

УДК 551.7

## ПАЛЕОПОЧВЫ КАК МАРКЕРЫ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ НЕСОГЛАСИЙ В ВЕРХНЕВИЗЕЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ РАЗРЕЗА МСТИХИНО, КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ: ГЕОХИМИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, БИОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ

© 2022 г. Т. В. Алексеева<sup>1</sup> \*, В. В. Мальшев<sup>1</sup>, А. О. Алексеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Московская область, Россия

\*e-mail: [alekseeva@issp.serpukhov.su](mailto:alekseeva@issp.serpukhov.su)

Поступила в редакцию 04.02.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 27.04.2022 г.

Представлены результаты изучения отложений алексинско-веневского интервала визейского яруса, вскрытых в известняковом карьере Мстихино. Образцы для исследования были отобраны послойно и изучены с применением комплекса минералого-геохимических методов. Вычленены 6 несогласий, отвечающих основным перерывам в отложениях морского эпиконтинентального бассейна. На основании проведенных исследований отложения, слагающие эти несогласия, были диагностированы как палеопочвы, которые были разделены на 4 педотипа. Большинство профилей маломощные, имеют двучленное строение: в разной степени субаэрально преобразованный морской известняк (калькрет или карст) и терригенный слой, также экзогенно преобразованный. Последний формируется на стадии трансгрессии и может представлять собой отложения пресных временных эфемерных озер, морского мелководья, элювий известняка. Выявлен следующий комплекс признаков субаэральной преобразованности кровли известняка: формирование плитчатости и брекчированности, выраженный рельеф, изменения физических свойств (снижение удельного веса, изменение цвета и твердости), наличие ризолитов. Имеют место растворение и переосаждение карбонатов. В химическом составе отмечен рост концентраций Si, Al, Fe, K, тяжелых металлов. Терригенные слои (карбонатные или бескарбонатные) в большинстве случаев представляют собой прибрежно-морские пионерные почвы. Они содержат органическое вещество, биота представлена ризолитами, растительным детритом, спорами растений. Морфологически выраженной и аналитически подтвержденной особенностью является ожелезнение. По данным мессбауэровской спектроскопии железосодержащие фазы представлены окисленными формами: гетитом и гематитом в разных пропорциях. Нижний терригенный уровень михайловского горизонта (МН<sub>T1</sub>) определен как болотная палеопочва (гистосоль), сформированная на кластогенном бескарбонатном субстрате, представляющем собой донные осадки пресноводного озера, впоследствии обмеленного и заболоченного. Произраставшая здесь растительность характеризовалась большим биоразнообразием, включая мохоподобные растения и древовидные плауновидные. Комплекс полученных характеристик позволил заключить, что в михайловское время климат на изученной территории испытывал колебания. Преобладали гумидные обстановки с количеством атмосферных осадков 800–1000 мм/год. На этом фоне выявлены и более аридные этапы, когда распространение получили кальцисоли. Сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными о почвенном покрове Подмосковного осадочного бассейна в раннем карбоне показало его латеральную пестроту. Вместе с тем палеопочва уровня МН<sub>T1</sub> обнаруживается и в других карьерах Калужской области. Она морфологически узнаваема, имеет характерный минеральный состав и может рассматриваться в качестве значимой стратиграфической единицы.

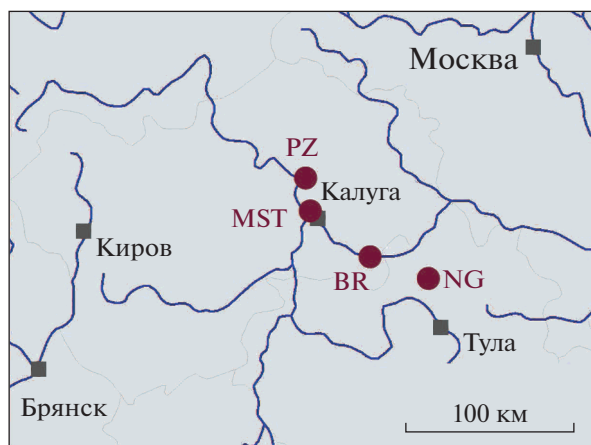
*Ключевые слова:* ранний карбон, Подмосковный осадочный бассейн, педостратиграфия, глинистая минералогия, оксиды железа, изотопный состав С карбонатов, палеоклимат

DOI: 10.31857/S0869592X22060035

### ВВЕДЕНИЕ

Известняковый карьер Мстихино располагается в пределах южного крыла Московской синеклизы (рис. 1). В раннем карбоне эта территория занимала северо-восточную окраину Евразий-

ского континента, его приэкваториальную зону. Она представляла собой полуизолированную плоскую низменную равнину (Alekseev et al., 1996). На этапах трансгрессий территорию покрывало теплое мелкое эпиконтинентальное море, что сопровождалось аккумуляцией карбонатов. Динамика



**Рис. 1.** Каменноугольные карьеры в окрестностях г. Калуга.

MST – карьер Мстихино, PZ – карьер Полотняный завод, BR – карьер Бронцы, NG – карьер Новогуровский.

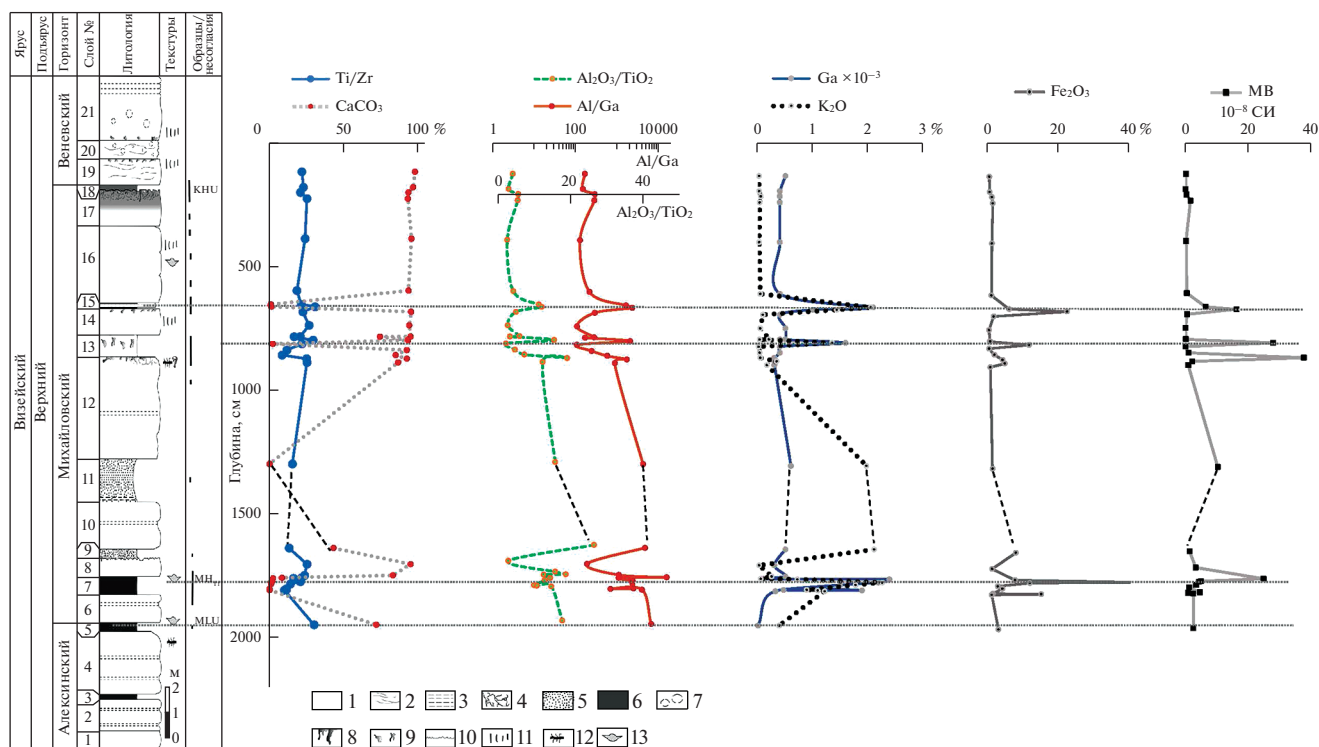
осадконакопления, обусловленная регрессивно-трансгрессивными циклами, зафиксирована в геологической записи, которая имеет множественные перерывы (Махлина и др., 1993, 1994; Alekseev et al., 1996; Алексеев и др., 2012; Кабанов, 2004; Kabanov, Alekseev, 2011; Kabanov et al., 2013, 2016a, 2016b; Kabanov, 2017; Габдуллин и др., 2018). Кровли образовавшихся несогласий в большинстве случаев несут признаки преобразований в субаэральных обстановках. Субаэральные поверхности в отложениях карбона на данной территории описываются в литературе начиная с первой половины XX в. (Залесский, 1914; Швецов, 1922, 1938; Геккер, 1940; Осипова, Бельская, 1965; Бельская и др., 1975). Относительно недавно эти ископаемые природные тела стали рассматриваться в качестве почвенных объектов (Кабанов, 2000, 2003, 2004; Kabanov, 2003; Kabanov et al., 2010; Alekseeva et al., 2016; Алексеева и др., 2016, 2018; Алексеева, 2020a). Принято считать, что сохранившиеся в геологической летописи осадки представляют в целом не более 10% геологического времени (Miall, 2016; Kabanov, 2017), и изучаемые нами толщи демонстрируют этот тезис, включая в себя многочисленные перерывы в осадконакоплении, следы субаэральных преобразований и эрозии. Палеопочвы, как среда обитания наземных организмов, являются первостепенными свидетельствами континентальных обстановок на Земле начиная с раннего фанерозоя. Эти природные архивы содержат сведения о палеоландшафтных обстановках, наземной биоте и климате прошлого. По определению, стратиграфическое (или параллельное) несогласие – это нарушение хронологической последовательности залегания слоев, обусловленное выпадением из разреза определенного

стратиграфического интервала (Геологический..., 1978). Стратиграфические несогласия маркируются субаэральными поверхностями и/или палеопочвами. Вместе с тем выявление стратиграфических несогласий часто субъективно, остается сродни искусству. Использование комплексного подхода к изучению стратиграфических несогласий, накопление качественных и количественных критериев для их выявления – важнейшие задачи, стоящие перед палеопочвоведением. Данная работа продолжает проведенные ранее исследования палеопочв визейско-серпуховского интервала на территории Подмосковного осадочного бассейна (Алексеева и др., 2016, 2018; Alekseeva et al., 2016; Алексеева, 2020a, 2020b). На базе комплексного изучения отложений, вскрытых в карьере Мстихино, в работе приводятся сведения о седиментологии, геохимии, экзогенных преобразованиях отложений и биогенных структурах. Основной целью исследования является получение дополнительной информации о континентальных этапах в развитии территории и о почвенном покрове в верхнем визе. Базируясь на педостратиграфических подходах, предпринята попытка корреляции Мстихинского разреза с изученными ранее разрезами нижнего карбона южного крыла Московской синеклизы (Alekseeva et al., 2016; Алексеева, 2020a; Kabanov et al., 2016a, 2016b). Выявленные дополнительные (по сравнению с изученными ранее карьерами на территории южного крыла Московской синеклизы) уровни развития палеопочв в отложениях михайловского горизонта позволяют детализировать события, в том числе климатические обстановки.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Изучены верхневизейские отложения, вскрываемые в заброшенном известняковом карьере на окраине д. Мстихино, в 13.5 км к северо-западу от г. Калуга и в 190 км к юго-западу от г. Москва (54°35' с.ш.; 36°07' в.д.). Карьер располагается в пределах южного крыла Подмосковного осадочного бассейна. На основании ранее проведенных исследований комплексов фораминифер и конодонтов (Alekseev et al., 2004), а также палеоботанических исследований (Mosseichik, 2005a, 2005b; Mosseichik et al., 2007; Мосейчик, 2009; Mosseichik, Ruban, 2010) и палиостратиграфической характеристики (Мамонтов, Орлова, 2014; Mamontov et al., 2017, 2021), вскрываемые в карьере отложения отнесены к алексинско-веневскому интервалу визейского яруса.

На рис. 2 дан сводный разрез карьера, составленный Д.А. Мамонтовым (Mamontov et al., 2021). Необходимо подчеркнуть, что отдельные изученные в данной работе слои заметно варьируют по мощности и фациально различаются по сравнению с имеющимися в литературе описаниями Ю.В. Мо-



**Рис. 2.** Разрез карьера Мстихино с обозначением точек отбора и аналитические характеристики отложений, слагающих разрез.

1 – известняки; 2 – глинистые известняки; 3 – мергели; 4 – брекчированные известняки; 5 – пески и песчаники; 6 – глины и известковые глины; 7 – конкреционные стяжения в веневских известняках; 8 – следы зарастания (фитокорст); 9 – каверны и пустоты растворения; 10 – поверхности закарстования; 11 – икнофоссилии *Skolithos* и др.; 12 – *Stigmaria*; 13 – раковины гигантопродуктид.

сейчик (Mosseichik et al., 2007; Мосейчик, 2009) и Мамонтова (Mamontov et al., 2021).

Образцы для исследования были отобраны по-слоyno и изучены с применением комплекса минералого-геохимических методов. Базовые аналитические характеристики: содержание карбонатов, гранулометрический состав кластогенных отложений и содержание в них органического вещества – получены с использованием принятых в почвоведении методик. Минеральный состав валовых образцов, илстой (<2 мкм) и крупной (>2 мкм) фракций был изучен методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3 (CuKα излучение, Ni-фильтр, с шагом 0.1° и временем сканирования 10 с). Илстая фракция была получена методом отмучивания из остатка, нерастворимого в ацетатном буфере (уксусная кислота, забуференная уксуснокислым Na с величиной pH 5.5). Рентгеновская диагностика глинистых минералов базировалась на результатах следующих тестов: Mg<sup>2+</sup>-форма в воздушно-сухом состоянии; Mg<sup>2+</sup>-форма, насыщенная этиленгликолем в течение 24 ч; Mg<sup>2+</sup>-форма, прокаленная до 350°C в течение 2 ч; Mg<sup>2+</sup>-форма, прокаленная до 550°C в течение 2 ч; K<sup>+</sup>-форма в воздушно-сухом состоянии; K<sup>+</sup>-форма, насыщенная этиленгликолем в

течение 24 ч; Li-тест (прокаленный до 250°C в течение 24 ч с последующим насыщением этиленгликолем). Химический состав образцов изучен методом рентгенофлуоресценции (РФА) на спектрометре S6 JAGUAR (Bruker). Калибровки проводились с использованием набора стандартных образцов пород и почв. Данные по содержанию химических элементов, а также их отношений (геохимических индексов) использовали для оценки обстановок осадконакопления и интенсивности процессов выветривания/почвообразования (Акульшина, 1971, 1976; Retallack, 2001; Калинин, Алексеев, 2011; Alekseev et al., 2015). Так, источники сноса, их постоянство или смену оценивали по поведению отношения Ti и Zr – элементов в составе наиболее устойчивых к выветриванию минералов рутила и циркона, растворение которых возможно лишь в очень кислых средах. Отношение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> (Акульшина, 1976) предложено использовать в качестве показателя климатических условий выветривания. Минимальные значения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> характеризуют интенсивное выветривание в условиях гумидного климата. С ростом аридности подвижность Al падает и отмечается рост величины Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>. Степень преобразованности материала оценивалась по величине отношения Al/Ga. Большая часть Ga в литосфере связана с

Al-содержащими минералами. При выщелачивании галлия выносятся больше, чем алюминия, и имеет место рост величины отношения Al/Ga (Акульшина, 1971).

Изотопный состав углерода карбонатов и углерода органического вещества (ОВ) изучен методом масс-спектрометрии. Магнитная восприимчивость (МВ) определялась на лабораторном магнетометре KLY-2 Kappabridge. Измерения были выполнены в трех повторностях. Полученные значения МВ были пересчитаны на единицу массы и выражены в единицах СИ —  $\text{м}^3 \text{кг}^{-1} \times 10^{-8}$ . Состояние соединений железа изучено методом мессбауэровской (ЯГР) спектроскопии. В отличие от магнитных методов, которые чувствительны к небольшим концентрациям ферромагнитных соединений, мессбауэровская спектроскопия на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  позволяет определить все Fe-содержащие минералы: силикаты, сульфиды, карбонаты, оксиды и гидроксиды Fe, в том числе наноразмерные, а также может служить для выявления количественных различий в содержании  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  и их распределения по кристаллическим позициям в структуре минерала. Мессбауэровские спектры  $^{57}\text{Fe}$  были получены на спектрометре MS-1104Em. Изомерный сдвиг определялся относительно  $\alpha$ -Fe, съемка велась в диапазоне скоростей от  $-10$  до  $+10$  мм/с. Время накопления спектров составило от 2 до 15 ч в зависимости от содержания железа в образцах. Мессбауэровские спектры валовых проб и илистых фракций из отдельных слоев разреза были сняты при комнатной температуре и температуре жидкого азота ( $85^\circ\text{K}$ ). В ходе экспериментов были получены многокомпонентные ЯГР-спектры образцов: дублеты для большинства образцов, исследуемых при комнатной температуре (RT), и секстет-дублетные спектры, полученные при температуре жидкого азота. Для обработки спектров использовались модели, выбранные с учетом результатов рентгеновской дифрактометрии и типа спектра (Бабанин и др., 1995; Murad, Cashion, 2004; Moessbauer..., 2013). Соотношение фаз гетит/гематит использовалось для реконструкций палеоклимата. Ранее на примере тропических почв было показано, что пропорция гематита относительно гетита увеличивается с ростом среднегодовых температур, а доля гетита возрастает с увеличением избыточной увлажненности (Kämpf, Schwertmann, 1983; Nyland et al., 2015).

Морфология и состав новообразований, микростроение органических остатков изучены мето-

дом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 LMU и системы энергодисперсионного микроанализа Aztech Advanced Inca Energy 350 с детектором X-max 80 в составе электронного микроскопа.

## ОПИСАНИЕ РАЗРЕЗА

Литологическая характеристика изученного разреза представлена на рис. 2.

*Точка наблюдения 1* ( $54^\circ 34' 58.2''$  с.ш.;  $36^\circ 07' 17.9''$  в.д.)

*Алексинский горизонт*

Слой 4 (видимая мощность 80 см). Известняк плотный, массивный, кровля которого разбита на плитки. Подошва слоя скрыта осыпью. Начиная с глубины 15–20 см и ниже на глубине 40–50 см от кровли слоя обнаружены стигмарины (*Stigmaria ficoides*), залегающие преимущественно наклонно (табл. I).

*Граница алексинского и михайловского горизонтов*

Слой 5 (20 см). Глина коричневая, с включением плиток известняка слоя 4, содержащая во множестве ракушечный бой и аллохтонные раковины гигантопродуктид хорошей сохранности (табл. I, фиг. 1).

*Михайловский горизонт*

Слой 6 (около 20 см). Известняк с морскими фоссилиями, кровля разбита на плитки.

Слой 7 (50 см). Терригенный глинистый материал залегающий на маломощном известняке слоя 6. Нижние 15 см — глина желтая, ожелезненная (слой 7.1), выше переходит в серо-черный глинистый слой с углистым детритом (слой 7.2) (табл. I, фиг. 2). Часть слоя недоступна для наблюдения, поскольку размыта и заросла травой.

*Точка наблюдения 2* ( $54^\circ 35' 01.2''$  с.ш.;  $36^\circ 07' 11.4''$  в.д.)

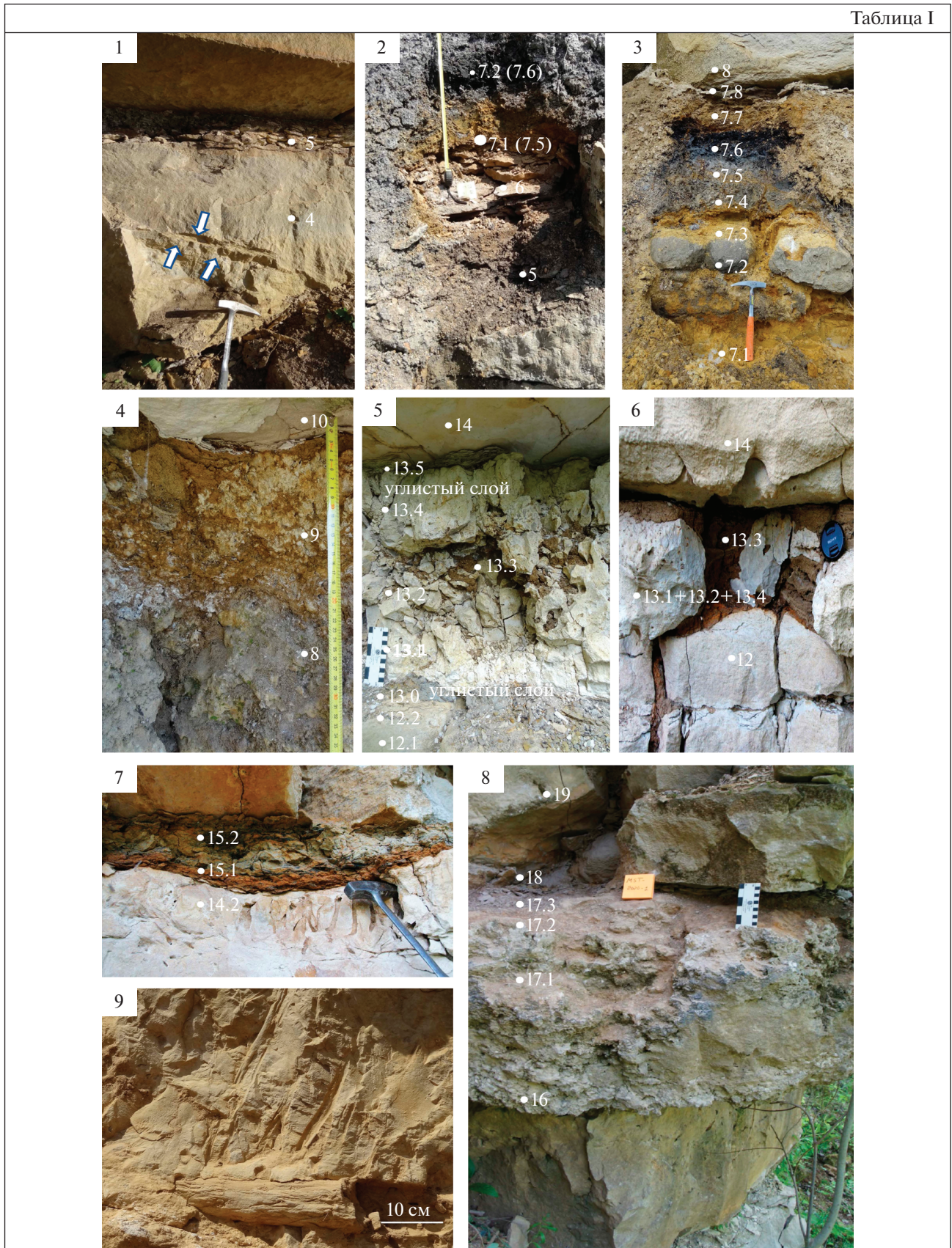
*Михайловский горизонт*

Слой 7 (2.6 м). Здесь слой представлен другими по сравнению с обнажением в т.н. 1 и с описаниями Мамонтова с соавторами (Mamontov et al., 2021) фациями и имеет большую мощность (табл. I, фиг. 3). В нижней обнаженной части залегают терригенные породы, представленные переслаиванием глины серой с песком. Видимая мощность этой части колонки составляет 40 см, ниже — осыпь. Слой 7.1 (мощность 1 м) — песок желтый, мелкозернистый, местами неравномерно ожелезнен, кровля сильно ожелезнена. Слой 7.2 — плита песчаника, разбитая на блоки, с невыдержанной мощностью (15–50 см), по-видимому размытая,

**Таблица I.** Полевые фотографии несогласий, вскрытых в разрезе.

1 — слои 4 и 5, граница алексинского и михайловского горизонтов (уровень MLU), стрелками обозначена стигмария; 2 — михайловский горизонт, слой 7 (уровень МН<sub>Т1</sub>), общий вид несогласия в т.н. 1; 3 — тот же уровень в т.н. 2; 4 — михайловский горизонт, слои 8–10; 5 — михайловский горизонт, сложное несогласие слоев 12 и 13, общий вид несогласия в т.н. 3; 6 — тот же уровень в т.н. 4; 7 — михайловский горизонт, общий вид несогласия слоев 14 и 15; 8 — кровля михайловского горизонта, слои 17–19 (уровень КНУ); 9 — *Stigmaria ficoides*, визейский ярус, Калужская область.

Таблица I



сохранена фрагментарно. Плиту перекрывает маломощный (5–6 см) слой рыхлого песка, также сильно ожелезненного (слой 7.3). Выше залегает слой глины сизой (слой 7.4), к кровле переходящей в углистую глину (слой 7.5), общей мощностью 30 см. Глина венчается слоем угля (слой 7.6) мощностью до 10 см. Выше залегает маломощный (первые см) слой коричневого суглинка (слой 7.7), перекрытый мергелем мелкослоистым, неравномерно ожелезненным, содержащим ракушечный бой (слой 7.8). Мощность мергеля около 20 см. Материал слоев 7.1–7.7 не содержит морской фауны. Глинистые отложения слоев 7.4–7.6 предположительно представляют собой торфяно-болотную палеопочву (гистосоль). В т.н. 1 эта палеопочва представлена слоям 7.1–7.2.

Слой 8 (видимая мощность 60 см). Известняк массивный, плотный, в его подошве – мостовая из раковин гигантопродуктид в прижизненном залегании. Кровля известняка брекчирована.

*Точка наблюдения 1* (54°34'58.2" с.ш.; 36°07'17.9" в.д.)

Слой 9 (20–30 см). Суглинок темно-коричневый, опесчаненный в подошве и более глинистый в кровле, содержащий карбонатные включения – желваки. Желваки плотные, неопределенной формы и разного размера (от первых мм до 2.5 см), распространены неравномерно, присутствуют в пределах всего слоя, но концентрация их в верхней части слоя выше (табл. I, фиг. 4).

*Точка наблюдения 3* (54°35'01.9" с.ш.; 36°07'06.6" в.д.)

Слой 10 (около 1.5 м). Известняк массивный.

Слой 11 (около 1.5 м). Песок желтый, сухой, рыхлый.

Слой 12 (около 4 м). Известняк бежевый, массивный, без признаков карста в кровле, венчающийся маломощным (2–3 см) слоистым оглиненным слоем с аппендиксами стигмарий, местами ожелезненным (слой 12.2).

Слой 13 (50 см). Центральная часть слоя представлена неравномерно закарстованным известняком. Нижние 10 см известняка не несут признаков растворения (слой 13.1). Максимально карст проявляется в центральной части слоя, на глубине 15 см от кровли (слой 13.2). Здесь карстовые полости заполнены темно-коричневой (2.5 Y 3/2) аллохтонной глиной (слой 13.3). Верхние 15 см карста сложены более мягким известняком (слой 13.4). Известняк пронизан корневыми каналами, ориентированными в разных направлениях; стенки каналов ожелезнены. В его кровле выделяется тонкий (до 5 мм) оглиненный углеродсодержащий слой. Перекрыт известняк маломощным (до 5 см) слоем тонкослоистого светло-серого аргиллита (слой 13.5). В подошве слоя 13 имеется маломощный (до 5 см) слой глины тяжелой, светло-серой, неравномерно ожелезненной (слой 13.0). В его кровле выделяется тонкий (первые мм) темный углистый слой. Слой 13, таким образом, представляет

собой сложное несогласие, сформированное в несколько этапов (табл. I, фиг. 5).

*Точка наблюдения 4* (54°35'02.0" с.ш.; 36°07'07.7" в.д.)

Слой 13 (30 см). В той же стенке карьера на расстоянии 50 м слой 13 представлен терригенным глинистым материалом, в котором хаотично располагаются куски известняка. Глина коричневая (2.5 Y 3/2), горизонтально- и волнисто-слоистая, ее слои имеют разную мощность, различаются по цвету (от темно-коричневых до серых), некоторые ожелезнены. Куски известняка крупные, диаметром до 60 см, формируют прерывистый слой. Куски имеют неправильную форму, округлые, с выраженными следами растворения и множественными корневыми каналами разного диаметра, разноориентированными. Большинство каналов полые, в некоторых находятся ризолиты, представляющие собой ожелезненные полые трубочки диаметром около 5 мм. Полагаем, что отложения данного слоя представляют собой *in situ* фрагменты сильно эродированной палеопочвы, сформированной на известковых породах, впоследствии погребенной в потоках аллохтонной глины (табл. I, фиг. 6).

Слой 14 (до 4 м). Известняк розоватый, массивный, плотный, твердый (слой 14.1) (табл. I, фиг. 7), в верхних 20–25 см переходящий в известняк сахаровидный, более легкий, мягкий, мучнистый, неравномерно ожелезненный (слой 14.2). Верхние 1.2 м известняка пронизаны редкими разнонаправленными отверстиями, доминируют вертикально ориентированные каналы. В плане отверстия округлые, приблизительно одного диаметра (до 5 мм). Данные ихнофоссилии отнесены к *Skolithos*, наличие которых указывает на прибрежную обстановку. В кровле отмечена высокая концентрация каналов большего диаметра (до 1 см), ориентированных преимущественно вертикально. На срезе в стенке карьера видно, что каналы в этой части разреза имеют длину до 15 см, сужаются книзу на конус. Каналы частично, в их верхней части, заполнены коричневым глинистым материалом из вышележащего слоя 15. Стенки каналов железнены. Данные ихнофоссилии, скорее всего, принадлежат к другому типу. Информация о них будет дана ниже.

Слой 15 (30 см). В кровле известняка залегает глина слоистая. Нижние 5 см – глина сильно ожелезненная (слой 15.1). Верхние 25 см – глина неоднородно окрашенная, серо-охристо-черная, содержащая включения углистого материала (слой 15.2) (табл. I, фиг. 7).

*Точка наблюдения 5* (54°34'54.0" с.ш.; 36°07'16.0" в.д.)

Слой 16 (видимая мощность 80 см). Известняк серый, очень прочный, массивный. До глубины около 60 см от его кровли располагаются отверстия неориентированные, неправильной формы и невыдержанного диаметра. Максимальная их

концентрация отмечена на глубине 30 см от кровли. Кровля слоя мелкобугристая.

Слой 17 (55 см). Брекчированный известняк (слой 17.1). Кровля бугристая, раскарстованная, ожелезненная. В кровле залегает маломощный (до 1 см) слой красноватой глины (слой 17.2). Этот материал заполняет также отверстия в кровле известняка. Материал слоя субаэрально преобразован (табл. 1, фиг. 8).

Слой 18 (3 см). Тонкослоистая глина (top-clay).

*Граница михайловского и венецкого горизонтов*

Слои 19, 20 и 21 (около 5 м). Известняки серые, массивные. В слое 21 встречаются конкреционные стяжения “венецкого” типа. Это кровля карьера. На ней развита современная почва под листовым лесом (преимущественно березовым).

### ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Химический состав приведен в табл. 1. Содержание карбонатов в известняках колеблется в пределах 83–98% (рис. 2). По данным рентгеновской дифрактометрии карбонаты всех стратиграфических уровней представлены кальцитом. Значение  $\delta^{13}\text{C}$  в известняках находится в пределах от  $-1.73$  до  $+1\text{‰}$  PDB, что характерно для морских карбонатных пород. Содержание карбонатов в терригенных слоях варьирует в широчайших пределах (1–93%, в среднем 25%). Карбонаты в терригенных слоях также представлены кальцитом.

Для оценки источника терригенного материала использовали отношение  $\text{Ti}/\text{Zr}$ . Для известняков оно колеблется в достаточно узких пределах и в среднем составляет 22, для кластогенных пород варьирует от 8 до 31. Низкие значения отмечены для отложений нижней части разреза (слои 7–13.0) независимо от гранулометрического состава пород. Выше наблюдается рост этого отношения, который может свидетельствовать о смене источника терригенного материала вверх по разрезу.

Важными индикаторами обстановок осадконакопления и интенсивности преобразования осадков в ходе выветривания являются Ga и отношение  $\text{Al}/\text{Ga}$ . Показано, что повышенные концентрации Ga ( $>1 \times 10^{-3}\%$ ) в осадке отражают его близость к источнику сноса (Акульшина, 1971, 1976).

Кривые распределения концентрации Ga и величины отношения  $\text{Al}/\text{Ga}$  в изученных образцах приведены на рис. 2. Значения отношения  $\text{Al}/\text{Ga}$  изменяются в очень широких пределах: от первых сотен для известняков до 15000 и более для терригенных пород. Детали поведения этого отношения для пород разного генезиса будут рассмотрены ниже. В качестве общего тренда можно отметить снижение величин отношения  $\text{Al}/\text{Ga}$  от подошвы михайловского горизонта к его кровле.

Такой тренд на фоне снижения величин отношения  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , характерных для гумидного климата (Акульшина, 1976), может быть объяснен разнородностью терригенного материала, слагающего разрез. Этот вывод подтверждается данными по поведению отношения  $\text{Ti}/\text{Zr}$ .

Таким образом, для выявленных на основании морфологических особенностей уровней перерывов в морском осадконакоплении характерен комплекс геохимических критериев, подтверждающих их континентальный генезис и уточняющий обстановку осадконакопления. В дополнение к вышесказанному, представленные в табл. 1 данные химического состава показали, что для терригенных отложений, помимо Si и Al, характерны также повышенные концентрации таких элементов, как Fe, Ti, Mg, K, Na, Zr, P, тяжелых металлов Ni, Pb, Zn. Кровли известняков слоев 12 и 14 с признаками произрастания древовидных плауновидных (стигмариий) несколько обогащены Si, Al, Fe, K, Mn.

### СТИГМАРИИ И ДРУГИЕ ОСТАТКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Наиболее характерной для визейского времени и получившей широкое распространение на территории Подмосковного осадочного бассейна растительностью являются древесные плауновидные. Особенности строения древесины этих растений объясняют их плохую сохранность и, как следствие, редкость находок (Мосейчик, 2009). Одна из последних – фертильная ветвь *Lepidodendron obovatum* Sternberg, недавно обнаруженная в отложениях визейского яруса на территории Калужской области (Naugolnykh, Kokina, 2021). Основным свидетельством присутствия древовидных плауновидных являются фоссилизированные остатки их подземных побегов – ризофоров типа *Stigmara*. В отложениях карьера Мстихино распространение получили *Stigmara ficoides*. Стигмариий чаще всего встречаются в слоях мелководных известняков как в кровле, так и на заметных глубинах (до 50 см). Так называемые “стигмариевые известняки” – уникальный тип захоронений, характерный для визейских отложений Подмосковного бассейна (Мосейчик, 2009). Формы, в которых стигмариий сохраняются в известняках, – это отпечатки и слепки, сложенные кальцитом (табл. 1, фиг. 1, 9) (Алексеева, 2020б). В терригенных слоях стигмариий встречаются реже и, как правило, в виде ожелезненных аппендиксов или их отпечатков.

Высокое биоразнообразие выявлено в углистой глине слоя 7, о чем говорилось выше. Органические остатки здесь представлены микрофоссилиями разной степени сохранности и комплексом спор. Среди них достаточно определенно выявлено мохоподобное растение *Mstikhinia du-*

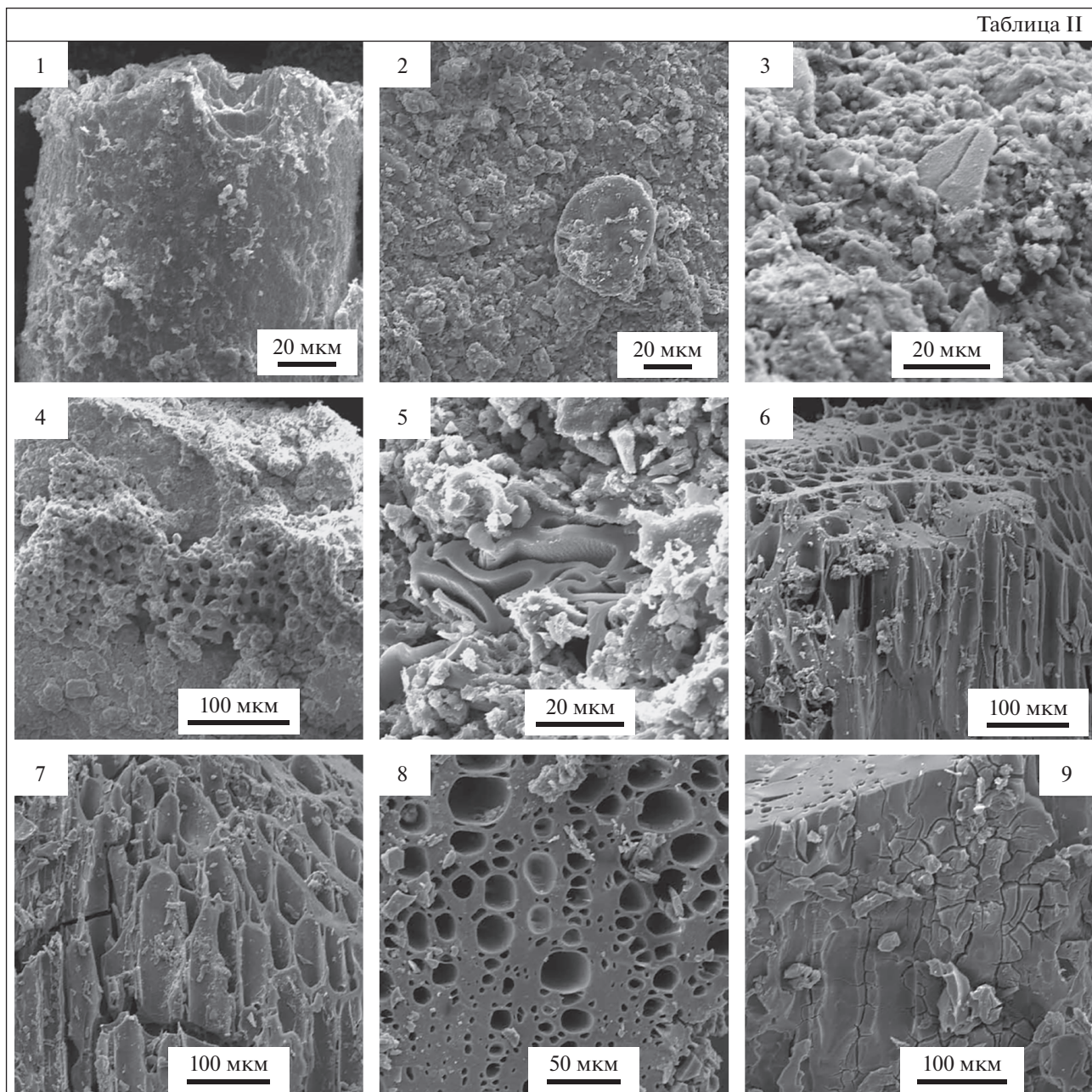
Таблица 1. Данные элементного анализа (XRF), %

Образец/ Слой	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Rb	Ba	Sr
19	0.52	54.62	0.31	0.29	0.08	0.03	0.05	0.37	0.02	0.03	0.040	0.0007	0.0380	0.0575
18	0.29	53.83	0.22	0.42	0.08	0.03	0.07	0.35	0.02	0.04	0.043	0.0007	0.0359	0.0630
17/2	1.25	53.17	0.43	1.05	0.08	0.05	0.08	0.27	0.05	0.04	0.023	0.0009	0.0380	0.0448
17/1	1.05	52.82	0.42	1.28	0.08	0.04	0.03	0.26	0.03	0.05	0.037	0.0010	0.0347	0.0418
16/2	0.22	53.55	0.19	1.04	0.08	0.04	0.06	0.35	0.02	0.05	0.033	0.0008	0.0353	0.0500
16/1	0.54	52.88	0.32	0.89	0.08	0.03	0.09	0.29	0.04	0.05	0.059	0.0006	0.0373	0.0801
15/2	53.68	1.45	12.66	5.95	1.14	0.01	0.35	1.73	2.06	0.06	0.005	0.0093	0.0240	0.0081
15/1	39.51	1.52	8.56	22.32	0.72	0.09	0.23	0.86	1.44	0.22	0.019	0.0045	0.0645	0.0026
14/2	1.36	52.69	0.43	1.52	0.09	0.06	0.05	0.39	0.09	0.05	0.037	0.0010	0.0433	0.0587
14/1	0.33	52.81	0.20	0.22	0.08	0.04	0.03	0.39	0.04	0.05	0.033	0.0012	0.0272	0.0386
13/5	1.69	53.13	0.52	0.46	0.09	0.04	0.10	0.33	0.20	0.04	0.051	0.0006	0.0424	0.0739
13/4	0.53	53.36	0.25	0.53	0.08	0.05	0.04	0.36	0.03	0.04	0.028	0.0005	0.0397	0.0886
13/3	38.57	2.95	12.11	11.55	0.79	0.80	0.97	0.48	1.35	0.22	0.022	0.0089	0.0916	0.0092
13/2	0.10	52.83	0.16	0.23	0.08	0.04	0.02	0.25	0.01	0.04	0.026	0.0004	0.0337	0.0773
13/1	0.73	52.80	0.36	1.75	0.08	0.03	0.04	0.40	0.03	0.11	0.031	0.0001	0.0427	0.1814
13/0	2.17	50.52	0.64	4.08	0.09	0.03	0.08	0.20	0.04	0.47	0.055	0.0001	0.0384	0.2809
12/2	6.37	48.91	1.89	4.70	0.10	0.06	0.03	0.77	0.34	0.14	0.046	0.0018	0.0332	0.0407
12/1	3.15	52.86	0.97	0.61	0.08	0.07	0.11	0.43	0.16	0.99	0.041	0.0009	0.0378	0.0467
11	70.79	0.35	9.37	1.21	0.60	0.02	0.36	0.18	1.98	0.03	0.002	0.0030	0.0110	0.0020
9	32.10	25.96	8.69	7.82	0.33	0.11	0.49	0.34	2.12	0.15	0.033	0.0038	0.0030	0.0280
8	0.56	52.03	0.21	1.06	0.08	0.06	0.04	0.25	0.02	0.04	0.060	0.0009	0.0333	0.0434
7/8	5.19	47.28	2.03	7.60	0.13	0.06	0.05	0.17	0.25	0.15	0.064	0.0011	0.0528	0.0469
7/7	18.64	4.51	5.75	44.38	0.31	0.04	0.14	0.05	0.05	0.27	0.143	0.0019	0.1191	0.0014
7/6	24.74	19.26	9.70	11.79	0.78	0.01	0.21	0.25	0.72	0.10	0.772	0.0023	0.0452	0.0164
7/5	53.28	1.15	19.22	2.69	1.35	0.02	0.24	0.41	2.27	0.03	0.044	0.0107	0.0391	0.0058
7/4	67.45	0.49	13.04	3.99	1.03	0.01	0.35	0.37	1.78	0.06	0.010	0.0046	0.0210	0.0018
7/3	76.69	0.14	4.30	1.34	0.44	0.00	0.20	0.04	0.89	0.03	0.005	0.0021	0.0020	0.0010
7/2	50.54	2.05	4.87	15.01	0.46	0.07	0.23	0.15	1.09	0.08	0.013	0.0027	0.0356	0.0011
7/1	80.26	0.43	4.65	1.00	0.32	0.02	0.31	0.26	1.22	0.02	0.003	0.0013	0.0030	0.0004
5	13.20	45.59	4.39	2.90	0.25	0.05	0.01	0.85	0.39	0.02	0.058	0.0023	0.0280	0.0587

Таблица 1. Окончание

Образец/ Слой	Zr	Ga	Mo	Ni	Pb	Zn	Sn	Co	Cr	Cu	Cs	Sc	Y	Yb
19	0.0022	0.0005	0.0002	0.0028	0.0005	0.0002	0.0002	0.0003	0.0102	0.0013	0.0001	0.0029	0.0006	0.0002
18	0.0021	0.0004	0.0002	0.0028	0.0005	0.0003	0.0001	0.0004	0.0115	0.0018	0.0001	0.0029	0.0004	0.0002
17/2	0.0023	0.0004	0.0002	0.0039	0.0005	0.0009	0.0001	0.0005	0.0093	0.0021	0.0001	0.0028	0.0004	0.0002
17/1	0.0019	0.0004	0.0002	0.0036	0.0005	0.0006	0.0001	0.0006	0.0083	0.0009	0.0001	0.0028	0.0006	0.0002
16/2	0.0020	0.0004	0.0002	0.0043	0.0005	0.0009	0.0001	0.0005	0.0112	0.0020	0.0001	0.0029	0.0007	0.0002
16/1	0.0026	0.0004	0.0002	0.0036	0.0005	0.0008	0.0001	0.0004	0.0177	0.0041	0.0001	0.0029	0.0005	0.0002
15/2	0.0319	0.0021	0.0007	0.0054	0.0069	0.0066	0.0025	0.0021	0.0127	0.0017	0.0003	0.0009	0.0032	0.0004
15/1	0.0140	0.0010	0.0009	0.0199	0.0003	0.0034	0.0015	0.0015	0.0268	0.0008	0.0004	0.0029	0.0030	0.0003
14/2	0.0024	0.0004	0.0002	0.0047	0.0005	0.0004	0.0001	0.0007	0.0130	0.0021	0.0001	0.0029	0.0008	0.0002
14/1	0.0018	0.0005	0.0002	0.0031	0.0005	0.0007	0.0002	0.0003	0.0076	0.0008	0.0001	0.0029	0.0005	0.0002
13/5	0.0026	0.0005	0.0002	0.0032	0.0005	0.0025	0.0001	0.0004	0.0145	0.0026	0.0001	0.0030	0.0008	0.0002
13/4	0.0029	0.0004	0.0002	0.0037	0.0005	0.0022	0.0001	0.0004	0.0078	0.0010	0.0001	0.0029	0.0002	0.0002
13/3	0.0162	0.0016	0.0005	0.0323	0.0018	0.0601	0.0017	0.0019	0.0214	0.0077	0.0003	0.0021	0.0036	0.0004
13/2	0.0022	0.0004	0.0002	0.0031	0.0005	0.0006	0.0001	0.0003	0.0060	0.0006	0.0001	0.0028	0.0007	0.0002
13/1	0.0041	0.0004	0.0001	0.0041	0.0005	0.0025	0.0000	0.0006	0.0096	0.0012	0.0001	0.0029	0.0007	0.0002
13/0	0.0064	0.0003	0.0002	0.0049	0.0005	0.0058	0.0000	0.0012	0.0115	0.0023	0.0001	0.0029	0.0002	0.0002
12/2	0.0024	0.0003	0.0003	0.0064	0.0008	0.0050	0.0003	0.0014	0.0201	0.0014	0.0001	0.0028	0.0011	0.0002
12/1	0.0019	0.0003	0.0002	0.0042	0.0006	0.0006	0.0001	0.0005	0.0082	0.0014	0.0001	0.0029	0.0022	0.0002
11	0.0234	0.0006	0.0005	0.0011	0.0018	0.0021	0.0027	0.0025	0.0043	0.0005	0.0003	0.0005	0.0030	0.0004
9	0.0150	0.0005	0.0005	0.0228	0.0360	0.0171	0.0017	0.0017	0.0043	0.0120	0.0003	0.0038	0.0030	0.0003
8	0.0019	0.0003	0.0002	0.0027	0.0005	0.0004	0.0001	0.0005	0.0078	0.0003	0.0001	0.0028	0.0012	0.0002
7/8	0.0033	0.0005	0.0002	0.0047	0.0006	0.0024	0.0001	0.0020	0.0177	0.0017	0.0001	0.0028	0.0029	0.0002
7/7	0.0086	0.0001	0.0005	0.0134	0.0003	0.0035	0.0011	0.0012	0.0432	0.0092	0.0006	0.0054	0.0034	0.0002
7/6	0.0289	0.0024	0.0003	0.0251	0.0087	0.0125	0.0061	0.0016	0.0363	0.0454	0.0005	0.0054	0.0054	0.0001
7/5	0.0390	0.0022	0.0004	0.0028	0.0007	0.0041	0.0077	0.0018	0.0096	0.0024	0.0004	0.0004	0.0024	0.0000
7/4	0.0439	0.0015	0.0006	0.0033	0.0037	0.0027	0.0026	0.0022	0.0084	0.0013	0.0003	0.0006	0.0031	0.0004
7/3	0.0234	0.0005	0.0003	0.0011	0.0022	0.0001	0.0095	0.0018	0.0012	0.0002	0.0004	0.0011	0.0007	0.0000
7/2	0.0239	0.0019	0.0003	0.0045	0.0035	0.0001	0.0061	0.0014	0.0080	0.0013	0.0005	0.0018	0.0008	0.0000
7/1	0.0191	0.0003	0.0005	0.0011	0.0002	0.0010	0.0030	0.0024	0.0015	0.0006	0.0003	0.0001	0.0029	0.0005
5	0.0050	0.0002	0.0002	0.0041	0.0009	0.0006	0.0002	0.0009	0.0079	0.0006	0.0001	0.0027	0.0011	0.0002

Таблица II



**Таблица II.** Микрофоссилии в терригенных частях изученных несогласий (данные РЭМ).

1–3 – слой 5, растительный детрит (1) и споры (2, 3); 4–5 – слой 7.6, углефицированная глина; 4, 5 – неопределенные растительные остатки; 6–9 – *Mstikhinia durantee* gen. et sp. nov.

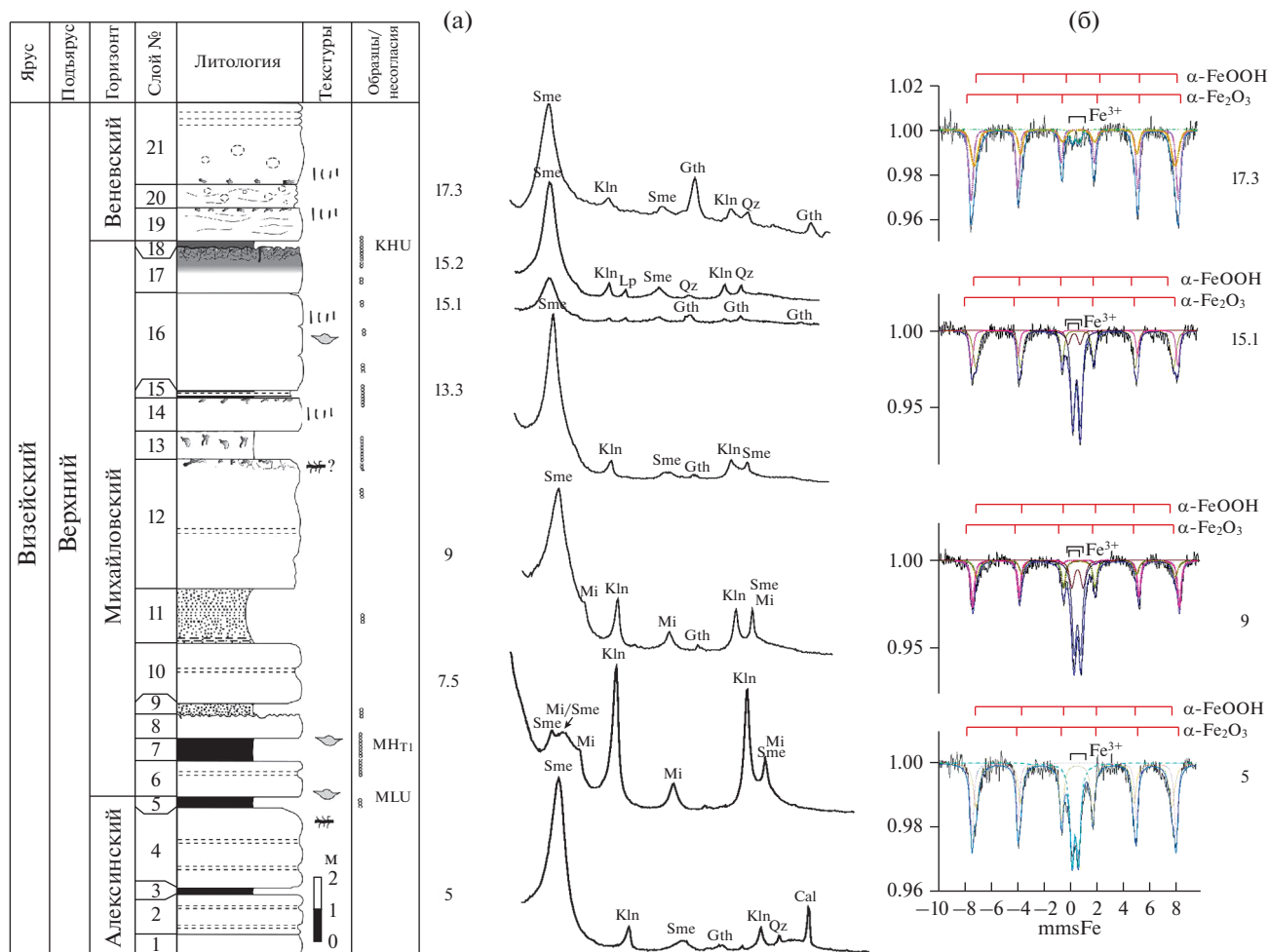
*durantee* gen. et sp. nov., описанное ранее Мосейчик (Mosseichik et al., 2007). Идентификация других остатков не проведена (табл. II, фиг. 4–9).

#### НЕСОГЛАСИЯ И ПАЛЕОПОЧВЫ: БАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА, БИОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ

Как следует из описания, приведенного выше, в работе с разной степенью детальности изучены

несогласия на 6 стратиграфических уровнях, три из которых были описаны ранее в других карьерах Подмосковского осадочного бассейна (Кабанов et al., 2013; Alekseeva et al., 2016). В статье использованы индексы этих несогласий, предложенные П.Б. Кабановым (Кабанов et al., 2013).

**Кровля алексинского горизонта, слой 5 (MLU).** Маломощный карбонатный пылеватый суглинок, подстилаемый известняком, разбитым на плитки, и заполняющий промежутки между плитками



**Рис. 3.** (а) Рентгенодифрактограммы образцов илистой фракции терригенных отложений (Mg-форма, воздушно-сухие препараты) и (б) мессбауэровские спектры этих образцов, снятые при температуре 85 К. Сокращения: Sme – смектит, Kln – каолинит, Mi – слюда, Gth – гетит, Lp – лепидокрокит, Qz – кварц, Cal – кальцит, Fsp – полевые шпаты. Условные обозначения см. рис. 2.

(табл. I, фиг. 1). Содержание фракции пыли в суглинке составляет 59%, глины 8%, песка 33%. Преобладает фракция крупной пыли. Благодаря включениям плиток известняка и боя раковин моллюсков, содержание карбонатов высокое – до 72% (рис. 2). Изотопный состав углерода карбонатов типично морской ( $\delta^{13}C = -0.87 \pm 0.16\text{‰}$ ). В минеральном составе суглинка (валовой образец) доминирует кальцит, присутствуют кварц и смектит. В составе илистой фракции преобладает смектит, представленный низзарядным бейделлитом, в заметном количестве содержится каолинит, а также следы гетита (рис. 3а). Как было показано ранее, смектитовый и практически мономинеральный состав илов является характерной особенностью палеопочв визейского яруса на территории Подмосквовного осадочного бассейна (Alekseeva et al., 2016). Материал относительно железнен (2.90%  $Fe_2O_3$ ). По данным мессбауэ-

ровской спектроскопии железо сосредоточено в оксидах/гидроксидах и представлено супердисперсными формами гематита ( $\alpha-Fe_2O_3$ ) и гетита ( $\alpha-FeOOH$ ) с преобладанием гетита (величина отношения гематит/гетит составляет 0.65) (рис. 3б). Нахождение Fe в окисленных формах свидетельствует в пользу субаэральных обстановок, а наличие двух фаз исключает глубокие диагенетические преобразования материала (Kraus, Nasiat, 2006). Исходя из наличия многочисленных фрагментов *Stigmara ficoides* в подстилающем известняке слоя 4 в их естественном преимущественно горизонтальном и слабонаклонном залегании, сделано заключение, что территория представляла собой прибрежную зону, густо заселенную древесной лепидодендроновой растительностью, периодически затопливаемую морем. Содержание органического C в суглинке составляет 0.3%. Изучение материала методом РЭМ показало наличие в нем растительных фрагментов хорошей сохран-

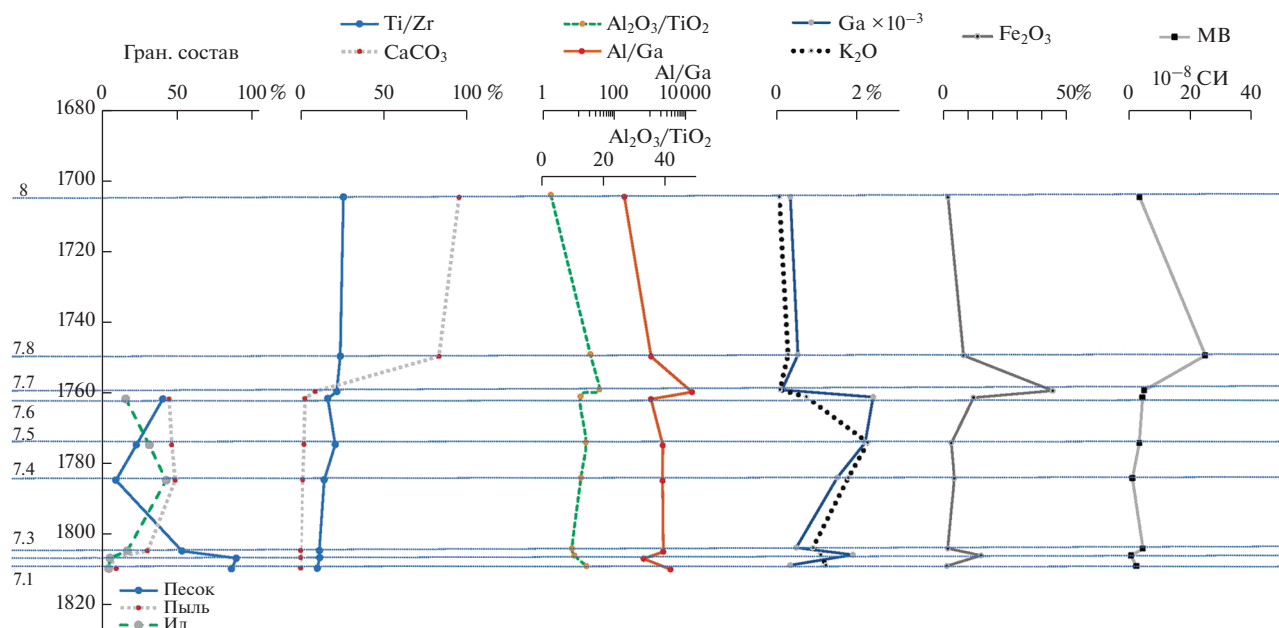


Рис. 4. Некоторые аналитические характеристики отложений слоя 7.

ности и спор (табл. II, фиг. 1–3). Отсутствие следов органогенного горизонта в кровле слоя 5 позволяет предположить, что палеопочва, скорее всего, эродирована.

**Михайловский горизонт, слой 7 (МН<sub>Т1</sub>).** Это первый (нижний) уровень в пределах михайловского горизонта, сложенный обломочным материалом. Литологическое описание отложений этого уровня дано выше. Описание и некоторые аналитические характеристики отложений этого уровня, изученных в других карьерах Подмосквового бассейна, приведены в работах (Alekseev et al., 2015; Kabanov et al., 2016a). Отложения слоев 7.1–7.6 практически бескарбонатные, содержание CaCO<sub>3</sub> не превышает 2% (рис. 4). На основе морфологических особенностей (табл. I, фиг. 3) и представленных на рис. 4 аналитических характеристик, отложения данного уровня разбиты на 4 части. Снизу вверх обнажены: подстилающие палеопочву опесчаненные отложения (слои 7.1–7.3), палеопочва (слои 7.4–7.6), определенная как болотная почва (гистосоль) на аллювиально-озерных отложениях. Выше залегает маломощный слой сильно ожелезненного пылеватого слабокарбонатного суглинка (слой 7.7), перекрываемый мергелем (слой 7.8).

Палеопочва мощностью около 40 см имеет хорошо сохранившийся профиль, включая органогенный горизонт общей мощностью не менее 20 см. Содержание C<sub>орг</sub> в нем превышает 21%. Материал обогащен серой. Профиль палеопочвы текстурно дифференцирован по иллювиальному типу с максимумом (42% глины) в центральной

части профиля. Величины магнитной восприимчивости и содержание валового железа низкие, имеют небольшой максимум в верхнем органогенном горизонте и плавно снижаются с глубиной.

Результаты изучения минерального состава отложений слоя 7 даны на рис. 5. В глине, на которой развита палеопочва, преобладающим слоистым силикатом является каолинит, что отличает этот уровень от остальных терригенных слоев в этом карьере, где преобладающим глинистым минералом являются минералы смектитовой группы. Горизонты палеопочвы различаются по минеральному составу. Сизая глина в основании профиля (слой 7.4) помимо кварца, полевого шпата и каолинита содержит иллит. Минеральная составляющая углистого слоя 7.6 в кровле палеопочвы представлена кварцем, полевым шпатом, каолинитом и гетитом. Наиболее сложный состав имеет глина слоя 7.5. Здесь помимо каолинита и иллита присутствует смектит и смешанослойная фаза, состоящая из слоев иллита и смектита. Смектитовая фаза представлена высозарядным бейделлитом и, скорее всего, является продуктом трансформации иллита.

Перекрывающий палеопочву маломощный легкий суглинок (слой 7.7) слабокарбонатный, сильно обогащен железом и органическим углеродом (C<sub>орг</sub> = 6.6%), демонстрирует рост величины МВ. Величина отношения Al/Ga превышает все остальные значения, полученные для данного разреза. Таким образом, по гранулометрическому, минеральному и химическому составу отложения

этого уровня генетически не связаны ни с ниже-лежащими, ни с вышележащими отложениями.

Несмотря на то что фациальные различия отложений, слагающих это несогласие, отмечаются как на заметных расстояниях (карьер Полотняный Завод, Калужская обл.), так и в пределах Мстихинского карьера (Mosseichik et al., 2007; Alekseev et al., 2015; Alekseeva et al., 2016; Kabanov et al., 2016a; Mamontov et al., 2021), этот уровень морфологически узнаваем по опесчаненной нижней части несогласия и углистому слою (торфянистой палеопочве) в кровле. Важнейшим аналитическим признаком палеопочвы является ее характерный минеральный состав: каолинит–иллит–сметтит (бейделлит) и наличие смешанослойной фазы иллит/сметтит.

Изучение углистого вещества палеопочвы (слой 7.6) показало, что значение  $\delta^{13}\text{C}$  в нем составляет в среднем  $-22.59 \pm 0.17\text{‰}$ , что типично для наземных растений с C3-типом фотосинтеза, в том числе и в каменноугольное время (Auras et al., 2006; Peters-Kottig et al., 2006). Легкий изотопный состав углерода растений этого типа обусловлен прямой фиксацией  $\text{CO}_2$  из воздуха атмосферы. C3-растения первыми появились на Земле и доминируют поныне, составляя около 95% растительной биомассы. Результаты изучения этого материала методом электронной микроскопии даны в табл. II (фиг. 4–9). Материал обогащен растительным детритом, который принадлежит разным видам. Остатки (табл. II, фиг. 6–9) предположительно отнесены к мохоподобному растению *Mstikhinia durantae* gen. et sp. nov., ранее описанному здесь Мосейчик с соавторами (Mosseichik et al., 2007). В материале этого слоя Мосейчик (2009) диагностировала остатки *Stigmaria ficoides*. Мамонтов с соавторами (Mamontov et al., 2021) выделили из слоя 7 карьера Мстихино комплекс спор, указывающий на биозону *Tripartites vetustus*. Этими авторами в пределах данного слоя был обнаружен и описан новый род *Maiaspora* gen. nov. Вся полученная информация позволяет сделать вывод о большом разнообразии растительности, под влиянием которой сформировалась данная палеопочва.

**Михайловский горизонт. Слой 9.** Маломощный тяжелый суглинок (содержание ила 26%) коричневатый (10 YR 4/6), сыпучий, карбонатный, с низким содержанием  $\text{C}_{\text{орг}}$  ( $<0.1\%$ ). В минеральном составе преобладает смектит, представленный смесью высокозарядного бейделлита и низкозарядного монтмориллонита. Дополнительно присутствуют каолинит и слюда (в следовых количествах) (рис. 3а). Помимо Si и Al суглинок обогащен Fe (7.8%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Mg, Mn, K, Na, P, Zr и тяжелыми металлами (Cu, Ni, Pb, Zn). Оцененная по величине отношения Al/Ga интенсивность выветривания ( $\sim 4600$ ) материала свидетельствует о достаточно

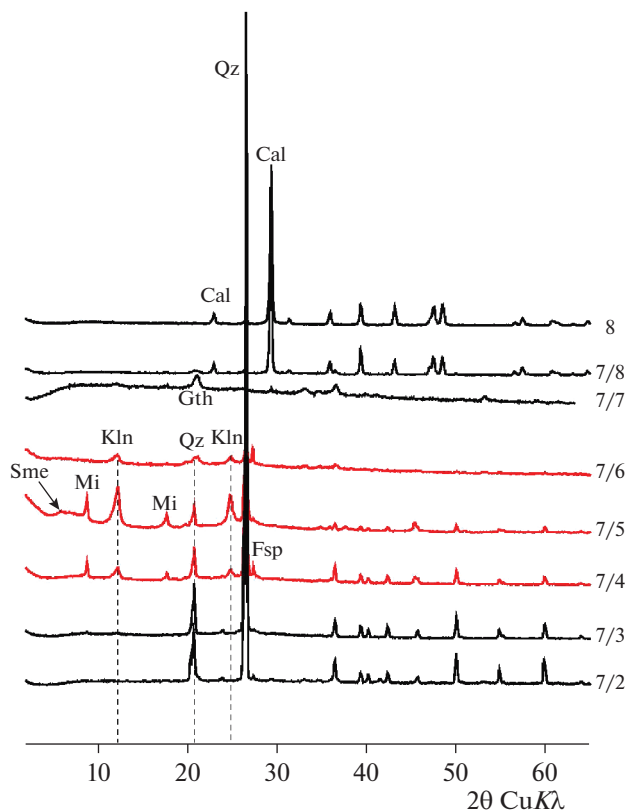


Рис. 5. Рентгенодифрактограммы образцов отложений, слагающих несогласие  $\text{MN}_{\text{T}1}$  (слой 7). Сокращения см. рис. 3.

глубоком его преобразовании (рис. 2). Микрофотографии в табл. III демонстрируют изменения поверхностей минеральных зерен в ходе выветривания, их растворение и перекристаллизацию. В массе суглинка обнаружены редкие споры и обрывки растительных тканей (табл. III, фиг. 1–4).

Результаты изучения соединений железа методом мессбауэровской спектроскопии показали, что железо сосредоточено в оксидах и представлено супердисперсными кристаллитами гематита и гетита с преобладанием гематита (величина отношения гематит/гетит составляет 1.16) (рис. 3б). Такое соотношение фаз может свидетельствовать в пользу относительно аридных условий и повышенных температур. Аридным обстановкам отвечает также величина отношения  $\text{Al/Ti} > 26$  (Акульшина, 1976). Отражением аридности является и наличие карбонатных новообразований — желваков с облегченным изотопным составом углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -5.54 \pm 1.27\text{‰}$  PDB). Такие значения  $\delta^{13}\text{C}$  характерны для типично почвенных карбонатов, сформированных при участии  $\text{CO}_2$  атмосферы. Важно заметить, что слой 9 изученного карьера — единственный стратиграфический уровень, отложения которого содержат педогенные карбонатные новообразования. Особенно

Таблица III

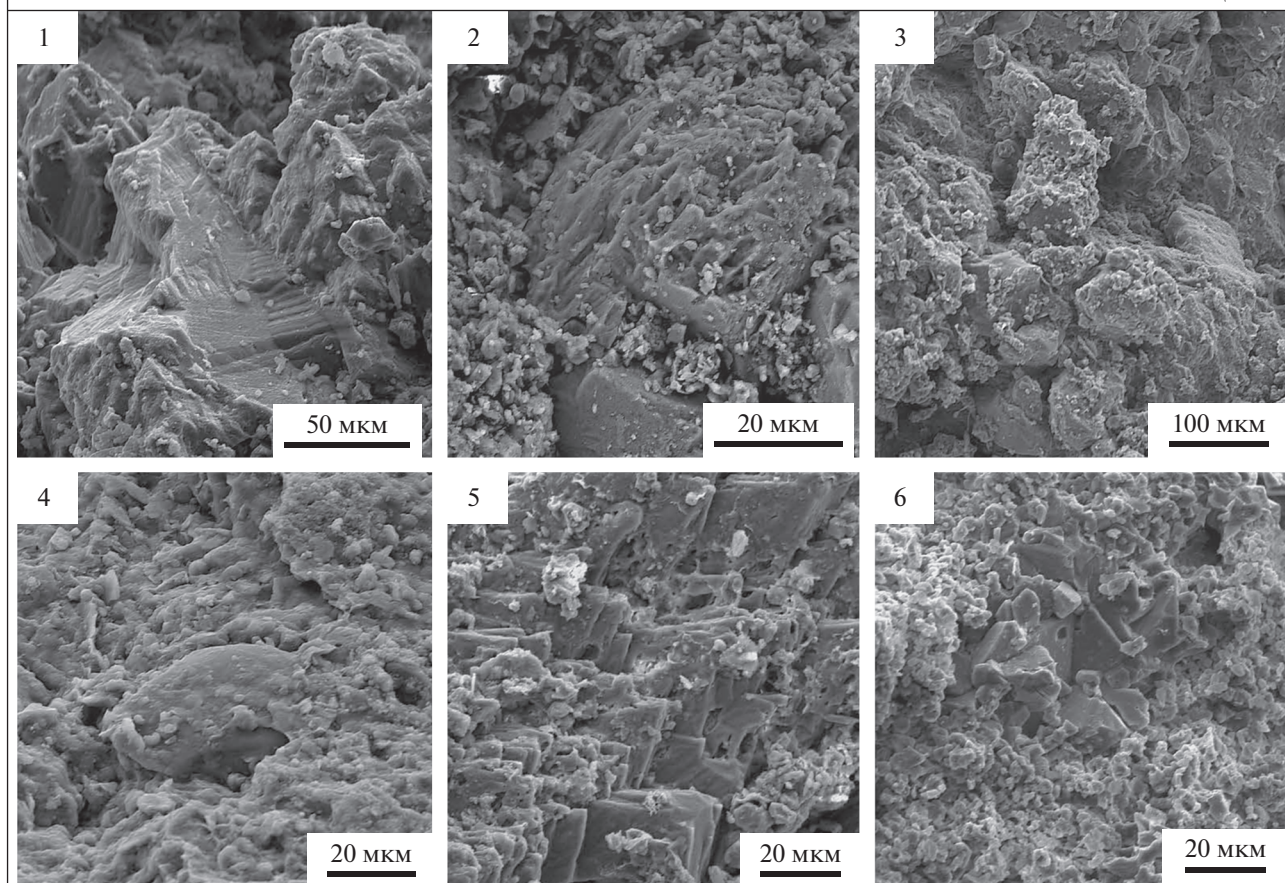


Таблица III. Микростроение материала слоя 9 (данные РЭМ).

1–3 – выветривание зерен первичных минералов; 4 – спора; 5, 6 – морфология кристаллов кальцита, слагающих карбонатные желваки.

сти микростроения желваков показаны в табл. III (фиг. 5, 6). Они сложены двумя морфологическими разновидностями кальцита: щетками шестоватых кристаллов со следами растворения и колломорфной массой (микритовым кальцитом). Такие особенности кальцита свидетельствуют в пользу сезонности климата. В химическом составе обеих разновидностей отсутствуют примеси (данные SEM-EDX).

**Михайловский горизонт. Слои 12 и 13.** Кровля известняка слоя 12 не имеет признаков карста, но выглядит денудированной, с выраженным рельефом. Верхняя часть (2–3 см) тонкослоистая, мягкая, ожелезненная, с многочисленными отпечатками аппендиксов стигмарий (слой 12.2) (табл. I, фиг. 5). Слой 13 мощностью около 50 см представляет собой сложное несогласие. Описание слагающих его отложений дано выше.

Некоторые аналитические характеристики отложений, слагающих данный интервал разреза, даны на рис. 6. Комплекс полученных данных, наряду с морфологическими особенностями, позволяет заключить, что развитое здесь несогласие представлено педокомплексом, включающим, по-

димому, 3 палеопочвы. Кровля слоя 12 – сохранившаяся часть палеопочвы маршевого типа на морском известняке. Для нее характерно снижение содержания карбонатов (с 92 до 87%), рост содержания  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в 2 раза по сравнению с нижележащим известняком), рост  $\text{K}_2\text{O}$ . Отмечен также незначительный рост содержания  $\text{MgO}$  и  $\text{Ni}$ . В 8 раз возрастает содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4.70%) по сравнению с таковым в нижележащем известняке (0.61%). Рост содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  сопровождается некоторым приростом величины МВ. Ожелезнение кровли слоя отчасти связано с присутствием многочисленных стигмарий и их аппендиксов. Железо представлено гетитом, имеющим облик ячеистых конкреций, которые, как правило, приурочены к органическим остаткам (табл. IV, фиг. 1). Интенсивность преобразованности материала, выражаемая через величину отношения  $\text{Al/Ga}$ , составляет 1700, что превышает значения, полученные для других субаэрально преобразованных морских известняков. Такое значение величины  $\text{Al/Ga}$  сравнимо скорее со значениями, полученными для терригенных отложений (рис. 6). Ком-

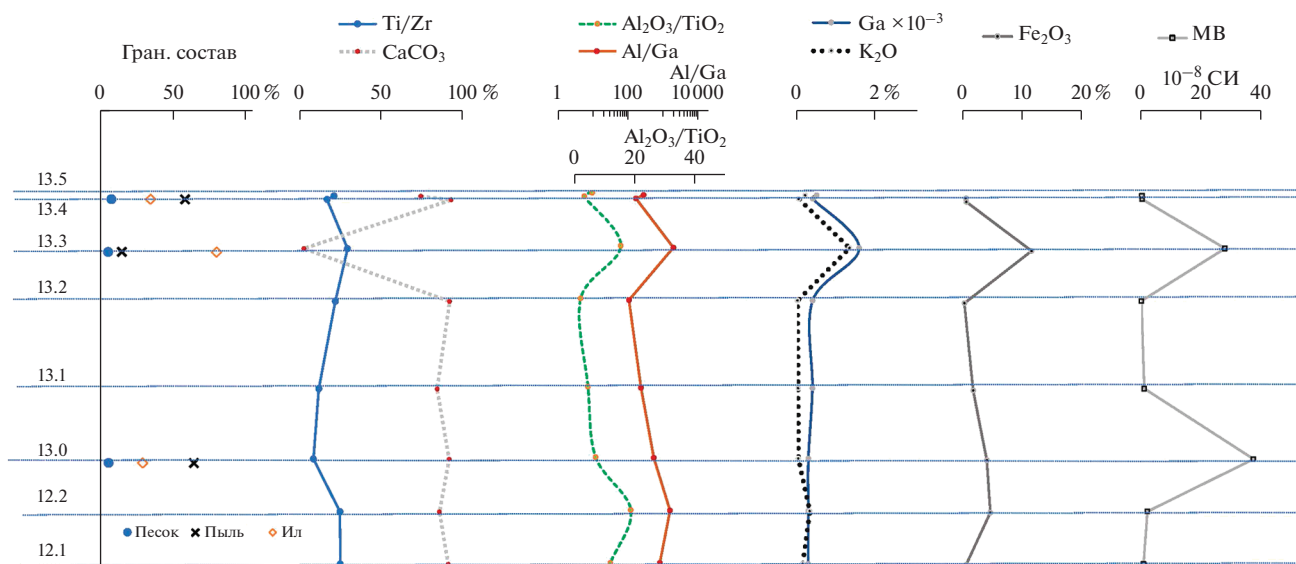


Рис. 6. Некоторые аналитические характеристики отложений слоев 12 и 13.

плекс геохимических критериев не вызывает сомнений в почвенной природе материала, слагающего эту часть несогласия. Обнаруженные органические остатки микроскопической размерности характеризуются плохой сохранностью. В материале присутствуют многочисленные споры (табл. IV, фиг. 2–4). Упомянутый выше факт снижения содержания карбонатов имеет морфологические проявления преобразованности морской хемогенно-осадочной породы. Основная масса карбонатов из кровли представлена колломорфным кальцитом. Наряду с ним выявлены различные кристаллические разновидности вторичного кальцита, в том числе игольчатый кальцит (табл. IV, фиг. 5, 6). Последний формирует сноповидные кластеры, собранные из параллельно ориентированных игл диаметром  $\sim 1$  мкм. Не существует однозначного мнения о природе такого кальцита. Исследователи связывают его происхождение с кристаллизацией из сильно пересыщенных растворов либо с биологическими факторами — минерализацией грибного мицелия, микрофибровых корневых тканей и др. (Wright, 1994).

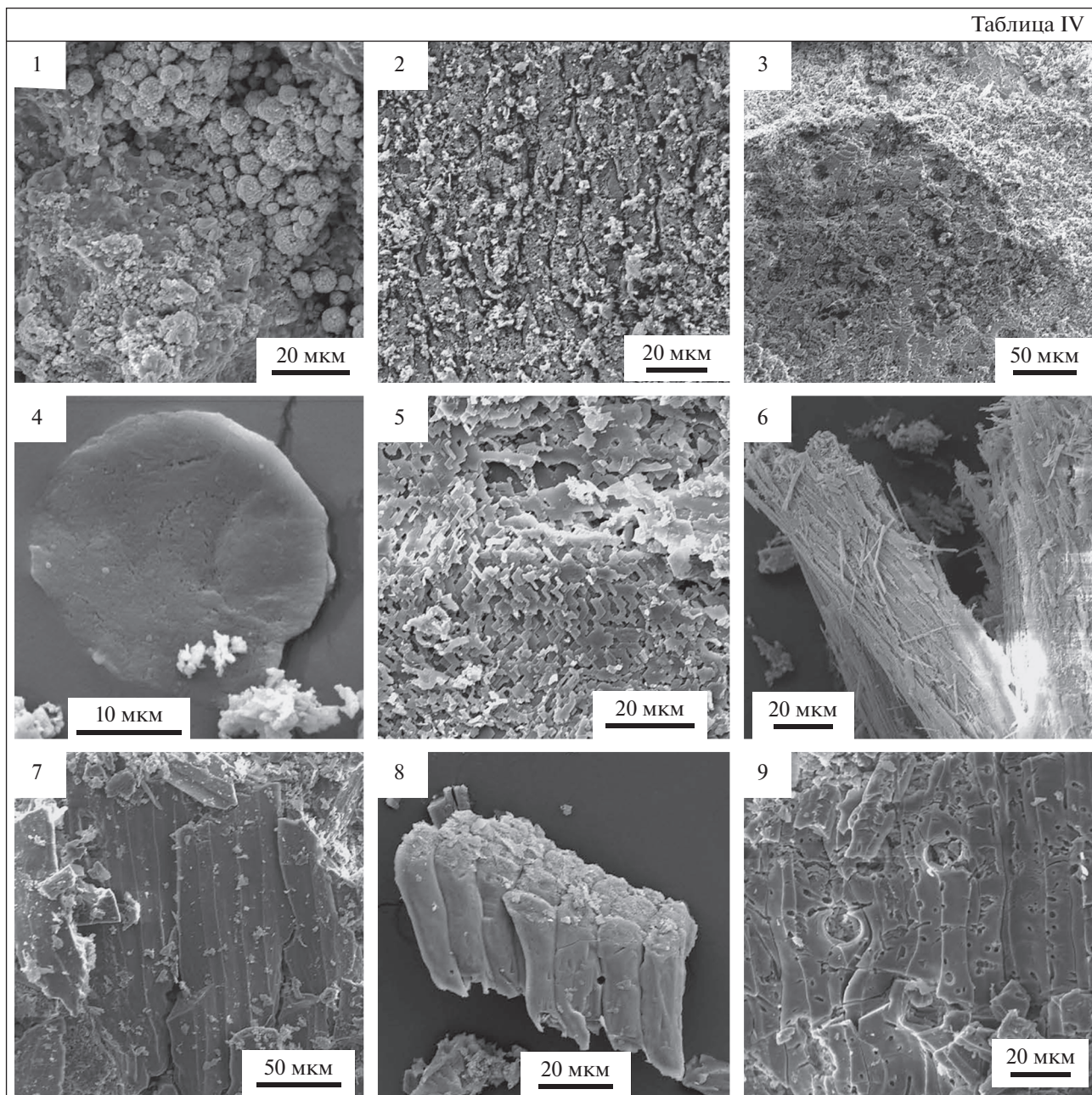
Вторая составляющая этого несогласия (слой 13.0) — маломощный легкий карбонатный суглинок с тонким (до 1 см) углистым слоем в кровле. Последний обогащен глиной (29% против 19% в суглинке) и органическим веществом (3.5%  $C_{орг}$ ). В минеральном составе помимо кальцита содержатся смектит, гетит и следы кварца. Гетит представлен ячеистыми конкрециями. По данным РЭМ в образцах дополнительно содержится пирит, представленный крупными (10 мкм и более) правильными октаэдрами. Минералы железа приурочены к органическим остаткам. Последние характеризуются плохой сохранностью.

Для этой части колонки характерны самые высокие значения MB, составляющие 35–38 ед. СИ. Рост величины MB и гетитовый состав однозначно свидетельствуют о субаэральных обстановках формирования этой части разреза (рис. 6). Пиритовая составляющая сформировалась, по-видимому, позднее — на стадии затопления территории в ходе очередной морской трансгрессии. Эта часть комплекса отнесена к пионерной (инициальной) палеопочве.

Третья, основная, составляющая комплекса — палеопочва на морском известняке, вторично закарстованном. Изучение свойств материала, заполняющего полости карста, показало его аллохтонную природу. Значения величин отношений Ti/Zr и Al/Ga свидетельствуют о том, что материал сформирован из источника, отличающего от источников других составляющих комплекса. Материал содержит 80% фракции ила, почти бескарбонатный (2% кальцита). В минеральном составе доминирует монтмориллонит, содержатся также кварц, каолинит, гетит, слюда (следы) (рис. 3а). Содержание  $Fe_2O_3$  превышает 10%, величина MB достигает  $\sim 30$  ед. СИ (рис. 6).

Субаэральными преобразованиями затронуты преимущественно верхние 15 см известняка (слой 13.4). Наличие тонкого органогенного горизонта в его кровле свидетельствует о хорошей сохранности почвенного профиля. Известняк густо пронизан ризолитами. В соответствии с принятой классификацией (Кларра, 1980) ризолиты представлены двумя типами: каналы-пустоты и петрифицированные корни (псевдоморфозы), имеющие вид полых трубочек (табл. V, фиг. 1–3). Материал трубочек сложен кальцитом и оксида-

Таблица IV



**Таблица IV.** Микростроение материала сложного несогласия слоев 12 и 13 (данные РЭМ).

1–6 – микростроение кровли известняка слоя 12: 1 – конкреции гетита на поверхности растительного остатка, 2, 3 – растительные остатки, 4 – спора, 5, 6 – микростроение новообразованного кальцита; 7–9 – кровля слоя 13.4, растительные остатки, некоторые из которых со следами деятельности деструкторов.

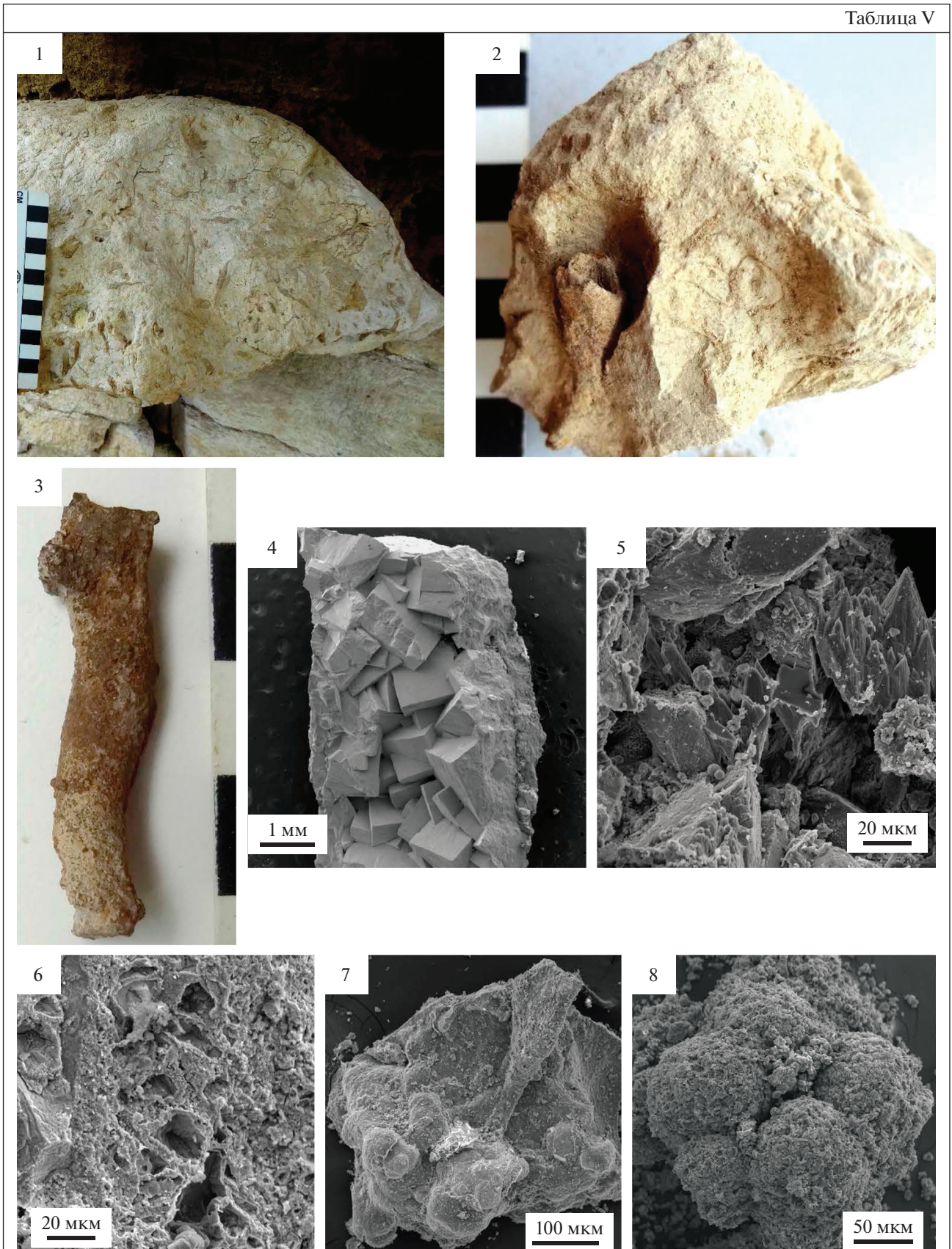
ми железа (гетитом/гидрогетитом и гематитом) (табл. V, фиг. 4, 5). Изотопный состав углерода в составе кальцита облегченный ( $\delta^{13}\text{C} = -5.59 \pm 0.92\%$ ), что характерно для почвенных карбо-

натов. Поверхность ризолитов (“кора”) сохраняет клеточное строение тканей (табл. V, фиг. 6). Материал с поверхности трубочек (зона ризосферы) обогащен шаровидными образованиями диа-

**Таблица V.** Ризолиты слоя 13.4.

1 – морфология ризоидного известняка из кровли слоя 13.4; 2, 3 – петрифицированные ризолиты; 4 – замещение корня гетитом; 5 – замещение корня кальцитом; 6 – клеточное строение тканей корня; 7, 8 – споры микоризных грибов из зоны ризосферы (данные РЭМ).

Таблица V



метром до 100 мкм, сложенными карбонатами микритовой размерности, в составе которых содержатся Ca (14%), Mn (9%) и Fe (5.5%) (табл. V, фиг. 7, 8). Полагаем, что эти образования могут представлять собой минерализованные споры симбиотических грибов (арбускулярной микоризы). Показано, что симбиоз растения и арбускулярной микоризы является древнейшим симбиозом в истории Земли. Он характерен для более чем 90% ныне живущих растений. Первые свидетельства данного симбиоза относятся к раннему девону (Raven, Edwards, 2001; Kenrick, Strullu-Degrien, 2014). Ранее споры симбиотических грибов в ризосфере палеопочв веневского возраста были обнаружены в другом карьере Калужской области (разрез Бронцы; Алексеева, 2020в).

Кровля слоя 13.4 сложена карбонатным органическим суглинком (содержание фракции ила 34%, фракции пыли 58%) с содержанием  $C_{орг} = 1.6\%$ . В его минеральном составе помимо кальцита содержатся монтмориллонит и гетит. Изучение материала методом РЭМ показало наличие многочисленных и разнообразных растительных остатков хорошей сохранности, часто со следами жизнедеятельности деструкторов (табл. IV, фиг. 7–9).

В завершение важно еще раз подчеркнуть факт существенных различий в морфологии данного педокомплекса, выявленных в двух близлежащих точках наблюдения в пределах одной стенки карьера (табл. I, фиг. 5, 6). Это может быть обусловлено как эрозионными процессами, так и исходной пестротой почвенного покрова.

**Михайловский горизонт. Слои 14 и 15 (табл. I, фиг. 7).** Нижние 5 см (слой 15.1) терригенного слоя 15 сложены глиной опесчаненной (32% песка, 28% пыли, 40% глины), сильно ожелезненной. Верхние 25 см (слой 15.2) сложены суглинком (43% пыли, 44% фракции <1 мкм) неоднородно окрашенным. Материал обеих частей слоя бескарбонатный. Терригенный слой подстилается морским известняком слоя 14, сложенным кальцитом. Его кровля (верхние 20–25 см) мягкая, мучнистая, неравномерно ожелезненная. От кровли известняка преимущественно вертикально отходят каналы диаметром около 1 см. Стенки каналов ожелезнены (табл. I, фиг. 7; табл. VI, фиг. 1–3). Каналы частично (их верхняя часть) или полностью заполнены глинистым материалом, аналогичным материалу слоя 15.1. По морфологическим признакам эти ихнофоссилии предположительно были отнесены к *Arenicolites* либо *Diplocraterion* (Knaust, 2017).

Изучение минерального состава отложений показало, что упомянутые два слоя глины заметно различаются (рис. 3а). Глина слоя 15.1 содержит кварц, смектит и гетит, в качестве незначительной примеси — слюду. Смектит представлен смесью низкозарядных высокодисперсных бейделлита и

монтмориллонита. Глина слоя 15.2 содержит кварц и смектит в преобладающем количестве, а также каолинит, слюду, гетит и лепидокрокит. Смектит представлен низкозарядным высокодисперсным монтмориллонитом. По данным мессбауэровской спектроскопии железо в илистой фракции представлено преимущественно оксидами: смесью супердисперсных гетита и гематита, с преобладанием гетита. Величина отношения гематит/гетит для слоя 15.1 составляет 0.89 и уменьшается к кровле слоя 15 до 0.45, где дополнительно наблюдается существенный дублет, который может быть отнесен к супердисперсному лепидокрокиту ( $\gamma$ -FeOOH) (рис. 3б). Слои глины различаются также по величине отношения Ti/Zr, величине магнитного сигнала (МВ), по содержанию всех макроэлементов и большинства микроэлементов: Si, Al, Fe, Mg, K, Ti, P, S, Ba, Ga, Cr, Ni, Zr и др.

Обращают на себя внимание свойства кровли известняка слоя 14 (слой 14.2). Полевое определение удельной плотности показало, что ее величина для слоя 14.2 составляет  $1.76 \text{ г/см}^3$ , а для нижележащей массивной части известняка —  $2.16 \text{ г/см}^3$ . Материал кровли ожелезнен (3.7%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), обогащен Si, Al, K и тяжелыми металлами — Co, Ni. Величина отношения Al/Ga, характеризующая интенсивность выветривания материала, здесь в 2 раза выше (рис. 2). Электронно-микроскопическое исследование показало, что материал кровли сложен микрокристаллическим кальцитом с размером частиц около 1 мкм (табл. VI, фиг. 4).

Изучение минерального состава материала, заполняющего каналы в кровле известняка, показало, что он в целом аналогичен составу глины слоя 15.1, но дополнительно содержит кальцит. Изучение этого материала методом РЭМ показало, что он разнороден по текстуре и минеральному составу: присутствуют крупные зерна кварца, глина, тонкодисперсные карбонаты, Fe-конкреции (табл. VI, фиг. 5–8). Отмечена высокая биогенность материала: во множестве присутствуют растительные остатки со следами деятельности деструкторов, микробные клетки и биопленки на поверхности минеральных зерен. Как было сказано выше, эти ихнофоссилии предположительно были отнесены к *Arenicolites* либо *Diplocraterion* (Knaust, 2017). По мнению этого автора, они могут принадлежать различным группам организмов илоедов/грунтоедов, как донных, так и наземных. На основании состава материала, заполняющего норы, мы склоняемся к предположению о наземном образе жизни организмов.

На основании полученных данных полагаем, что кровля слоя 14 субаэраально преобразована, а комплекс слоев 14 и 15.1 представляет собой палеопочву, кровля которой, по-видимому, эродирована.

Таблица VI

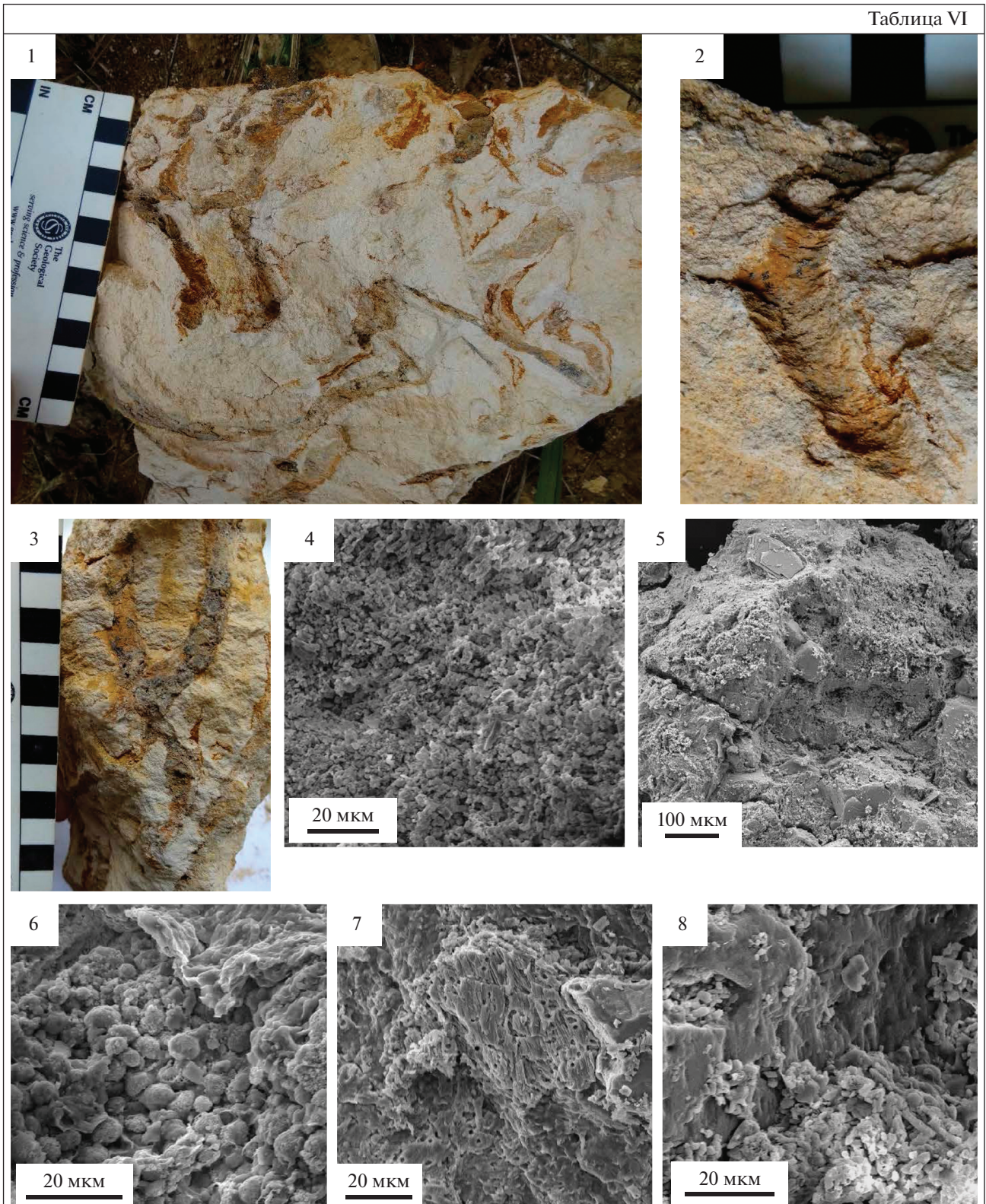
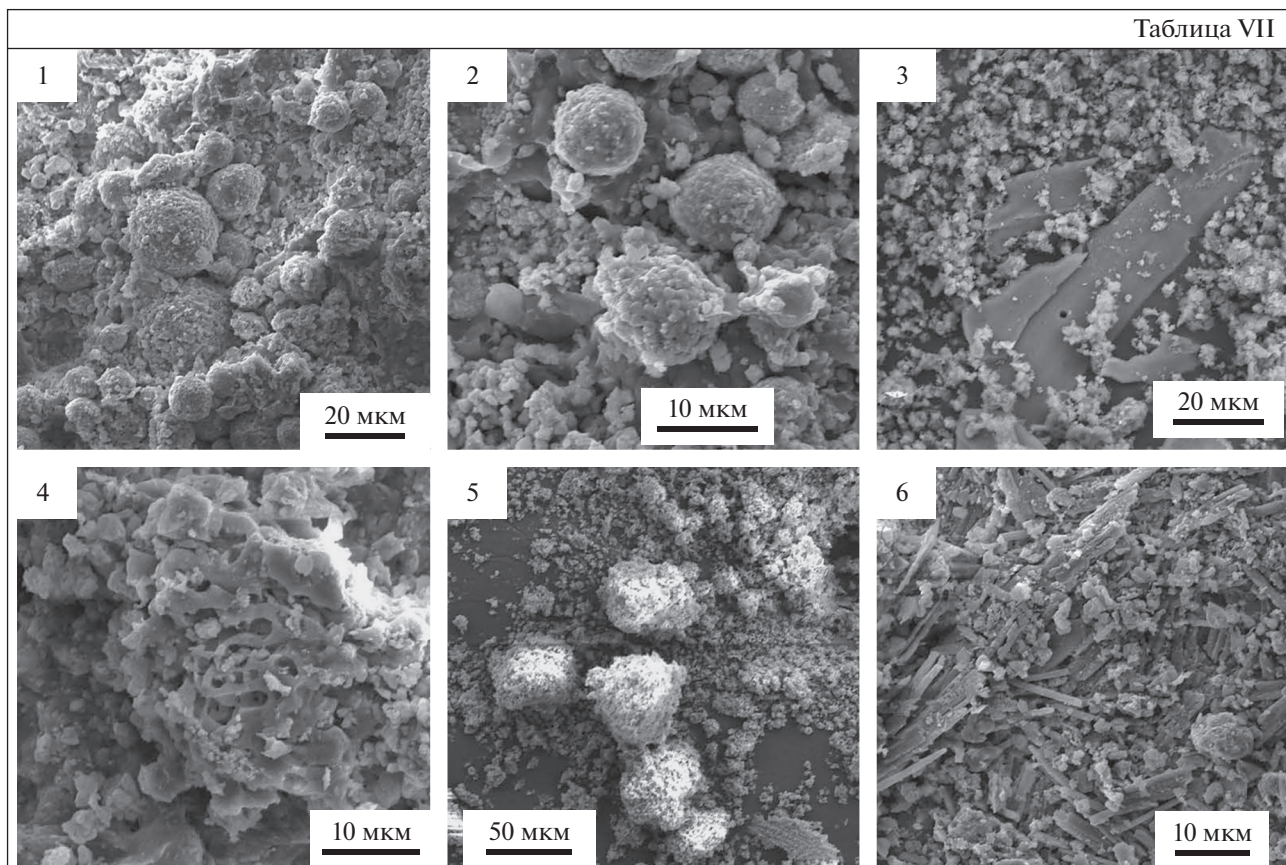


Таблица VI. Кровля слоя 14.

1–3 – ихнофоссилии, предположительно *Arenicolites* либо *Diplocraterion*, общий вид и детали морфологии; 4 – микро-титовая природа кровли известняка; 5–8 – микростроение материала, заполняющего полости ихнофоссилий: 5 – неосортированный грунтовый материал, 6 – гетитовые конкреции, 7 – растительные остатки со следами деятельности деструкторов, 8 – колонии микроорганизмов (данные РЭМ).

Таблица VII



**Таблица VII.** Элементы микростроения палеопочв слоев 15.1 и 17.3 (данные РЭМ).

1, 2 – слой 15.1, гетитовые конкреции; 3, 4 – слой 17.3, растительные остатки в массе микритового кальцита; 5 – слой 17.3, пеллеты, замещенные микритовым кальцитом; 6 – слой 17.3, новообразованный игольчатый кальцит.

### Кровля михайловского горизонта (КНУ). Слой 17.

Это единственный уровень разреза Мстихино с развитым карстом. Слой представлен брекчированным известняком (слой 17.1) с бугристой, оже-лезненной кровлей (слой 17.2). Последняя перекрыта маломощным (до 1 см) слоем красноватой глины (10RP 6/2; слой 17.3; табл. I, фиг. 8). Этот материал заполняет каверны в кровле известняка. Известняк перекрыт маломощным (3 см) слоистым мергелем (слой 18). Все отобранные образцы карбонатные, сложены кальцитом.

Помимо характерных морфологических особенностей, материал кровли известняка демонстрирует ряд специфических аналитических характеристик. В химическом составе заметно увеличение содержания Si, Al, Fe. Небольшой прирост величин MB и отношения Al/Ga (~300) указывают на преобразование материала в субэаральных обстановках (рис. 2).

В минеральном составе глины слоя 17.3 помимо кальцита содержатся смектит, кварц и гетит. Изучение соединений Fe методом мессбауэровской спектроскопии показало, что илистые фрак-

ции кроме гетита содержат и гематит (рис. 3а, 3б). Обе фазы супердисперсны. В этой минеральной ассоциации преобладает гематит (величина отношения гематит/гетит = 1.44), что заметно и по характерному для гематита розоватому цвету палеопочвы. Преобладание гематита свидетельствует в пользу теплых и аридных обстановок, в которых формировалась палеопочва.

Микрофотографии глины из кровли карста приведены в табл. VII (фиг. 3–6). В образцах встречены растительные остатки разной степени сохранности. Вторичный кальцит представлен колломорфной формой с частицами микронной размерности, а также игольчатой и шестоватой формами. Вопрос о природе такой формы вторичных карбонатов рассматривался выше. Интересны находки пелоидов (минерализованных фекальных пеллет) размером ~50 мкм. Обе морфологические формы вторичного кальцита могут представлять собой минерализованное почвенное органическое вещество – гумус (см. Wright, 1994).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приводится комплекс признаков, которые позволили отнести изученные несогласия к палеопочвам.

Для кровли известняков выявлены следующие изменения облика и свойств: формирование плитчатости и брекчированности, выраженный рельеф кровли, изменения физических свойств (снижение удельного веса, изменение цвета и твердости), наличие корневых каналов и других ризолитов (стигмари и их отпечатки, петрифицированные корневые трубки), норы. Карбонаты представлены кальцитом, не содержащим примесей. Значение  $\delta^{13}\text{C}$  в них варьирует от  $-2.6$  до  $+1.0\text{‰}$  (среднее  $-0.75\text{‰}$ ), оставаясь характерным для морских обстановок. Результаты проведенных субмикроскопических исследований свидетельствуют о процессах растворения и пересадки карбонатов с формированием колломорфных, микритовых и других морфологических разновидностей вторичного кальцита. В химическом составе известняков наблюдается рост концентраций Si, Al, Fe, K, тяжелых металлов (Co, Ni). Показателен рост величины отношений Al/Ga и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ . Присутствует растительный детрит субмикроскопической размерности с разной степенью сохранности, споры растений и микроскопических грибов.

Терригенные слои, как правило, содержат органический углерод. Как и в кровлях известняков, биота здесь представлена ризолитами (ожелезненные отпечатки корневых систем), растительным детритом субмикроскопической размерности с разной степенью сохранности, спорами растений. Палеопочва слоя 9 содержит многочисленные карбонатные новообразования — желваки с облегченным изотопным составом углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -5.54 \pm 1.27\text{‰}$ ).

Изучение минерального состава отложений показало, что материал, слагающий глинистые чехлы всех несогласий за исключением слоя 7, практически мономинеральный, смектитовый, с незначительной примесью каолинита и гетита. Смектит представлен индивидуальной фазой и не несет признаков смешанослойности. Ранее было показано, что смектитовый мономинеральный состав глин — характерная особенность палеопочв раннего карбона на территории южного крыла Подмосковского осадочного бассейна (Alekseeva et al., 2016; Алексеева и др., 2018). Среди возможных причин этого можно назвать: щелочной характер карбонатной среды, кратковременность почвообразования и, как следствие, преобладание пионерных (инициальных) почв, низкие концентрации калия, эрозионные процессы, лишайные палеопочвы верхних горизонтов с максимальным преобразованием минерального состава. В отличие от глинистых минералов, зерна первичных минералов несут черты выветривания. Морфоло-

гически выраженной и аналитически подтвержденной особенностью является ожелезнение (прослой, пятна, ожелезнение ризолитов). Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  достигает в отдельных случаях 20%. Чаще всего ожелезнение сопровождается ростом величины магнитного сигнала. По данным мессбаэровской спектроскопии железосодержащими фазами являются оксиды/гидроксиды, как правило гетит и гематит в разных пропорциях, редко — лепидокрокит. Эти минералы формируют микроконкреции, часто на поверхностях органического детрита. Пирит и другие минералы, в которых Fe находится в восстановленной форме, не выявлены (за исключением одного образца), что является свидетельством преобладания субаэральных обстановок почвообразования. Помимо железа, эти уровни разреза обогащены Ga, K, P, катионами тяжелых металлов.

Эпиконтинентальная природа Подмосковского осадочного бассейна, его малые глубины и плоский рельеф морского дна предполагают, что изученные палеопочвы за малым исключением формировались в прибрежных обстановках. За исключением палеопочв слоев 7 и 17, это литосоли, сформированные на плотных известняках, без признаков карста. Они могут быть отнесены к рендзинам (*nedotun 1*). Профиль этого типа палеопочв состоит из двух частей: в разной степени субаэрально преобразованный морской известняк (калькрет) и глинистый слой. Материал, слагающий глинистый слой, может быть как карбонатным (в большинстве случаев), так и бескарбонатным (например, слой 15), иметь разный генезис: он мог формироваться на стадии трансгрессии и представлять собой отложения пресных временных эфемерных озер либо морского мелководья, мог являться остаточным продуктом выветривания известняка, а также иметь эоловую (аэрозольную) природу. Выделенные части почвенного профиля могут иметь резкий контакт (слои 14 и 15; 12 и 13.0) либо постепенный переход с частичным вовлечением в глинистый слой брекчий (плиток) известняка (слои 4 и 5). В случае резкого контакта можно говорить об этапе эрозии, предшествовавшей отложению глинистого слоя.

Палеопочва слоя 17 — единственная палеопочва, сформированная на брекчии (карсте) известняка (*nedotun 2*). Имея аналогичное *nedotun 1* двухчленное строение, данная палеопочва, по-видимому, формировалась в течение более длительного промежутка времени. Как отмечалось выше, этой палеопочве свойственна красноцветность, обусловленная накоплением гематита. Палеопочва скорее всего эродирована.

Палеопочва слоя 9 непохожа на другие палеопочвы данного разреза. Подстилаемая выветрелым морским известняком, эта суглинистая монтмориллонитовая палеопочва содержит множествен-

ные карбонатные новообразования с легким изотопным составом углерода. Не исключаем, что профиль палеопочвы эродирован. Эта палеопочва семиаридного ряда — кальцисоль с вторичным накоплением извести. Процессы формирования вторичных карбонатов и оксидов железа могли быть разнесены во времени (*педотип 3*).

Перечисленные морфологические особенности и аналитические характеристики отложений, слагающих несогласия, говорят о том, что палеопочвы этих педотипов следует рассматривать как двучлены, состоящие из наложенных палеопочвенных профилей: эродированной рендзины (карста), перекрытой почвой разного генезиса на терригенных осадках. Большинство из них — это пионерные (инициальные) палеопочвы. Отложения уровней 12–14 представляют собой сложный педокомплекс, включающий 3 палеопочвы. Снизу вверх он состоит из эродированной рендзины, пионерной палеопочвы на карбонатном суглинке, рендзины вторично закарстованной.

Единственная палеопочва, сформированная на терригенном бескарбонатном субстрате, — палеопочва слоя 7. Отложения, по-видимому, представляют собой донные осадки пресноводного озера, впоследствии обмелевшего и заболоченного. Сформированная на его месте болотная палеопочва (гистосоль) отнесена к *педотипу 4*. Это единственная из изученных в этом разрезе *каолинитовая* палеопочва с примесью смешанослойной фазы иллит-сметтит.

Тот же минеральный состав был установлен нами ранее для палеопочвы этого уровня ( $MH_{T1}$ ) в карьере Полотняный завод (Калужская область) (Alexseeva et al., 2016). Полагаем, что каолинитовый минеральный состав этих палеопочв формировался из единого источника и был унаследован. Полученные данные говорят в пользу того, что пресноводный бассейн, обмелевший и заболоченный, имел большую площадь распространения, что делает несогласие  $MH_{T1}$  важной стратиграфической (педостратиграфической) единицей.

Базируясь на свойствах изученных палеопочв, можно заключить, что климат во второй половине визе на территории распространения Подмосковского осадочного бассейна был в большинстве случаев гумидный. Вместе с тем имели место колебания климата. По соотношению оксидов/гидроксидов железа, исходя из данных по современным почвам (Kämpf, Schwertmann, 1983; Nyland et al., 2015), оценочные величины среднегодовых температур составляют 15–17°C, среднегодовых осадков 800–1000 мм. Такая интерпретация совпадает с проведенными ранее реконструкциями палеоклимата михайловского времени по геохимическим данным (Алексеева, 2020а). Находки стигмарий, ограничивающиеся слоями 5, 12 и 13, также под-

тверждают выявленный тренд на аридизацию климата, начавшуюся с конца визе (Алексеева, 2020а).

Важно отметить изменения величин отношения  $Al/Ga$  вверх по разрезу. Они демонстрируют устойчивый тренд на уменьшение, который может свидетельствовать о снижении интенсивности выветривания терригенного материала, однако может отражать и смену источника, выявленную на основании поведения отношения  $Ti/Zr$ .

Наиболее аридные обстановки были характерны для начала михайловского времени на стадии формирования кальцисоли с вторичным накоплением извести (слой 9). Это *единственный* уровень, для которого величина отношения  $Al/Ti$  превышает 20. В пользу теплого аридного климата говорят и результаты изучения соединений железа. Показано, что в этой палеопочве гематит несколько преобладал над гетитом. Эту палеопочву можно отнести к разряду зональных.

Болотная палеопочва уровня 7 (гистосоль) — азональная (интразональная) почва, которая могла формироваться в условиях переувлажненности в разных климатических обстановках. Она не информативна для целей климатических реконструкций.

Важно подчеркнуть выявленную литологическую пестроту на сравнительно близких расстояниях, а также пестроту почвенного покрова. Геосоли уровней 5, 7 и 17 в двух близко расположенных карьерах Калужской области (Полотняный завод и Мстихино) имеют разный морфологический облик и отнесены к разным педотипам. Несогласие КНУ в кровле михайловского горизонта, в большинстве случаев представленное “черным ризоидным известняком” палеостринного генезиса (Алексеева и др., 2016; Алексеева, 2020а), в карьере Мстихино представлено палеопочвой на брекчированном морском известняке (*педотип 3*).

## ВЫВОДЫ

Стратиграфические несогласия, выявленные в верхневизейских известняковых отложениях разреза Мстихино (Калужская область), имеют комплекс морфологических и аналитических признаков, позволивший интерпретировать их как палеопочвы. Большинство субаэрально преобразованных профилей маломощные и имеют двучленное строение: в разной степени преобразованный морской известняк (калькрет или карст) и перекрывающий его терригенный, как правило глинистый, слой, также экзогенно преобразованный.

Для кровли известняков характерны следующие преобразования облика и свойств: формирование плитчатости и брекчированности, изменения физических свойств, наличие корневых каналов и других ризолитов, присутствие нор. Карбонаты

представлены кальцитом с изотопным составом углерода, характерным для морских обстановок. Им присуще растворение и переосаждение с формированием колломорфных, микритовых и других морфологических разностей вторичного кальцита. В химическом составе кровли известняков наблюдается рост концентраций Si, Al, Fe, K, тяжелых металлов (Co, Ni). Показателен рост величины отношений Al/Ga и  $Al_2O_3/TiO_2$ . Присутствует растительный детрит субмикроскопической размерности с разной степенью сохранности, споры растений и микроскопических грибов. Терригенные слои, как правило, содержат органический углерод, биологические структуры здесь представлены ризолитами, растительным детритом, спорами.

Для характеристики климата предложено использовать отношения Al/Ga и Al/Ti, величину магнитной восприимчивости, наличие и соотношение оксидов/гидроксидов железа, наличие и характеристики вторичных карбонатов (морфологические формы, изотопный состав), тип палеопочвы, биоту (фрагменты растительности, следы деятельности микро-, мезо- и макрофауны), ризолиты (их типы, густота, глубина проникновения).

Сделан вывод о том, что в михайловское время климат на изученной территории испытывал колебания. Преобладали гумидные обстановки с количеством атмосферных осадков 800–1000 мм/год. В этих условиях распространение получили прибрежно-морские пионерные палеопочвы. Обнаруженная в низах михайловского горизонта палеопочва с вторичным накоплением извести (кальцисоль) выявила существование аридного этапа.

Предыдущие исследования палеопочв раннего и позднего карбона Подмосковского бассейна (Kabanov, Varanova, 2007; Алексеева, 2020а) показали, что палеопочвы на границах горизонтов являются важными стратиграфическими единицами и могут рассматриваться в качестве геосолей. Уровни развития палеопочв в пределах региональных горизонтов позволяют детализировать их разбивку, расширяя возможности событийной стратиграфии. Настоящее исследование позволило выявить дополнительные уровни развития палеопочв михайловского времени. Показано, что палеопочву уровня МН<sub>Т1</sub> можно рассматривать в качестве геосоли.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 22-27-00370.

**Благодарности.** Авторы благодарны рецензентам П.Б. Кабанову и А.С. Алексееву за глубокий анализ статьи, критические замечания и рекомендации, позволившие существенно улучшить статью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акульшина Е.П.* Вещественный состав глинистой части пород палеозоя Сибирской и Русской платформ и его эволюция. Новосибирск: Наука, 1971. 159 с.
- Акульшина Е.П.* (ред). Глинистые минералы как показатели условий литогенеза // Труды Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 223. Новосибирск: Наука, 1976. 195 с.
- Алексеев А.С., Голодковская Г.А., Панасьян Л.Л.* Актуальные проблемы изучения каменноугольных карбонатных пород на территории Москвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 2. С. 25–34.
- Алексеева Т.В.* Почвообразование и почвы в девоне и карбоне на территории Северной Евразии: строение, типы, биота, палеоклиматические архивы и стратиграфическая значимость. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ПИН РАН, 2020а.
- Алексеева Т.В.* Почвы девона и карбона. Современное состояние исследований в России (обзор литературы) // Почвоведение. 2020б. № 10. С. 1157–1169.
- Алексеева Т.В.* Ризолиты в палеопочвах девона и раннего карбона и их палеоэкологическая значимость // Почвоведение. 2020в. № 4. С. 398–413.
- Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Губин С.В.* Палеопочвенный комплекс в кровле михайловского горизонта (визейский ярус нижнего карбона) на территории южного крыла Московской синеклизы // Палеонтол. журн. 2016. № 4. С. 5–20.
- Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Калинин П.И.* Палеопочвы нижнего карбона в карьере “Бронцы” (Калужская область) // Почвоведение. 2018. № 7. С. 787–800.
- Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв. Ярославль: ЯГТУ, 1995. 222 с.
- Бельская Т.Н., Иванова Е.А., Ильховский Р.А., Масленников В.П., Махлина М.Х., Михайлова Е.В., Осипова А.И., Рейтлингер Е.А., Шик Е.М., Яблоков В.С.* Путеводитель экскурсий по разрезам карбона Подмосковского бассейна. М.: Наука, 1975. 180 с.
- Габдуллин Р.Р., Бершов А.В., Самарин Е.Н., Бадулина Н.В., Афонин М.А., Фрейман С.И.* Циклическая и секвентно-стратиграфическая характеристика визейско-серпуховских отложений на юге Московской синеклизы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 4. С. 30–41.
- Геккер Р.Ф.* Работы карбоновой палеоэкологической экспедиции в 1934–1936 гг. // Тр. ПИН АН СССР. 1940. Т. 9. Вып. 4. С. 105–117.
- Геологический словарь. В 2-х томах. Ред. Паффенгольца К.Н. и др. М.: Недра. 1978.
- Залесский М.Д.* Очерк по вопросу образования угля. Петроград: Издание Геологического Комитета, 1914. 94 с.
- Кабанов П.Б.* Событийная стратиграфия пограничного интервала среднего и верхнего карбона Подмосковья. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2000.
- Кабанов П.Б.* Стратотип серпуховского яруса в карьере Заборье. Часть 1. Литофациальная характеристика // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2003. Т. 11 № 1. С. 20–38.

- Кабанов П.Б.* Стратотип серпуховского яруса в карьере Заборье. Часть 2. Профили субаэральной экспозиции и цикличность // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2004. Т. 12. № 3. С. 253–261.
- Калинин П.И., Алексеев А.О.* Геохимическая характеристика лёссово-почвенных комплексов Терско-Кумской равнины и Азово-Кубанской низменности // Почвоведение. 2011. № 12. С. 1436–1453.
- Мамонтов Д.А., Орлова О.А.* Палинологическая характеристика верхневизейских отложений карьера Мстихино (Калужская область) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 1. С. 35–42.
- Махлина М.Х., Вдовенко М.В., Алексеев А.С., Бышиева Т.В., Донакова Л.М., Жулитова В.Е., Кононова Л.И., Умнова Н.И., Шик Е.М.* Нижний карбон Московской синеклизы и Воронежской антеклизы. М.: Наука, 1993. 221 с.
- Махлина М.Х., Алексеев А.С., Кононова Л.И.* Нижний карбон Московской синеклизы и Воронежской антеклизы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1994. Т. 69. № 1. С. 42–113.
- Мосейчик Ю.В.* Раннекаменноугольная флора Подмосковского бассейна. Т. 1. Состав, экология, эволюция, фитогеографические связи и стратиграфическое значение. М.: ГЕОС, 2009. 187 с.
- Осипова А.И., Бельская Т.Н.* О веневском горизонте южного крыла Подмосковского бассейна // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1965. № 11. С. 33–44.
- Швецов М.С.* К вопросу о стратиграфии нижнекаменноугольных отложений южного крыла Подмосковского бассейна // Вестник Моск. горн. акад. 1922. Т. 1. № 2. С. 223–242.
- Швецов М.С.* История Московского каменноугольного бассейна в динантскую эпоху // Тр. МГРИ. 1938. Т. 12. С. 3–107.
- Alekseev A.O., Kabanov P.B., Alekseeva T.V., Kalinin P.I.* Magnetic susceptibility and geochemical characterization of an upper Mississippian cyclothem section Polotnyanyi Zavod (Moscow Basin, Russia). Magnetic Susceptibility Application: A window onto ancient environments and climatic variations // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2015. V. 414. P. 181–196.
- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.N.* The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes // Tectonophysics. 1996. V. 268. P. 149–168.
- Alekseev A.S., Goreva N.V., Isakova T.N., Makhlina M.Kh.* Biostratigraphy of the Carboniferous in the Moscow Syncline, Russia // Newslett. Carboniferous Stratigr. 2004. V. 22. P. 28–35.
- Alekseeva T.V., Alekseev A.O., Gubin S.V., Kabanov P.B., Alekseeva V.A.* Palaeoenvironments of the Middle–Late Mississippian Moscow Basin (Russia) from multiproxy study of palaeosols and palaeokarsts // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2016. V. 450. P. 1–16.
- Auras S., Wilde V., Hoernes S., Scheffler K., Puttmann W.* Biomarker composition of higher plant macrofossils from Late Palaeozoic sediments // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2006. V. 240. P. 305–317.
- Hyland E., Sheldon N.D., Van der Voo R., Badgley C., Abrajevitch A.* A new paleoprecipitation proxy based on soil magnetic properties: implications for expanding paleoclimate reconstructions // Geol. Soc. Am. Bull. 2015. V. 127(7–8). P. 975–981.
- Kabanov P.* The Upper Moscovian and Basal Kasimovian (Pennsylvanian) of Central European Russia: Facies, subaerial exposures and depositional models // Facies. 2003. V. 49. P. 243–270.
- Kabanov P.* Stratigraphic unconformities: review of the concept and examples from the Middle-Upper Paleozoic // Seismic and Sequence Stratigraphy and Integrated Stratigraphy – new insights and contributions. Ed. Aiello G. IntechOpen, 2017. P. 101–127.
- Kabanov P.B., Alekseev A.S.* Progress in cyclothem/sequence stratigraphy of type Lower Moscovian succession of Moscow Basin, Russia // Newslett. Carboniferous Stratigr. 2011. V. 29. P. 42–50.
- Kabanov P., Baranova D.* Cyclothem and stratigraphy of the Upper Moscovian–basal Kasimovian (Pennsylvanian) succession of central and northern European Russia // Proc. XV Int. Congr. on Carboniferous and Permian. Ed. Wong T.E. Amsterdam: The Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007. P. 147–160.
- Kabanov P.B., Alekseeva T.V., Alekseeva V.A., Alekseev A.O., Gubin S.V.* Paleosols in late Moscovian (Carboniferous) marine carbonates of the East European craton revealing “great calcimagnesian plain” paleolandscapes // J. Sed. Res. 2010. V. 80. P. 195–215.
- Kabanov P.B., Alekseev A.S., Gabdullin R.R., Gibshman N.B., Bershov A., Naumov S., Samarin E.* Progress in sequence stratigraphy of upper Viséan and lower Serpukhovian of southern Moscow basin, Russia // Newslett. Carboniferous Stratigr. 2013. V. 30. P. 55–65.
- Kabanov P.B., Alekseev A.S., Gibshman N.B., Gabdullin R.R., Bershov A.V.* The upper Viséan–Serpukhovian in the type area for the Serpukhovian Stage (Moscow Basin, Russia): Part 1. Sequences, disconformities, and biostratigraphic summary // Geol. J. 2016a. V. 51 (2). P. 163–194.
- Kabanov P.B., Alekseev A.O., Zaitsev T.* The upper Viséan–Serpukhovian in the type area for the Serpukhovian Stage (Moscow Basin, Russia). P. 2. Bulk geochemistry and magnetic susceptibility // Geol. J. 2016b. V. 51(2). P. 195–211.
- Kämpf N., Schwertmann U.* Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinic soils // Geoderma. 1983. V. 29. P. 27–39.
- Kenrick P., Strullu-Derrien Ch.* The origin and early evolution of roots // Plant Physiology. 2014. V. 166. P. 570–580.
- Klappa C.F.* Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance // Sedimentology. 1980. V. 27. P. 613–629.
- Knaust D.* Atlas of trace fossils in well core. Appearance, taxonomy and interpretation. Springer Int. Publ., 2017. 219 p.
- Kraus M.J., Hasiotis S.T.* Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from Paleogene paleosols, Bighorn basin, Wyoming, USA // J. Sed. Res. 2006. V. 76. P. 633–646.
- Mamontov D.A., Zaytseva E.L., Orlova O.A.* New data on the biostratigraphy of Upper Viséan (Mikhailovian) deposits from the Mstikhino Quarry (Kaluga Region) based on the miospores and foraminifers // Proc. 50th Joint Meeting of AASP-CIMP-TMS – Golden Anniversary of AASP –

- The Palynological Society. Keyworth, Nottingham, UK: British Geological Survey, 2017. P. 42–43.
- Mamontov D.A., Mclean D., Orlova O.A., Gavrilova O.A. Maia spora: a new miospore genus with enigmatic sculpture from the Late Visean of European Russia // Pap. Palaeontol. 2021. V. 7. Pt. 1. P. 263–306.*
- Miall A.D. The valuation of unconformities // Earth Sci. Rev. 2016b. V. 163. P. 22–71.*
- Moessbauer spectroscopy. Tutorial book. Eds. Yoshida Y., Langouche G. Springer, 2013. 317 p.
- Mosseichik Yu.V. Correlation of Visean plant-bearing deposits of the Russian Platform // Newslett. Carboniferous Stratigr. 2005a. V. 23. P. 31–33.*
- Mosseichik Yu.V. Geography and succession of European floras during the Viséan // Newslett. Carboniferous Stratigr. 2005b. V. 23. P. 33–36.*
- Mosseichik Yu.V., Ruban D.A. Visean flora from the Moscow Coal Basin (Baltic Plate; European Russia): evolution in the context of global tendencies // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2010. V. 292. P. 168–183.*
- Mosseichik Yu.V., Ignatov M.S., Ignatiev I.A. A bryophyte-like plant from the Lower Carboniferous of the Moscow Coal Basin // Arctoa. 2007. V. 16. P. 99–122.*
- Murad E., Cashion J. Mössbauer Spectroscopy of Environmental Materials and their Industrial Utilization. Kluwer, 2004. 418 p.*
- Naugolnykh S.V., Kokina O.A. A fertile branch of Lepidodendron obovatum Sternberg from the Lower Carboniferous (Visean) deposits of the Kaluga region, Russia // Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting, October 18–22, 2021, Kazan, Russia. P. 40–41.*
- Peters-Kottig W., Strauss H., Kerp H. The land plant  $\delta^{13}\text{C}$  record and plant evolution in the Late Palaeozoic // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2006. V. 240. P. 237–252.*
- Raven J.A., Edwards D. Roots: evolutionary origins and biogeochemical significance // J. Experimental Botany. 2001. Roots Spec. Iss. 52. P. 381–401.*
- Retallack G.J. Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology. 2nd ed. Blackwell, printed in Oxford and Northampton (UK), Alden Press Ltd, 2001. 404 p.*
- Wright V.P. Paleosols in shallow marine carbonate sequences // Earth. Sci. Rev. 1994. V. 35. P. 367–395.*

*Рецензенты А.С. Алексеев,  
П.Б. Кабанов, С.В. Наугольных*

## Palaeosols as Markers of Upper Visean Stratigraphic Unconformities in Mstikhino Quarry, Kaluga Region, Russia: Geochemistry, Mineralogy, Biogenic Structures

T. V. Alekseeva<sup>a, #</sup>, V. V. Malishev<sup>a</sup>, and A. O. Alekseev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Physical Chemical and Biological Problems of Soil Science,  
Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Oblast, Russia*

<sup>#</sup> *e-mail: alekseeva@issp.serpukhov.su*

Mississippian shallow marine deposits of Moscow basin have numerous sedimentary breaks. This paper describes the Upper Visean (Aleksinian and Mikhaylovian formations) deposits from the Mstikhino limestone quarry which were bed-by-bed sampled and studied using a complex of analytical methods (XRD, RFA, Moessbauer spectroscopy, SEM-EDAX). Six stratigraphic unconformities were detected and classified as palaeosols. Profiles of most palaeosols are shallow, consist of two principal units: subaerially altered limestone and terrestrial terrigenous most of the time clayish cover. The later typically represents coastal pioneer palaeosols. Among the set of pedogenic criteriums the presence of organic carbon and biota (rhizoliths, spores, plant debris and trace fossils – burrows) is the most convincing. One more pronounced characteristic is the morphologically and analytically confirmed Fe-concentration. Moessbauer spectroscopy data show that Fe-containing phases are represented by super dispersed oxides/hydroxides – hematite and goethite in different proportions. The lowest terrigenous bed of Mikhaylovian formations (MH<sub>T1</sub>) is classified as Histosol – swampy organic-rich palaeosol developed from freshwater lake deposits. SEM study of a peat material from the top of this soil shows that plant cover was characterized by large biodiversity from bryophyte-like plant till lycopod trees. Complex of obtained data allows to say that Upper Visean climate on the given territory was predominantly humid with mean annual precipitation of 800–1000 mm. At the same time the development of a Calcisol among others reflects the arid period as well. The comparison of these data with the earlier obtained results on lithology and paleosols of Visean age from neighboring quarries of the southern part of Moscow basin shows the large heterogeneity of both lithology and soil cover. Meanwhile the Histosol at MH<sub>T1</sub> level was previously discovered in other quarries. Being morphologically recognizable with specific, kaolinite rich mineralogy this palaeosol could be regarded as the important stratigraphic unit (Geosol).

*Keywords:* Mississippian, Moscow sedimentary basin, pedostratigraphy, clay mineralogy, iron oxides, isotopic composition of carbonate, paleoclimate