пиритизация обусловлена органическим веществом подстилки.

Профиль палеопочвы дифференцирован по химическому составу (табл. 1). В материале кровли резко сокращается содержание SiO_2 и Al_2O_3 . При этом возрастают концентрации Fe_2O_3 , S, CaO и MnO. Заметен рост отношения Al/Ti и индекса IOL. Рост величины индекса IOL, снижение концентраций SiO_2 и Al_2O_3 и резкое падение интенсивности 7Å -пика на дифрактограммах говорят о глубоких преобразованиях материала кровли палеопочвы, о разрушении в первую очередь Fe^{2+} -содержащего бертьерина, неустойчивого к выветриванию.

Морфология растительных остатков

В кровлях обоих профилей ископаемых почв сохранилась органическая подстилка (рис. 2). Она представляет собой спрессованный маломощный органический мат толщиной 2–3 см, не содержащий мине-

ральных включений (образец БИН 3214/16). Как отмечалось выше, мат плотно прилегает к кровле палеопочв (прочно в нее внедрен). Сверху он перекрыт слоистыми глинистыми осадками. Результаты микроскопического изучения показали, что растительные маты сложены моновидовой бескорневой растительностью, идентичной для обоих изученных почвенных профилей. Ткани с поверхности палеопочв и из подповерхностных полостей (в палеопочве на сидеритолите) идентичны, т. е. ткани растения не были дифференцированы на стебли и корни. Изучение изотопного состава углерода растительных остатков показало значения $\delta^{13}C = (-23.90 \pm 0.05)$ ‰, что характерно для наземной растительности с C3-типом фотосинтеза. Попытки обнаружить споры с целью датирования палеопочв на настоящий момент результатов не дали. Систематическое положение растительности остается неопределенным.

Характерные фотографии растительных тканей приведены на рис. 6. Выявлено, что образцы представляют собой переплетения многочисленных слоевищ, неравномерно распределённых во вмещающем их матрице. Хорошо выделяются отдельные линейные сегменты макромасштаба, имеющие цилиндрическую форму (рис. 6, а). Подобные «трубочки» состоят из вытянутых прямоугольных клеток с перегородками, формирующими отчетливые продольные ряды.

В шлифах образца мата различимы несколько типов клеток. Местами заметно, что разные типы клеток наслаиваются друг на друга (рис. 6, а):

1 — удлиненные, ориентированные прямоугольные тонкостенные клетки на рис. 6, б (стрелка 1). Скорее всего, данный тип клеток относится к цилиндрическим образованиям на рис. 6, а;

2 — клетки шириной 20–60 мкм, округло-квадратные и прямоугольные, на снимках СЭМ видны межклетники (рис. 6, б, стрелка 2; рис. 6, д);

3 — фрагменты клеток со спиральными утолщениями (рис. 6, б, стрелка 3; рис. 6, с), что указывает на их возможную трахеальную природу.

Интерес вызывают образования, обнаруженные в растительных остатках из подповерхностной части профиля палеопочвы на сидеритолите. На рис. 7, а видно, что тонкие растительные ткани с клетками первого типа массово повреждены (разорваны). В разрывах видны минеральные образования, сложенные микроструктурным материалом. В том же препарате широко присутствуют образования, сложенные идентичным материалом (по-видимому, высвободившимся на этапе приготовления препарата) (рис. 7, с, д). Образования представляют собой причудливой формы сростки. Фрагменты этих сростков имеют идентичную удлиненную форму и размеры: 30–40 мкм в диаметре и 200–300 мкм в длину. Образования сложены оксидами Fe (доля Fe составляет 36–38 %), содержат примеси Ca (до 2 %) и S (1 %) (рис. 7, б). Объекты, скорее всего, изначально имели биологическую природу.

Обсуждение и выводы

Описанные в данной работе палеопочвы, развитые в кровле двух типов пород протерозойского фундамента, а также изученная ранее на территории этого карьера палеопочва в кровле железистых кварци-

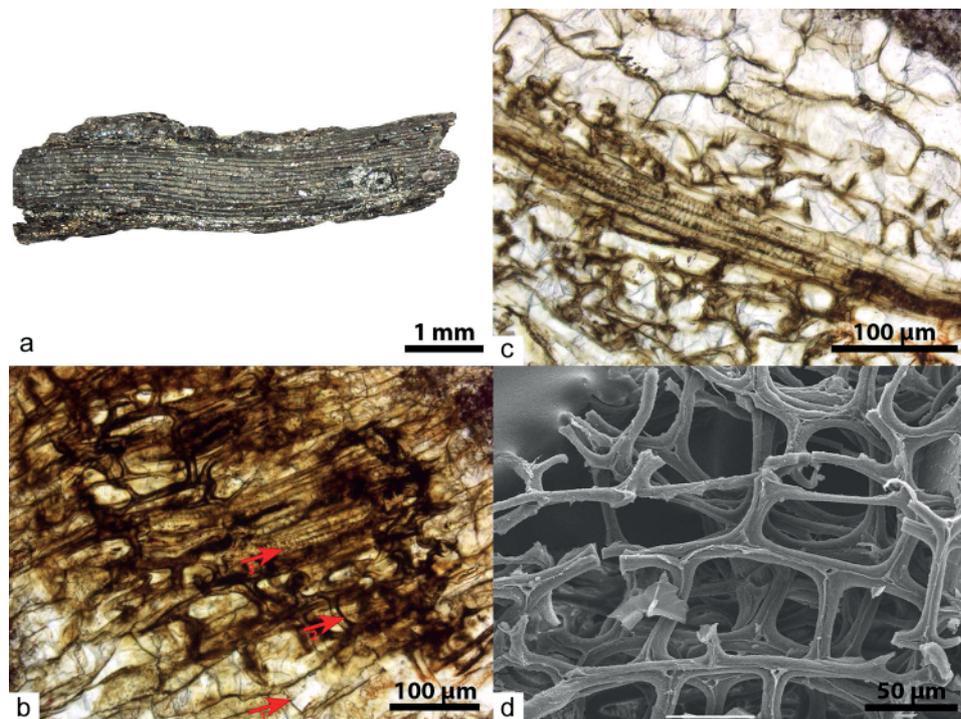


Рис. 6. Микростроение растительных тканей: а – фрагмент растительного остатка цилиндрической формы; б – различные типы тканей (отмечены стрелками) в шлифе; с – клетки со спиральными утолщениями в радиальном сечении в шлифе; д – снимок СЭМ клеток с межклетниками

Fig. 6. Microstructure of plant fragments: а – cylindrical-shaped plant fragment; б – various types of tissues (marked with the arrows) in thin section; с – cells with spiral thickenings in a radial section in thin section; д – SEM image of cells with intercellular spaces

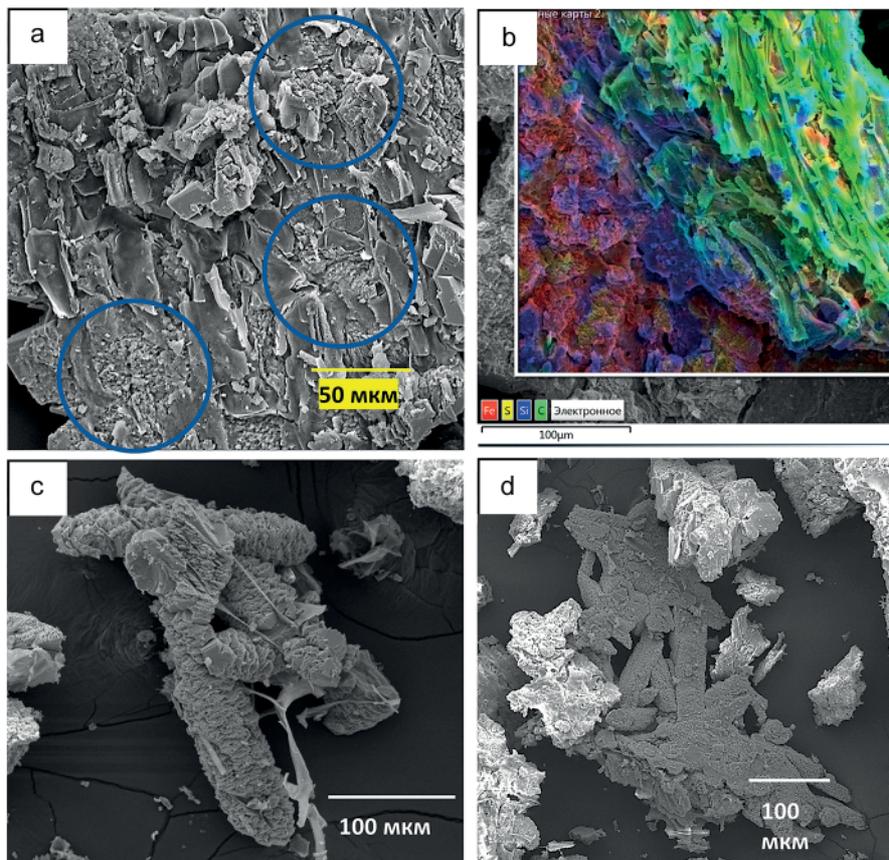


Рис. 7. Биогенные структуры в кровле палеочвы на сидеритолите (данные СЭМ): а – массовые разрывы поверхности растительного фрагмента; б – распределение химических элементов по поверхности растительного фрагмента, указывающее на концентрирование железа в минеральных образованиях; с и д – формы биогенных новообразований

Fig. 7. Biogenic pedofeatures from the top of the paleosol profile developed from sideritite (SEM data); а – multi destructions of the plant fragment surface; б – distribution of chemical elements over the surface of the plant fragment showing the concentration of Fe in pedofeatures; с and d – the shape of pedofeatures



тов (Alekseeva T. V. et al., 2021) имеют одинаковый возраст. Палеопочвы не формировали сплошного покрова, и он может быть охарактеризован как пятнистый. Палеопочвы имеют различный морфологический облик, при этом формировались под одним и тем же типом растительности — литофитной и, скорее всего, бескорневой. Изотопный состав С ($\delta^{13}\text{C} = -23.90 \pm 0.05 \text{‰}$), характерный для наземной растительности, свидетельствует, что палеопочвы формировались в субаэральном обстановках. Это также подтверждается присутствием продуктов окисления пирита (Mn- и Fe-сульфатов и гипса), окислением Fe в структуре бертьерина и его разрушением, другими минеральными преобразованиями. Наличие в составе всех трех исходных почвообразующих пород сульфидов (пирита и/или арсенопирита) и их окисление явилось триггером почвообразования. Дополнительным источником сульфидов были пиритизированные растительные остатки. Как следствие, процессы химического преобразования преобладали над физическими. В результате сформированные на массивных, лимитированных по содержанию биофильных элементов, потенциально токсичных породах без участия корневой растительности палеопочвы тем не менее имеют выраженный с точки зрения морфологии, дифференцированный по минеральному и химическому составу профиль. Необходимо подчеркнуть, что наличие ризолитов — безусловного признака почвообразования (Чальшев, 1978, Алексеева, 2020) — оказалось необязательным для их выявления. Этот факт подтверждает правомочность вывода о распространенности почв еще до появления корневой растительности (Retallack, 2022). Изученные палеопочвы отнесены к инситным, биотичным, литоэкстремальным (Горячкин, 2022). Независимо от типа почвообразующей породы и морфологических отличий, изученные палеопочвы имеют признаки кислых сульфатных почв современности. Видится, что в прошлые геологические эпохи почвы такого типа были широко распространены (Alekseeva et al., 2023, Retallack, 2022).

Исследования поддержаны Российским научным фондом, проект № 22-27-00370. Авторы выражают благодарность руководству и геологической службе карьера Стойленский ГОК (группа компаний НЛМК) за содействие экспедиционным исследованиям.

Литература / References

Alekseeva T. V. Ризолиты в палеопочвах девона и нижнего карбона и их палеоэкологическая интерпретация // Почвоведение. 2020. № 4. С. 1–16.
Alekseeva T. V. Rhizoliths in Devonian and Early Carboniferous paleosols and their paleoecological interpretation. Eurasian Soil Sci., 2020, V. 53 (4), pp. 405–419.

- Горячкин С. В. География экстремальных почв и почвоподобных систем // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 6. С. 564–571.
Goryachkin S. V. Geography of extreme soils and soil-like systems. Vestnik of Russian Academy of Sciences, 2022, V. 92 (6), pp. 564–571.
Меркушова М. Ю., Никулин И. И. Сравнительный анализ богатых железных руд Белгородского и Старооскольского железорудных районов КМА // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2015. № 4. С. 107–114.
Merkushova M. Yu., Nikulin, I. I. Comparative analysis of rich iron ores of the Belgorod and Starooskolsky iron ore regions of the KMA. Proc. Voronezh. state. Univ. Geol., 2015, No. 4, pp. 107–114. (in Russian)
Никулин И. И., Савко А. Д. Железорудные коры выветривания Белгородского района Курской магнитной аномалии // Труды НИИ геологии Воронеж. гос. ун-та. 2015. Вып. 85. 102 с.
Nikulin I. I., Savko A. D. Rich iron ores mantles of waste of the Belgorod district, the Kursk Magnetic Anomaly. Proceedings of the Science and Research Institute of Geology of the Voronezh State University. Voronezh state university, 2015, 85, 102 p. (in Russian).
Савко А. Д. Геология Воронежской антеклизы // Труды НИИ геологии Воронеж. гос. ун-та. 2002. Вып. 12. 165 с.
Savko A. D. Geology of the Voronezh Antecline. Proceedings of the Science and Research Institute of Geology of the Voronezh state university, 2002, 12, 165 p. (in Russian)
Чальшев В. И. Методика изучения ископаемых почв. М.: Недра, 1978. 72 с.
Chalishhev V. I. Metodika izucheniya iskopaemih pochv. Moscow: Nedra, 1978, 72 p. (in Russian).
Alekseeva T. V., Alekseev A. O., Mitenko G. V. A paleosol on a Pre-Cambrian ferruginous quartzite weathering crust (Stary Oskol, Belgorod Region, Russia) // Paleontological J. 2021. V.55. № 12. P. 1476–1490.
Alekseeva T., Kalinin P., Malishev V., Alekseev A. O. Sulfide oxidation as a trigger for rhyolite weathering and paleosol formation in Devonian (Voronezh High, South Russia) // Catena 2023. V. 220A. P. 106712.
Babechuk M. G., Widdowson M., Kamber B. S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India // Chemical Geology. 2014. V. 363. P. 56–75.
MacKenzie K. J. D., Berezowski R. M. Thermal and Mössbauer Studies of Iron-containing Hydrous Silicates // Thermochim. Acta 1984. V. 74. P. 291–312.
Mössbauer Mineral Handbook: In: Stevens, J. G., Khasanov, A. M., Miller, J. W., Pollak, H., Li, Z. (eds.) Mössbauer Effect Data Center. 2002.
Retallack G. J. Soil salt and microbiome diversification over the past 3700 million years // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2022. V. 598. P. 111016.

Поступила в редакцию / Received 14.09.2023