

## ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

### РИЗОЛИТЫ В ПАЛЕОПОЧВАХ ДЕВОНА И РАННЕГО КАРБОНА И ИХ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ<sup>1</sup>

© 2020 г. Т. В. Алексеева\*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
ул. Институтская, 2, Пущино Московской области, 142290 Россия*

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

Поступила в редакцию 29.05.2019 г.

После доработки 02.08.2019 г.

Принята к публикации 29.11.2019 г.

Отобранные *in situ* из палеопочв среднего-позднего девона и раннего карбона на территории юга Русской платформы (Калужская, Белгородская, Воронежская области) ископаемые корни высших растений (ризолиты) (>20) изучены с применением комплекса аналитических методов: электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, рентген-флуоресцентного анализа, масс-спектрометрии. В палеопочвах девона, сформированных на вулканогенно-осадочных породах, ризолиты представлены петрифицированными корнями и продуктами их диагенеза. В минеральном составе ризолитов доминируют Fe-содержащие минералы: сидерит и гетит в разных пропорциях. Некоторые из них содержат углефицированное и/или пиритизированное органическое вещество с частичным сохранением растительных тканей. В палеопочвах раннего карбона, сформированных на морских известняках, основным типом ризолитов являются заполненные корневые пустоты (слепки), реже встречаются отпечатки и каналы-пустоты, единично — ризокреции. Ризокреции являются прижизненными образованиями, сформированными при участии арбускулярной микоризы. Для всех типов ризолитов из палеопочв раннего карбона характерна полная минерализация растительных тканей. Ризолиты сложены кальцитом, изотопный состав углерода которого изменяется в широких пределах:  $-5.68 < \delta^{13}\text{C} < -1.16\text{‰}$ . Результаты проведенного исследования показали, что ризолиты являются источником информации о биоразнообразии, физиологии растений, эволюции растительного мира и окружающей среды в целом. Объем получаемой информации определяется типом сформированного ризолита.

*Ключевые слова:* геохимия, изотопный состав С и О карбонатов, микориза, минеральный состав, палеозой, сидерит

DOI: 10.31857/S0032180X20040024

#### ВВЕДЕНИЕ

Ризолиты — фоссилизированные корни высших растений и их отпечатки. Для описания остатков корней и корневых систем, начиная с конца XIX в., использовали термины: ризоморфы, ризоконкреции, педотубулы, корневые структуры, корневые слепки, корнеподобные структуры, корневые пустоты и др. [31]. На сегодняшний день терминологическая неопределенность сохраняется, однако наиболее распространенным термином является “ризолит”. Он используется для описания остатков корней как ископаемых, так и дневных почв [31, 33, 42, 46]. Наличие инситуных фоссилизированных корней и корневых систем является первостепенным критерием при обнаружении палеопочв. Они наряду с почвенными конкрециями и норами являются наиболее устойчивыми к диа-

генезу компонентами палеопочвенного профиля, что еще более увеличивает их значимость при палеопочвенных исследованиях [37]. Будучи продуктом ископаемых ризосфер, обнаруженные *in situ* ризолиты являются неоценимым и наиболее достоверным источником информации о растительности (биомасса, биоразнообразие), об экосистеме в целом. О чем нельзя с уверенностью говорить, базируясь на растительных остатках и спорах, которые часто имеют переотложенный характер, а также, следуя законам тафономии, демонстрируют избирательную сохранность.

При описании ризолитов чаще всего используют классификацию Клаппа [31]. Данная классификация включает следующие основные типы ризолитов: 1) каналы — пустоты, оставшиеся после гниения корня; 2) слепки — каналы-пустоты, заполненные осадочной породой и/или цементом; 3) трубки-тубулы — цементированные области вокруг каналов, которые могут формироваться как при жизни растения, так и после отмирания

<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X20040024 для авторизованных пользователей.

корня; 4) ризокреции – отложения минеральных чехлов вокруг корней, которые могут формироваться как при жизни растения, так и после отмирания корня; 5) петрифицированные корни – замещенные минералами растительные ткани корня с частичной или полной сохранностью строения. Тип ризолита может быть и комбинированным, совмещающая в себе два и более типов. Позднее Краус и Хасиотис [32] дополнили классификацию Клаппа еще одним типом ризолитов – “ризогало” для описания Fe- и Mn-обедненных зон вокруг корней, формирующихся преимущественно в глеевых палеопочвах. Ризолиты такого типа описаны в работах Безносова с соавт. [3], Иноземцева и Таргульяна [7], Снигиревского с соавт. [14], Шумилова [20, 40], Насцименто с соавт. [33] и др.

Показано, что тип ризолитов и их состав (минеральный, химический, изотопный) отражают водный режим почв, дренажные условия, палеоклимат, характеризуют палеоландшафт в целом; данные  $^{14}\text{C}$  датирования используют для целей геохронологии и стратиграфии [7, 18, 23, 31–33, 41, 42]. Вместе с тем интерпретация полученных результатов бывает неоднозначной и даже спорной по ряду причин. Вопреки мнению о сохранности ризолитов в диагенезе, нерешенными остаются вопросы: 1) всегда ли они сингенетичны почвообразованию или являются продуктом педодиагенеза; 2) как условия захоронения влияют на их состав. Возникает вопрос, в каких случаях ризолиты могут использоваться для описания непосредственно палеопочвенных и палеоландшафтных (“прижизненных”) процессов, а когда получаемая информация отвечает этапу захоронения. Последнее также представляет интерес, но уже с точки зрения истории формирования осадочной толщи.

В работах [1, 2, 21, 22] опубликованы результаты комплексного изучения палеопочв среднего-позднего девона и раннего карбона на территории юга Русской платформы (рис. 1). Палеопочвы девона (живетский и франский ярусы) сформированы на терригенных породах: осадочных и вулканогенно-осадочных. Они формируют сложные педокомплексы и демонстрируют катенарную дифференциацию. Палеопочвы карбона в основном формируют двучлены, в которых нижняя палеопочва сформирована на морских карбонатах, верхняя – на терригенных прибрежно-морских осадках.

Цель исследования – оценка возможностей использования ризолитов, обнаруженных в палеопочвах, в качестве источника палеоэкологической информации. Для ее осуществления решали следующие задачи: 1) изучить морфологические особенности ризолитов из обозначенных выше палеопочв; 2) изучить минеральный, химический и изотопный составы ризолитов; 3) изучить влияние диагенеза (затопление, погребение, наложенное почвообразование) на тип и состав ризолитов.



Рис. 1. Район исследования: PV – Павловский карьер; ST – Стойленский карьер; PZ – карьер Полотняный завод; BR – карьер Бронцы.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Перечень изученных ризолитов и их характеристика даны в табл. 1. Вещественный состав ризолитов изучали с применением комплекса

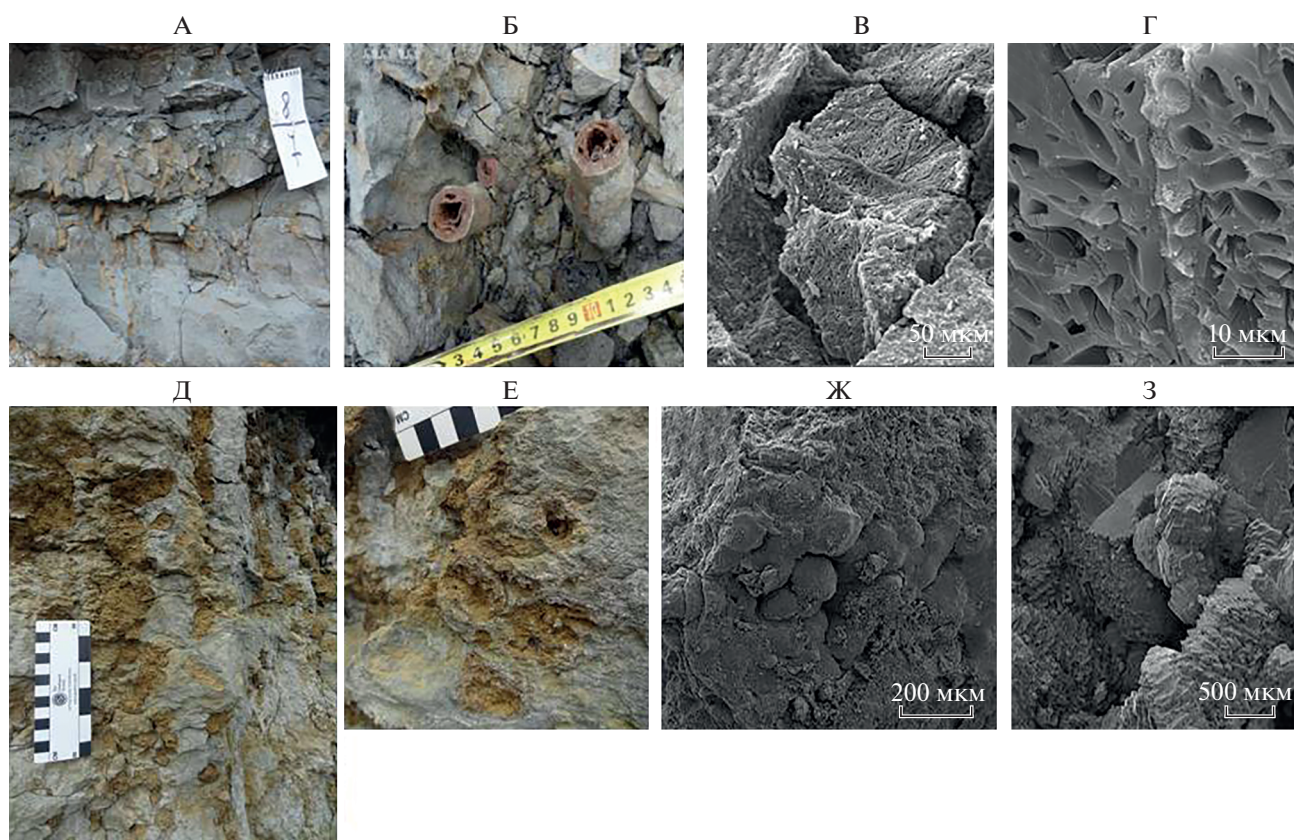
**Таблица 1.** Изученные ризолиты из палеопочв среднего-позднего девона и раннего карбона: место отбора, морфологические характеристики, вещественный состав

| № ризолита | Характеристика образца           | Место отбора* | Возраст | Порода        | Тип ризолита                  | Диаметр/длина/встречаемость             | Вещественный состав                            |
|------------|----------------------------------|---------------|---------|---------------|-------------------------------|---|--|
| R8         | PV13-4 подошва                   | 1             | D2g     | Аргиллит      | Тип 5 петрификация            | 1.5 см/?/единичные                      | Сидерит, гетит, каолинит (сл.)                 |
| R6         | PV11, склон, ППЗ                 | 1             | D3fr    | Туфо-аргиллит | Тип 5 петрификация            | 3 см/60 см/кластеры до 60 корней        | Сидерит, кварц (сл.), сохранение тканей, уголь |
| R9-1       | PV13-4а слой 10, мелкий          | 1             | D3fr    | Туфо-песчаник | Тип 5 петрификация            | 1 см/?/единичные                        | Сидерит, гетит, каолинит (сл.)                 |
| R9-2       | PV13-4а слой 10, крупный         | 1             | D3fr    | Туфо-песчаник | Тип 5 петрификация            | 3 см/?/единичные                        | Сидерит, гетит                                 |
| R9-3       | PV13-4а слой 10, сростки         | 1             | D3fr    | Туфо-песчаник | Тип 5 петрификация            | 3 см/?/единичные                        | Сидерит, гетит                                 |
| R10        | PV13-4а кровля сросток           | 1             | D3fr    | Туфо-песчаник | Тип 5 петрификация            | 3 см/?/единичные                        | Сидерит, гетит, сохранение тканей, уголь       |
| R11        | PV13-15                          | 1             | D2g     | Аргиллит      | Тип 5 петрификация            | 2-4 мм/?/15 на 1 дм                     | Гетит, каолинит                                |
| R17        | PV 17 материал клина             | 1             | D2g     | Аргиллит      | Тип 5 петрификация + диагенез | 15 см/30 см/до 6 на 1 м                 | Гетит, сидерит, гематит, каолинит              |
| R18        | PV 17-4 слой 6 верх мелкие корни | 1             | D3fr    | Туфо-аргиллит | Тип 5 петрификация            | 1.5 см/?/единичные                      | Гетит, сидерит                                 |
| R19        | PV17-4 слой 6 верх крупные корни | 1             | D3fr    | Туфо-аргиллит | Тип 5 петрификация            | 3 см/?/единичные                        | Гетит  |
| R20        | PV17-4 слой 6 корни из конкреции | 1             | D3fr    | Туфо-аргиллит | Тип 5 петрификация + диагенез | 3 см/?/пучки до 7 корней                | Гетит, сидерит (сл.)                           |
| R26        | PV 17 пни <i>Calixylon</i>       | 1             | D3fr    | Туфо-аргиллит | Тип 5 петрификация            | 20 × 20 см, ствол 8 см                  | Пирит, древесина <i>Calixylon</i> , уголь      |
| R29        | ST19-8                           | 2             | D3fr    | Аргиллит      | Тип 5 петрификация            | 2-3 см/>150 см/густая вертикальная сеть | Гетит, сидерит, каолинит, кварц                |

Таблица 1. Окончание

| № ризолита | Характеристика образца                | Место отбора* | Возраст | Порода    | Тип ризолита                                      | Диаметр/длина/встречаемость                      | Вещественный состав                                 |
|------------|---------------------------------------|---------------|---------|-----------|---|--|---|
| R25        | PZ 13 черный ризоидный известняк, КНУ | 3             | C1mh3   | Известняк | Типы 1 + 5 каналы-пустоты + петрификация          | Первые мм/60 см/до 10 на 1 дм                    | Гетит   |
| R1         | PZ13-6а ПП1, КНУ                      | 3             | C1mh3   | Известняк | Тип 2 заполнение каналов (слепки)                 | 3–5 мм/до 2 см/единичные                         | Кальцит, доломит (сл.)                              |
| R2         | PZ13-1                                | 3             | C1mh2   | Песок     | Тип 5 петрификация                                | До 2 см/5 см/группы 4 шт., единичные             | Кальцит, гетит                                      |
| R3         | PZ15-6-2 ПП1, КНУ                     | 3             | C1mh3   | Известняк | Тип 2 заполнение каналов (слепки)                 | До 1 см/2–7 см/единичные                         | Кальцит, доломит (сл.), кварц (сл.), каолинит (сл.) |
| R4         | PZ15-6, 6-3 ПП1, КНУ                  | 3             | C1mh3   | Известняк | Тип 2 заполнение каналов (слепки)                 | До 1 см/2–7 см/единичные                         | Кальцит, доломит (сл.), кварц (сл.), каолинит (сл.) |
| R5         | PZ15-6-1, ПП2, КНУ                    | 3             | C1mh3   | Известняк | Тип 2 заполнение каналов (слепки)                 | До 1 см/2–7 см/единичные                         | Кальцит, доломит (сл.), кварц (сл.)                 |
| R7         | PZ <i>Stigmara ficosides</i>          | 3             | C1mh1   | Известняк | Тип 2 заполнение каналов (слепки)                 | <i>Stigmara ficosides</i> , длина более 1 м      | Кальцит, доломит (сл.), кварц (сл.)                 |
| R27        | BR 2015, VN1                          | 4             | C1vn1   | Известняк | Тип 1 + 4: каналы-пустоты + ризокреции (микориза) | Первые мм/до 20 см/густо                         | Ожелезнение   |
| R23        | BR 2015, VN2                          | 4             | C1vn2   | Известняк | Тип 1 + 4: каналы-пустоты + ризокреции (микориза) | Каналы 4 мм, ризокреции 3–6 см/50 см/> 10 на 1 м | Кальцит, доломит (сл.)                              |
| R28        | PZ 13, тарусский гор.                 | 3             | C1tr1   | Известняк | Тип 1 отпечатки                                   | Первые мм/10 см + 60 см/до 10 на 1 м             | Ожелезнение   |

\* Место отбора: 1 – Павловский карьер гранитов, Воронежская область; 2 – карьер Стойленского ГОКа, Старый Оскол, Белгородская область; 3 – карьер Пологняный завод, Калужская область; 4 – карьер Бронцы, Калужская область.



**Рис. 2.** Петрифицированные ризолиты: А–Г – Павловский карьер – R6 (здесь и далее см. табл. 1): А – фото ризолитов, общий вид; Б – ризолиты (деталь); В, Г – строение тканей корня (СЭМ); Д–З – Стойленский карьер – R29: Д – фото ризолитов, общий вид; Е – ризолиты, поперечный срез; Ж – споры эндомикоризы на поверхности ризолита; З – конкреции сидерита в полостях корневых каналов.

минералого-геохимических и изотопных методов: минеральный состав – методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3 ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение, с шагом  $0.1^\circ$  и временем сканирования 10 с), химический состав образцов – методом рентген-флуоресценции (Spectroscan Макс-GV), изотопный состав углерода карбонатов – методом масс-спектрометрии; микроморфологические особенности – методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с микроанализатором (Tescan Vega 3). Изображения высокого разрешения для отдельных образцов получали с применением автоматизированной системы Qemscan® 650F (TechnoInfo).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Ризолиты в палеопочвах среднего-позднего девона*

Ризолиты в палеопочвах этого возраста изучены в Павловском карьере гранитов (Воронежская область) и карьере Стойленского горно-обогатительного комбината (ГОКа) (Старый Оскол, Белгородская область). В обоих случаях они представлены преимущественно петрифицированными

единичными корнями и корневыми системами различных растений (тип 5 по классификации Клаппа).

В Павловском карьере петрифицированные корни в палеопочвах девона характеризуются сходным трубчатым габитусом (типа сигары) и имеют диаметр от первых миллиметров до 3 см (рис. 2А, 2Б). Ризолиты могут быть единичными или формировать пучки – кластеры. Глубина проникновения их также различна, от первых сантиметров до 50–60 см. В минеральном составе ризолитов доминируют Fe-содержащие минералы: сидерит и гетит – в разных пропорциях. Некоторые из них содержат углефицированное органическое вещество с частичным сохранением строения тканей, а также пирит (рис. 2В, 2Г).

Исключительной сохранностью характеризуются замещенные сидеритом корни палеопочвы, сформированной на склоне и катастрофически захороненной под метровым слоем плотных аргиллитов. Эти ризолиты, как правило, содержат сохранившиеся остатки органического вещества, что позволило изучить их внутреннее строение. В центральной части корня расположен проводя-

ший цилиндр (отчетливо наблюдается только в проксимальной части корня), состоящий из проводящих элементов прото- и метаксилемы. Центральный проводящий цилиндр окружен хорошо развитой запасующей паренхимой первичной коры. Далее в направлении от центральной части корня следует вторичная кора, более тонкая, чем первичная, но существенно более плотная. Вторичная кора покрыта экзодермой, имеющей отчетливо двуслойное строение. Детали строения этих ризолитов опубликованы в работе Наугольных [11], который отнес данные корневые системы к новому виду примитивного прогимноспермового растения — *Radicitis devonicus* Naugolnykh, близкому родом *Archaeopteris* Dawson и *Tanaites* Krassilov et al.

В карьере Стойленского ГОКа (Белгородская область) петрифицированные ризолиты в верхнедевонской (франской) палеопочве представлены системой вертикально ориентированных охристых зон, охватывающих всю видимую мощность профиля — более 150 см (рис. 2Д, 2Е). Они сложены отдельностями диаметром 1–2 см, имеющими цилиндрическое строение с узким центральным каналом. Ризолиты обогащены  $Fe_2O_3$  (52%). В минеральном составе материала, слагающего ризолиты, доминирует гетит, содержится сидерит. Результаты их изучения методом сканирующей электронной микроскопии с анализатором показали, что новообразованные Fe-содержащие минералы представлены двумя типами: 1 — корки, покрывающие неровности поверхностей и состоящие из игольчатых кристаллов, корки приурочены к корневому каналу; 2 — конкреционные образования (сростки кристаллов) сидерита (рис. 23). В их химическом составе помимо Fe (34%) и С (12%) присутствуют Са (3%), примеси Mn (0.2%) и Mg (0.2%).

Дополнительно под минеральной пленкой обнаружены многочисленные шарообразные образования диаметром 50–100 мкм (рис. 2Ж). Редко ассоциациями с ними встречаются нити грибного мицелия, также покрытые минеральной пленкой. Эти структуры, видимо, представляют собой споры паразитирующих на корнях растений микоризных грибов.

Помимо ризолитов этого типа (тип 5), в палеопочвах Павловского карьера были выделены два подтипа ризолитов, являющиеся его производными. Это клинья, отнесенные к постпедогенно-преобразованным петрифицированным остаткам корневых систем деревьев (пней) и Fe-конкреции (отдельности), сложенные выветрелыми фрагментами петрифицированных корней. Далее при их описании используется термин “ризоконкреция”.

Клинья во множестве присутствуют в подошве педокомплекса, сформированного на водораздельных поверхностях (рис. 3А–3В). Ширина

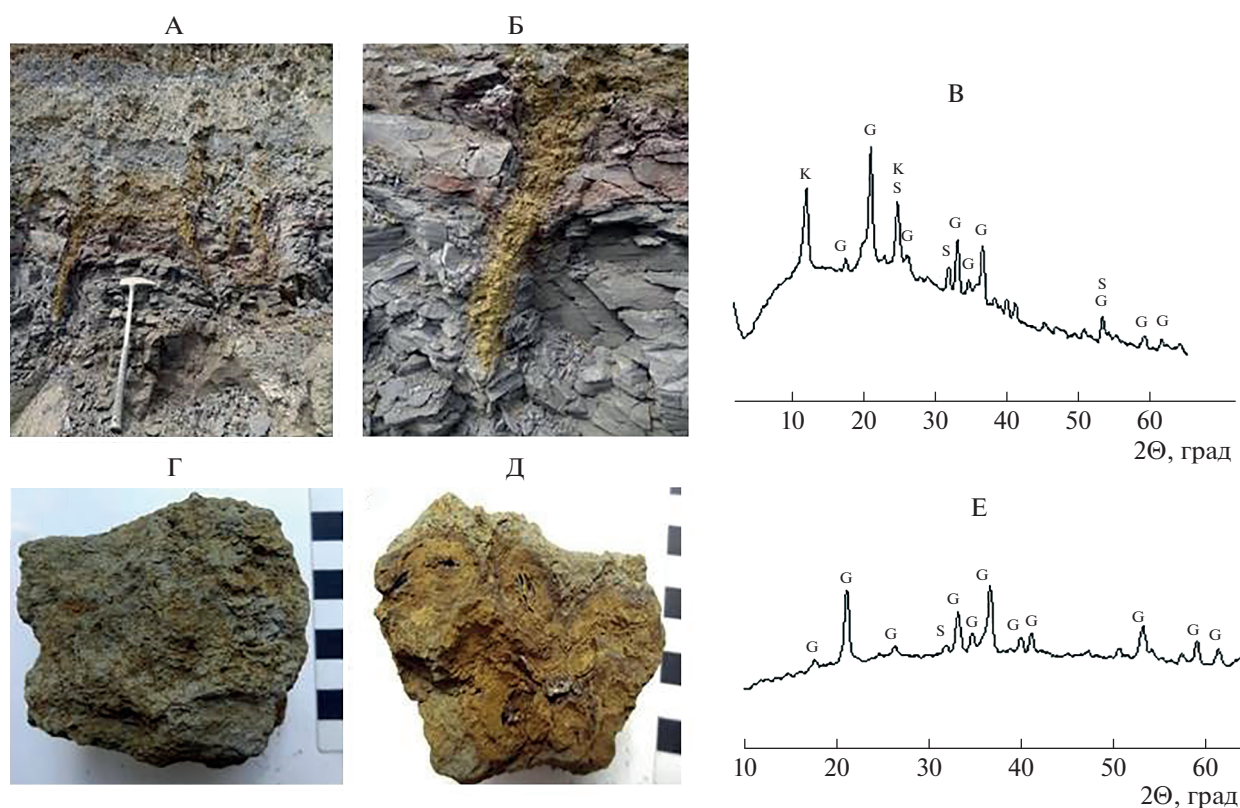
клиньев составляет 10–15 см, глубина проникновения 20–30 см. Латерально они распространены неравномерно. Средняя встречаемость составляет 5–6 клиньев на 1 м стенки карьера. Клинья заполнены *in situ* сформированными минералами железа с разной степенью его окисленности — гетитом, гематитом и сидеритом. В гранулометрическом составе материала клиньев преобладают тонкодисперсные фракции (до 40%). Как текстура, так и минеральный состав клиньев принципиально отличаются от вмещающего субстрата, преимущественно представленного каолинитом. Клинья имеют зональное строение: гетит-сидеритовое заполнение и окисленную гематитовую периферию. Данная особенность свидетельствует об отсутствии глубоких диагенетических преобразований палеопочв, которые привели бы к регидратации гетита и замещению его гематитом [32]. Наличие последнего отвечает хорошо дренированным условиям. Размеры и форма клиньев морфологически напоминают корневые системы археоптерисовых, впервые описанные Снигиревской [13] в отложениях девона на территории Донбасса.

Охристые ризоконкреции, в разрезе состоящие из пучков петрифицированных корней, имеют чаще всего округлую форму с диаметром до 10 см (рис. 3Г–3Е). Внешняя поверхность их покрыта светло-серой каолиновой “рубашкой” со следами направленного перемещения глины (глинистых кутан). Конкреции сложены преимущественно гетитом с незначительной примесью сидерита. Полагаем, что конкреции являются реликтовыми образованиями, а именно продуктом вторичного внутрпочвенного выветривания петрифицированных корней. Конкреции такого типа встречаются в палеопочвах из нижних частей педокомплексов, сформированных на склоне и водоразделе. Материал, слагающий конкреции, генетически частично принадлежит почвам последующих (наложенных) педосфер.

Химический состав петрифицированных ризолитов представлен на рис. S1. В составе ризолитов, обогащенных сидеритом, преобладают Fe (6–46%) и С (до 11%), а также Si и Al вмещающих каолиновых пород. В заметном количестве могут содержаться Mn (1–50%), Ti (1–5%), а также (в порядке убывания): Ca, Co, Mg, P, Ba, S.

Химический состав ризолитов, обогащенных гетитом (в том числе клиньев и конкреций), более однородный. Здесь абсолютно доминирует Fe (30–60%). Содержание С уменьшается до 2%, Ti не превышает 2%. В следовых количествах присутствуют Са, Со, а также Si и Al вмещающих каолиновых пород. Mn не обнаружен.

Изотопный состав С в сидерите ризолитов находится в пределах  $-12.5 < \delta^{13}C < -9\text{‰}$ , а вмещающей ризолиты почвы  $-8.6 < \delta^{13}C < -5.8\text{‰}$  (рис. S2).



**Рис. 3.** Павловский карьер. А–В – ризолиты-клинья (*R17*): А – общий вид фосилизированной корневой системы археоптерисовых; Б – клин (фрагмент корневой системы); В – минеральный состав материала заполнения клина (данные рентгеновской дифрактометрии); Г–Е – ризоконкреция (*R20*): Г – конкреция, сложенная ризолитами и покрытая глинистой кутаной (“рубашкой”); Д – конкреция в разрезе, видны пучки корней с концентрическим строением; Е – минеральный состав конкреции (данные рентгеновской дифрактометрии). Обозначения: К – каолинит, G – гетит, S – сидерит.

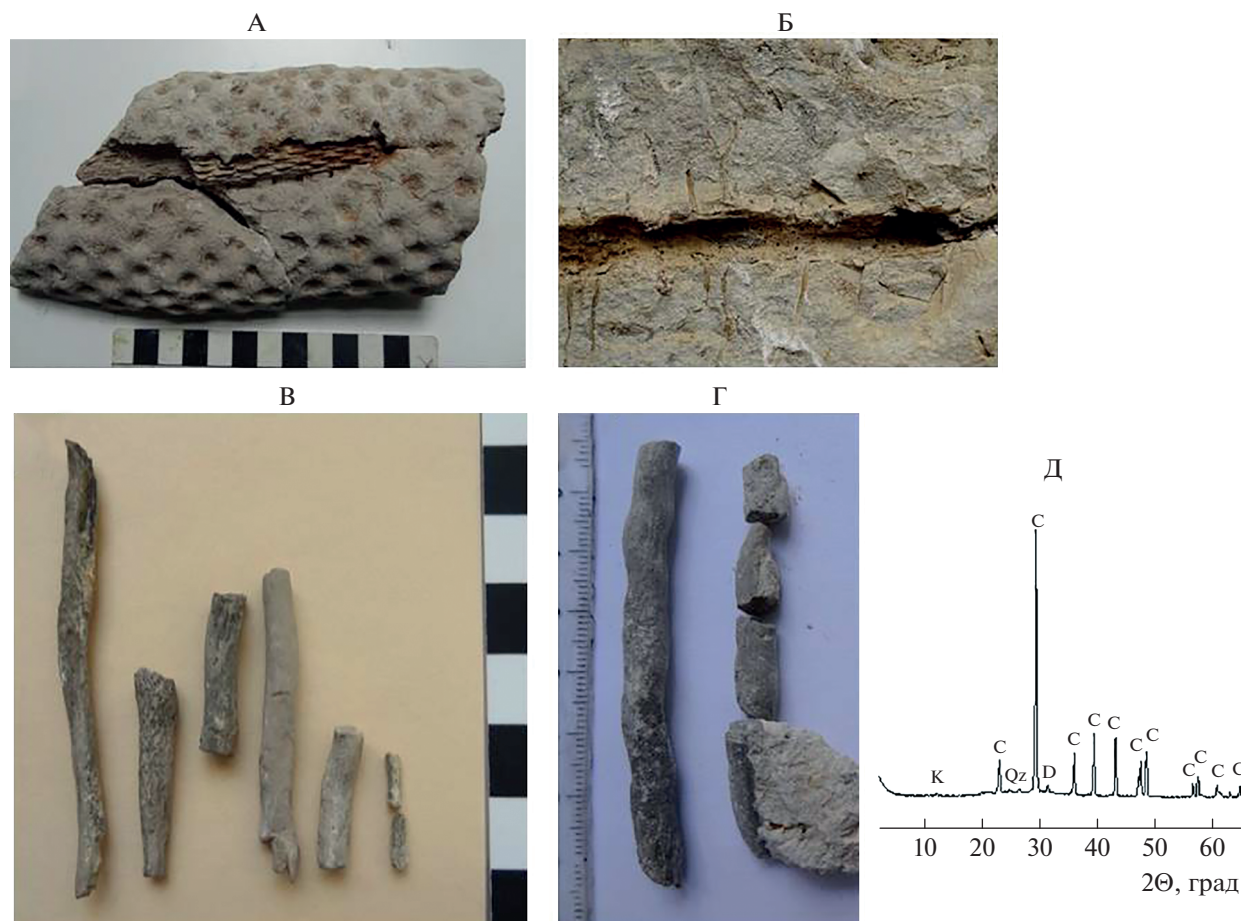
Изотопный состав С нескольких образцов древесины археоптерисовых (*Callixylon*) составляет  $-21.48 \pm 2.02\text{‰}$ , что отвечает изотопному составу С растений с С3-типом фотосинтеза. Таким образом, изотопный состав С в ризолитах формировался при участии  $\text{CO}_2$  дыхания корней и углерода разлагающихся растительных тканей. Изотопный состав  $\delta^{18}\text{O}$  сидерита в ризолитах составляет  $-4.1 < \delta^{18}\text{O} < -2.9\text{‰}$ , а вмещающей их почвы  $-6.8 < \delta^{18}\text{O} < -3.9\text{‰}$ . Известно, что величина фракционирования  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов зависит от температуры [12]. В формуле для расчета температуры формирования карбонатов используется изотопный состав кислорода атмосферных осадков, который определяется сложной многопараметрической зависимостью. Из-за этого количественные оценки палеотемператур с использованием изотопного состава кислорода карбонатов сложны и неоднозначны [12]. Полученные в данной работе экспериментальные данные свидетельствуют, что ризолиты формировались при более низких по сравнению с почвенной массой температурах, по-видимому, уже на этапе затоп-

ления почвы. Используя современный изотопно-температурный градиент, составляющий  $-0.58\text{‰}$  на  $1^\circ\text{C}$ , а для Лёссового плато Китая оцененный в  $-0.3\text{‰}$  на  $1^\circ\text{C}$  [5, 12], можно заключить, что разница в температурах формирования карбонатов почвенной массы и ризолитов составляла  $5^\circ\text{C}$  (либо  $9^\circ\text{C}$ ).

#### *Ризолиты в палеопочвах раннего карбона*

Основной тип ризолитов в этих палеопочвах – это тип 2 – заполнения корневых каналов-пустот (или слепки). Реже встречаются ризолиты типа 1 – отпечатки и каналы-пустоты; единично – тип 4 – ризокреции и тип 5 – петрифицированные ризолиты. В отличие от ризолитов из палеопочв девона для всех ризолитов из палеопочв раннего карбона характерна полная минерализация растительных тканей, отсутствие пиритизированных и замещенных сидеритом корней [1, 2, 21].

Ризолиты-слепки формируются как по мелким одиночным корням растений травянистого облика, так и по ризофорам (корненосцам) древовидных плауновидных (стигмариям) (рис. 4).



**Рис. 4.** Ризолиты-слепки из палеопочв раннего карбона: А – *Stigmaria ficoides* (R7); Б – отпечаток коры и железненных аппендиксов *Stigmaria ficoides*, карьер Полотняный завод; В – ризолиты из ПП1 уровня КНУ, карьер Полотняный завод (R1, R3, R4); Г – ризолиты из ПП2 уровня КНУ, карьер Полотняный завод (R5); Д – минеральный состав ризолитов R3. С – кальцит; К – каолинит; Qz – кварц; D – доломит.

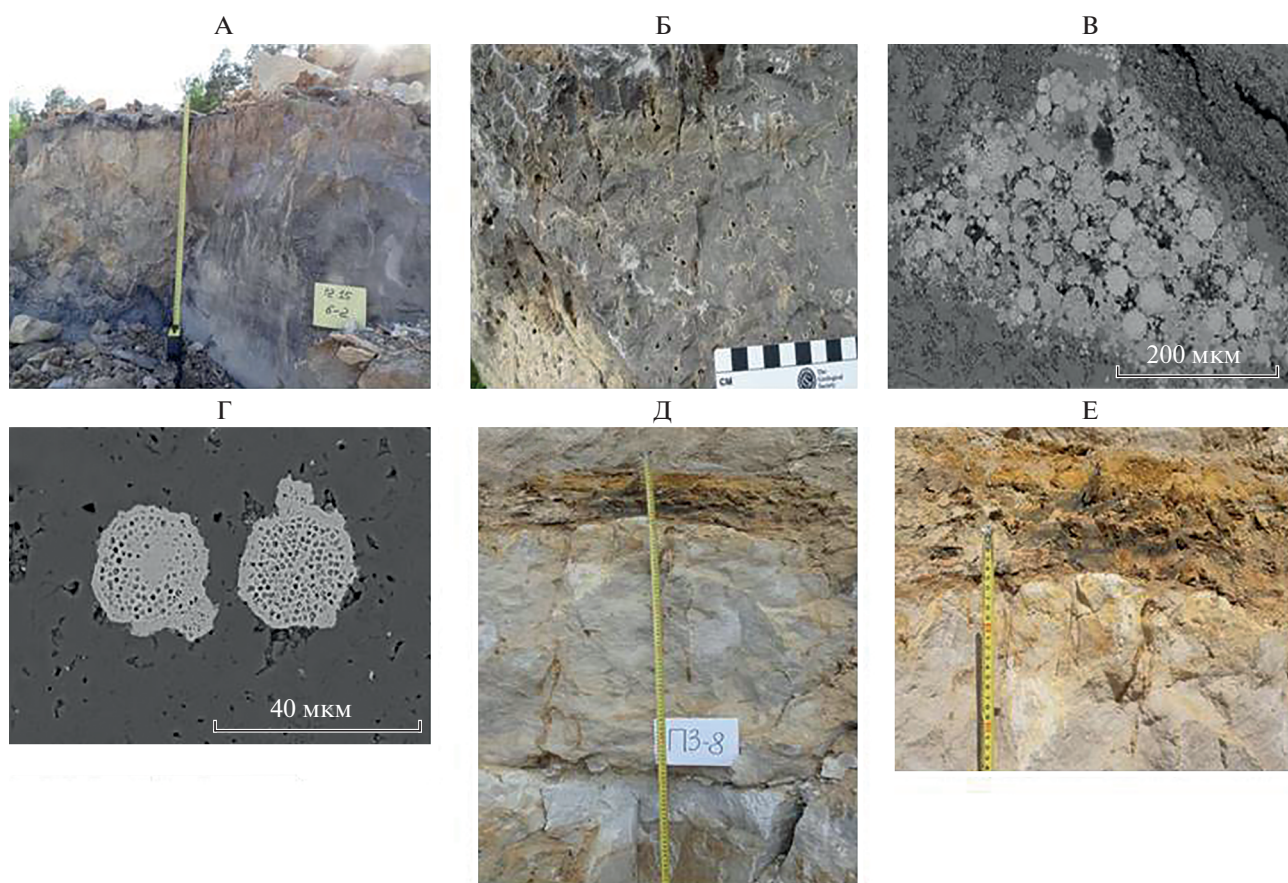
Все они сложены преимущественно кальцитом с незначительной примесью доломита, следовыми количествами кварца и редко – каолинита. Поверхность слепков ожезжена, при этом ее цвет может быть как охристым, так и темно-серым до черного. Последнее характерно для гидроморфных глеевых почв.

Изучение химического состава ризолитов-слепков показало, что основными элементами в них являются Са, С, Al, Si. Дополнительно в ризолитах содержатся (в порядке убывания): Yb, Fe, Mg, Mn, Na, Co, Sr, Ti, K, P, S, Rb. Содержание Yb в образцах очень высокое, может достигать 2%. Однако оно отвечает таковому вмещающих морских известняков (рис. S3).

Вторым по значимости типом ризолитов в визейских палеопочвах, сформированных на известковом субстрате, являются отпечатки и каналы-пустоты. Характерным примером каналов-пустот являются ризолиты палеостринного (болотно-озерного) комплекса в кровле михай-

ловского горизонта визе, известного в геологической литературе как “черный ризоидный известняк”, “поверхность Геккера–Швецова”, “Акульшинский палеостринный комплекс” [9, 19, 26] (рис. 5А, 5Б). Детали исследования этого объекта в ряде карьеров Московской, Калужской и Рязанской областей опубликованы в работе [1]. Слагающие его отложения сформированы в условиях прибрежной болотистой низменности, в качестве современного аналога которых можно назвать ландшафты национального парка “Эверглейдс” (Флорида, США). Каналы, образующие густую вертикальную сеть, представляют собой полости, которые остались после разложения корневых тканей, стенки их ожезжены. Каналы имеют диаметр до 1 см и пронизывают всю толщу этого слоя, до максимальной глубины 1.3 м (средняя глубина 60–80 см). Окончания каналов – ультратонкие (микронной размерности) волоски замещены (петрифицированы) Fe-оксидами, как правило, с сохранением структуры тканей (рис. 5В, 5Г). Та-





**Рис. 5.** Каналы-пустоты и отпечатки корней в палеопочвах раннего карбона: А–Г – “черный ризоидный известняк” (кровля михайловского горизонта, визейский ярус) (R25): А – фото карьер Полотняный завод; Б – фото карьер Курагино. В, Г – корневые волоски петрифицированы гетитом с сохранением структуры тканей (данные Qemscan® 650F and High Resolution BSE imaging); Д–Е – палеопочва серпуховского яруса, тарусского горизонта в карьере Полотняный завод (R28): Д – общий вид педокомплекса с двумя типами корневых систем; Е – верхняя часть педокомплекса с густой сетью отпечатков коротких корней.

ким образом, описанные ризолиты имеют комбинированную природу, совмещающая два типа образований.

На рис. 5Д, 5Е даны фотографии педокомплекса серпуховского яруса тарусского горизонта в карьере Полотняный завод (Калужская область). В нижней палеопочве педокомплекса имеются множественные ризолиты, представленные ожелезненными отпечатками тонких корней двух типов: коротких (10 см) и длинных (до 60 см) вертикально вниз уходящих ветвящихся корней. В кровле концентрация отпечатков коротких корней выше. Глубокое проникновение корневых систем отвечает хорошим дренажным условиям, а их высокая плотность – благоприятным условиям для произрастания растений. Растительный покров здесь, по-видимому, был представлен травянистой растительностью. Наличие в одном профиле двух типов корневых систем может свидетельствовать о произрастании разновозрастных растений, растений двух и более видов, либо говорить в пользу сезонности климата.

В палеопочве подзолистого типа (сподосоли), сформированной на терригенных песчаных отложениях в кровле михайловского горизонта визе (карьер Полотняный завод) [21], фоссилизированные корни представлены петрифицированными ризолитами, сложенными смесью гетита и кальцита (рис. 6). Ризолиты единичные, либо собранные в пучки (кластеры), имеют форму конусовидной трубки длиной до 5 см и диаметром около 1 см. В некоторых случаях сохраняется концентрическое строение корня. Вокруг ризолитов развиты зоны ожелезнения. Изучение химического состава данных ризолитов показало, что они обогащены Fe (43%), Ca, C, Co, Mo. Источником Ca в песчаных отложениях, на которых сформирована данная палеопочва, возможно, являются остатки раковин моллюсков [24, 38]. Аналогичные по строению ризолиты из дюнных песков Приангарья раннеголоценового возраста описаны в Голубцовым с соавт. [5].

Особый интерес представляют ризолиты-ризокреции (тип 4 по классификации Клаппа), об-



**Рис. 6.** Петрифицированные ризолиты (*R2*) в подосоли михайловского горизонта визейского яруса, карьер Полотняный завод: А – вид профиля; Б – поперечное сечение ризолитов; В, Г – ризолиты.

наруженные в палеопочве (кальцисоль) веневского горизонта в карьере Бронцы (Калужская область) [2]. Их морфологические особенности представлены на рис. 7. Ризокреции представляют собой трубки, в которые на глубине около 50 см от бывшей дневной поверхности переходят корневые каналы. Трубки имеют диаметр 3–6 см и длину до 10 см. Известковая масса, вмещающая трубки, сильно преобразована: представлена мягким, мучнистым кальцитом, который формирует почвенный горизонт (горизонт В палеопочвы) мощностью до 20 см. Электронно-микроскопическое изучение деталей строения ризолитов показало, что имеет место сохранность сосудистого строения тканей корня (рис. 8, А, 8, Б). Последние полностью замещены кальцитом. Снаружи трубки

состоят из многочисленных округлых образований диаметром около 50 мкм, которые сложены кальцитом микритовой размерности (рис. 8В, 8Г). Полагаем, что эти образования представляют собой споры симбиотических грибов (арбускулярной микоризы). Микоризные грибы, паразитирующие на корнях высших растений, оказывают существенное влияние на свойства ризосферы [28]. Они способны улучшать корневое дыхание, усиливать толерантность растений к неблагоприятным условиям, таким как аридность, бедность питательными элементами, соленость, другие стрессовые ситуации.

Первые находки следов симбиоза растения и арбускулярной микоризы относятся к раннему девону, и он является древнейшим симбиозом в исто-

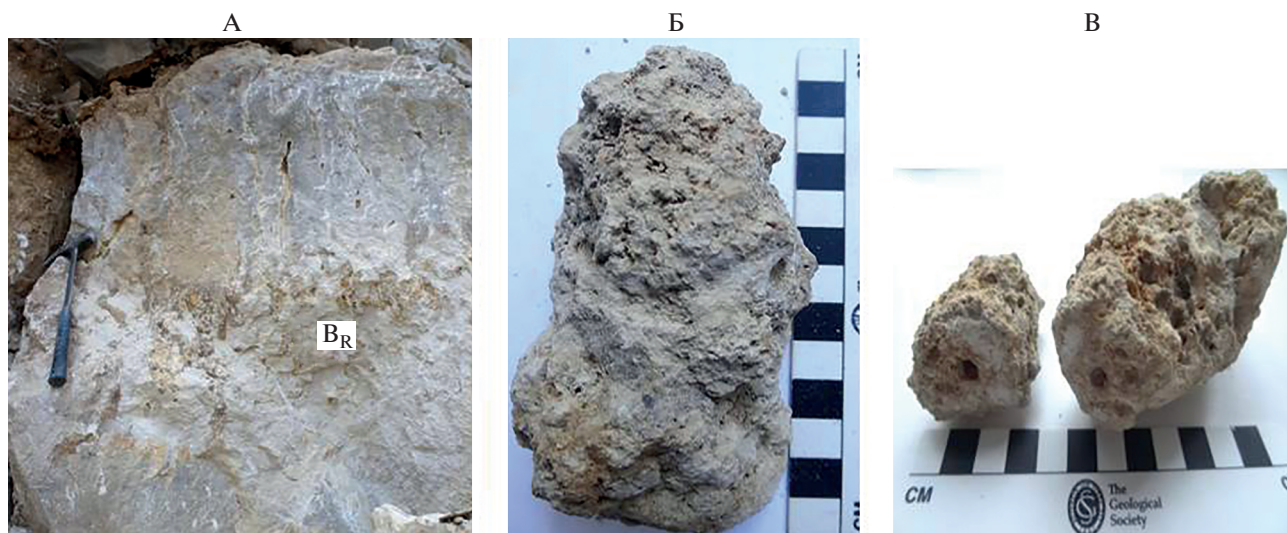


Рис. 7. Ризолиты-ризокреции в кальцисоли веневского горизонта в карьере Бронцы (R23): А – общий вид палеопочвы, B<sub>R</sub> – горизонт развития ризокреций; Б, В – отдельные ризокреции (виден центральный полый канал).

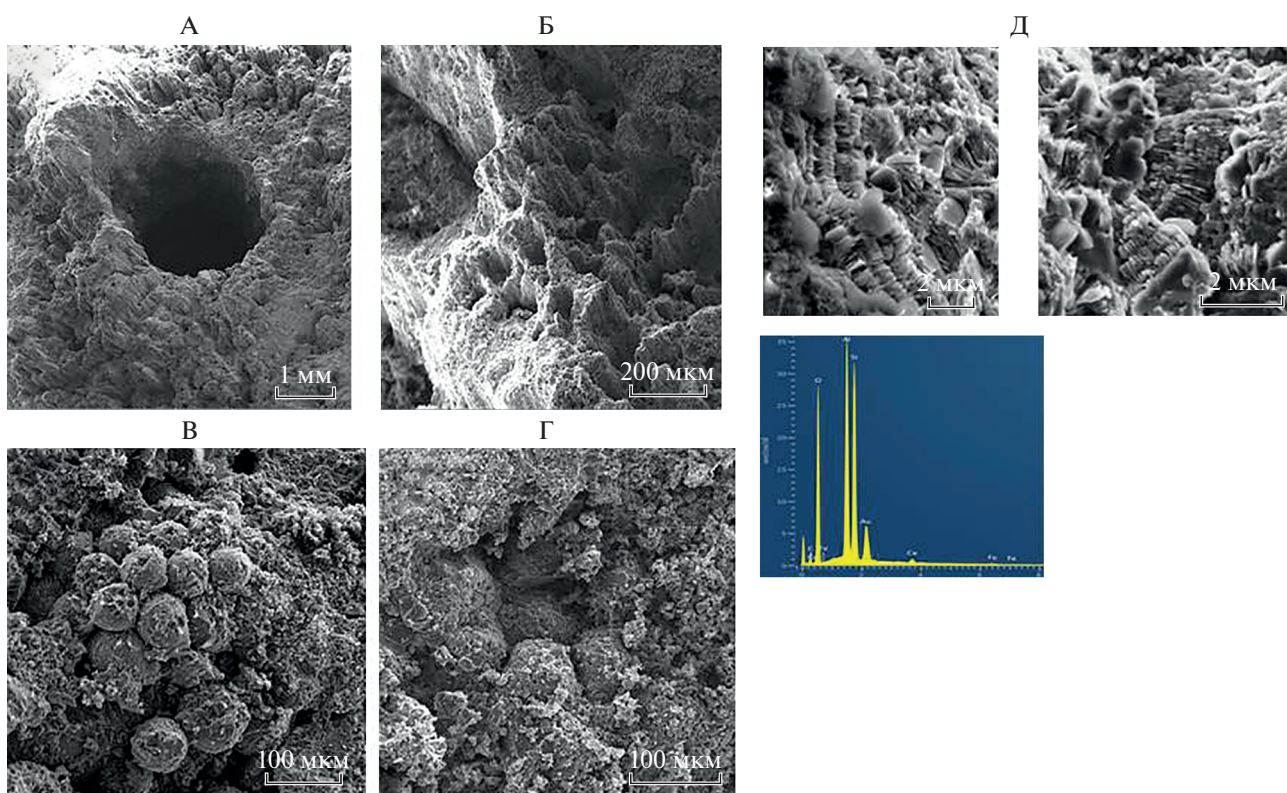


Рис. 8. Ризолиты-ризокреции в кальцисоли веневского горизонта в карьере Бронцы (R23) (СЭМ): А, Б – сохранение структуры тканей корня; В, Г – споры микоризных грибов; Д – новообразованный каолинит вермикулярного типа в ризосфере – микрофотографии и химический состав.

рии Земли [27, 36]. Предполагается, что большинство первых растений на Земле жили в симбиозе с грибами, которые способствовали заселению суши и их адаптации к условиям окружающей среды. В частности, подкисляя почву, грибы помогали из-

влечению питательных элементов ранним растениям, не имевшим настоящих корней. Известно, что грибы отличаются быстрым откликом на экологические стрессы и последующей адаптацией к изменившимся условиям. Таким образом, следы акти-

визации их в геологической летописи могут свидетельствовать о дестабилизации обстановок [44]. Например, уникальным и глобальным по масштабам было “грибное” событие биосферного кризиса на рубеже перми и триаса [44].

Описываемые ризокреции сформированы на обедненном жизненно-важными химическими элементами известковом субстрате. Формирование морфологически и аналитически выраженного горизонта аккумуляции вторичных карбонатов может свидетельствовать в пользу того, что на момент развития микоризы известковый субстрат уже находился в затвердевшем состоянии. Избыток Са после извлечения из него необходимых питательных для жизни и развития растений элементов оставался в растворе и впоследствии формировал чехол вокруг корня (собственно ризокрецию) [24, 46]. Для этого типа фоссилий характерно частичное сохранение структуры растительных тканей, которые замещены преимущественно кальцитом с небольшой примесью кварца и доломита. Помимо карбонатов во внешней части чехла обнаружен каолинит “вермикулярного” типа – продукт аутигенного минералообразования в ризосфере (рис. 8, Д) [4]. Формированию его способствовало подкисление, имеющее место в ризосферной почве [15, 16, 28]. Известно, что подкисление может быть обусловлено целым рядом факторов, в том числе дыханием корней, выделением органических кислот, обменными реакциями [28]. Следствием чего является растворение вмещающего известняка, высвобождение и концентрирование Si и Al, необходимых для синтеза каолинита. Описываемая палеопочвы принадлежат к семиаридному типу [2], и деятельность микоризы, по-видимому, несла важные экологические функции.

Сравнение химического состава ризокреций с составом вмещающей палеопочвы показало, что ризокреции относительно палеопочвы обогащены (в порядке убывания): Са (37%), Fe (1%), Si, Yb, Со, Ti, Р (рис. S3). Аккумуляция Р может быть обусловлена деятельностью грибов. Накоплению Fe способствуют подкисление, смена окислительно-восстановительных условий, а также формирование комплексов с органическим веществом [28]. Последний механизм, наряду с обменными реакциями с участием Са, объясняет некоторую аккумуляцию Yb [43].

Изотопный состав карбонатов в ризолитах-слепах изменяется в широких пределах:  $-5.68 < \delta^{13}\text{C} < -1.16\text{‰}$  и в целом близок изотопному составу вмещающих карбонатов ( $-4.66 < \delta^{13}\text{C} < 0.6\text{‰}$ ) (рис. S4). Вместе с тем изотопный состав С карбонатов в составе ризокреций существенно облегчен по сравнению с изотопным составом палеопочвы; разница в изотопном составе составляет более 6‰. Описываемые ризолиты-ризокреции сформированы в почвах автоморфного ряда. За-

легание горизонта почвенных карбонатов на глубине 50 см соответствует полуаридному климату с величиной осадков около 600 мм/год [1, 2, 21, 46]. Ризокреции сформировались, видимо, еще при жизни растений (до момента погребения почвы), когда система была открыта по отношению к атмосферному  $\text{CO}_2$ , и формирование чехла могло способствовать гибели растения [30].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ризолиты являются ценнейшими свидетельствами былых биосфер. Обнаружение в Павловском карьере в палеопочвах среднего-позднего девона двух принципиально различных видов петрифицированных ризолитов: трубок разной длины, диаметра и степени диагенетических преобразований и клиньев показывает, что палеопочвы формировались под двумя типами растительности: травянистой и(или) кустарниковой, и древесной. Основным фактором, определяющим различия в растительных сообществах, был рельеф. Возвышенные участки суши исходно занимал густой археоптерисовый лес, остатки корневых систем которых представлены клиньями. Другие вегетативные органы этих растений (пни, стволы и ветви) в изобилии встречены в отвалах карьера. Широкое распространение древесной археоптерисовой растительности контролировало эрозионные процессы, способствовало закреплению почвенного покрова и обеспечило сохранность этих древнейших палеопочв.

Ранее [22] показано, что палеопочвы в отложениях Павловского карьера формируют сложные педокомплексы, состоящие из четырех и более палеопочв. Лесные (археоптерисовые) палеопочвы в подошве педокомплекса сменили почвы, сформированные под мелкой и средней травянисто-кустарниковой растительностью, свидетельствами которой являются ризолиты-трубки. Этапы почвообразования чередовались с этапами затопления территории с последующим осадконакоплением. На этапе затопления корни растений замещались сидеритом. На стадии последующего этапа автоморфного почвообразования, будучи неустойчивым в условиях гипергенеза, сидерит в различной степени замещался гетитом. Некоторые ризолиты из кровли педокомплекса содержат пирит, Mn-оксиды, сохраняют структуру тканей, что отвечает условиям временного переувлажнения на этапах подтопления. Эти этапы отражает и утяжеление изотопного состава  $^{18}\text{O}$ , которое характерно для карбонатов, слагающих ризолиты.

В палеопочвах склонового педокомплекса отсутствуют ризолиты-клинья. В остальном закономерности в формировании облика педокомплекса и ризолитов, в частности, аналогичны описанным выше. Частичная пиритизация ризо-

литов в кровле педокомплекса свидетельствует о временном переувлажнении и (полу)гидроморфном характере палеопочв склона.

В сохранившихся палеопочвах пойменного комплекса среднедевонского (живетский ярус) возраста ризолиты не обнаружены. Произраставшие здесь растения не имели корней (*Orestovia/Schuguria*, *Nematophyton*). Многочисленные находки стволов, ветвей и пней древесных растений в вулканогенных породах, перекрывающих этот педокомплекс, имеют аллохтонную природу. Распространенная пиритизация растительных фрагментов свидетельствует о преобладании гидроморфных обстановок [22].

Петрифицированные ризолиты обогащены в первую очередь Fe и Mn, а также C, Ca, Mg, Co, Ti. Минеральная форма Fe определяется условиями педодиагенеза. Это могут быть сидерит, гетит, гематит, а также пирит. Содержание Ti в ризолитах в отдельных случаях может достигать 4% и более, при среднем – 2%. Методом электронной микроскопии показано, что Ti входит в состав аутигенного оксида – анатаза. Он является продуктом выветривания ильменита ( $FeTiO_3$ ) в составе вулканитов осадочных пород, на которых сформированы палеопочвы.

В палеопочвах раннего карбона на известковых субстратах основными типами ризолитов являются слепки и каналы-пустоты. Растительные ткани полностью минерализованы. Слепки сложены кальцитом. Материал слепков практически идентичен составу вмещающей массы, изотопный состав C кальцита слегка облегчен благодаря разбавлению его карбонатом ризосферы из окружения бывшего корня.

Полагаем, что тип сформировавшего ризолита определяется комплексом факторов: типом растительности, почвообразующей породой, водным режимом палеопочвы (дренажными условиями), условиями захоронения палеопочвы и его длительностью и др.

Так, петрифицированные корни с сохранением растительных тканей формируются в случае быстрого (катастрофического) захоронения палеопочвы осадками, препятствующими поступлению кислорода. Ризокреции являются прижизненными образованиями. Их формирование осуществлялось при участии микоризных грибов. Сопряженность последних со стрессовыми ситуациями [44] может в данном конкретном случае (веневский горизонт С1) свидетельствовать об их развитии в связи с надвигающейся на рубеже раннего и среднего-позднего карбона аридизацией климата [29]. Каналы – пустоты формируются в результате медленного разложения растительных тканей параллельно с подтоплением территории и накоплением рыхлых осадков. В случае перекрытия палеопочвы карбонатными отложениями, каналы со

временем заполняются карбонатным цементом с формированием кальцитовых слепков.

Важным является вопрос о феномене сидеритового состава ризолитов в палеопочвах девона в сравнении с кальцитовым составом ризолитов в изученных палеопочвах карбона, а также в палеопочвах перми, мела, голоцена и в современных почвах разного генезиса [5, 8, 34, 45, 46]. Два фактора, по-видимому, являются определяющими. Во-первых, это состав почвообразующей породы и тип почвы, их минеральный и химический составы. В качестве второго фактора выступает состав атмосферы – концентрация в ней  $CO_2$  и  $O_2$ . Палеопочвы девона – оксисоли, глубовыветрелые, обедненные Ca, – типоморфным элементом здесь является железо. В условиях атмосферы девона, а именно высоких концентраций  $CO_2$  и низких  $O_2$  [25, 39], железо находится в подвижной восстановленной форме. В этих обстановках сидерит доминирует и на суше, и в море (конкреции, онколиты) [22]. Аутигенный сидерит формируется в слабовосстановительных (до нейтральных) и в восстановительных условиях [17]. В изученных палеопочвах такие обстановки отвечают этапу затопления автоморфных почв, либо первичному (полу)гидроморфизму почв. В первом случае сидерит можно рассматривать как продукт диагенеза, во втором он синлитогенен почвообразованию. Заварзиной [6] в лабораторных экспериментах показано, что образование сидерита в качестве единственной Fe-восстановленной фазы осуществляется при относительном дефиците Fe, высоком парциальном давлении  $CO_2$ , в присутствии гелеобразующих органических соединений. В нашем случае дополнительными факторами, способствующими формированию сидерита, являются низкие концентрации катионов: Ca(II), Mg(II), а также S, что лимитирует формирование пирита [35]. Сидерит – неустойчивый к окислению минерал. В присутствии  $O_2$  на этапе субаэрального развития территории он окисляется с формированием гетита и (редко) гематита [30]. При погребении в условиях дефицита  $O_2$  сидерит сохраняется без последующего преобразования в оксиды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как важнейшие компоненты гео-биосферы, палеопочвы, являются основными свидетельствами континентальных обстановок на Земле, начиная с раннего фанерозоя. Взрывное освоение суши растениями в девоне с появлением первых корнеобиетаемых почв – одно из глобальных этапов в развитии биосферы. Следствием чего, в частности, стали глобальные перестройки состава атмосферы и глобальные изменения климата [39].

Наличие ископаемых корней (ризолитов) *in situ* — это не только первостепенный почвенный признак. Из-за плохой сохранности наземных частей многих растений их фоссилизированные подземные части часто являются единственными свидетельствами растительности. В качестве примера можно назвать “стигмариевые” известняки визейского возраста на территории Подмосквового бассейна — уникальный тип захоронения ризофоров типа *Stigmaria*, принадлежавших древесным плауновидным. Горизонты “стигмариевых” известняков являются важнейшими составляющими геологической летописи [10]. Как продукт ископаемых ризосфер и былых биосфер в целом, ризолиты несут важнейшую палеоэкологическую функцию реконструкции растительного мира, его эволюции и обстановок окружающей среды. Биоразнообразии, продуктивности ценозов (биомасса), геоморфологические предпочтения, окислительно-восстановительные обстановки, особенно химического состава почвы, дренажные условия, стрессовые ситуации, температура почвы, состав атмосферы — это не полный круг решаемых задач. Необходимо добавить, что объем извлекаемой информации зависит от типа ризолита. Так, петрифицированные ризолиты и ризокреции, как биокосные тела — видоспецифичны. Они являются источником информации о строении тканей растений, их физиологии (изотопный состав С, химический состав, наличие микоризы) и, таким образом, решают вопросы идентификации растений, шире отражают экологические ситуации.

Тип сформировавшегося ризолита определяется комплексом факторов: типом растительности, почвообразующей породой и ее химическим составом, дренажными условиями, условиями захоронения палеопочвы и его длительностью и др. Состав ризолитов (химический и минеральный) — их важнейшая характеристика, которая, с одной стороны, отражает особенности среды формирования, а с другой, определяют их судьбу в диагенезе.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования с применением автоматической системы Qemscan® 650F выполнены на оборудовании компании “TechnoInfo” (Москва). Выражаем признательность сотруднику этой компании О.Е. Корнейчику за оказанную помощь.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0191-2019-0048) и при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН “Эволюция органического мира и планетарные процессы”.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Химический состав петрифицированных ризолитов девона (Павловский карьер).

Рис. S2. Изотопный состав С и О сидерита ризолитов и вмещающей почвенной массы, Павловский карьер, Воронежская область.

Рис. S3. Химический состав ризолитов-слепок из палеопочв раннего карбона.

Рис. S4. Изотопный состав углерода карбонатов в ризолитах из палеопочв раннего карбона и вмещающей их почвенной массы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // Палеонтологический журнал. 2016. № 4. С. 5–20.
2. Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Калинин П.И. Палеопочвы нижнего карбона в карьере “Бронцы” (Калужская область) // Почвоведение. 2018. № 7. С. 787–800.
3. Безносов П.А., Снигиревский С.М., Наугольных С.В., Лукшевич Э.В. Верхнедевонский комплекс отложенный дельтовой равнины на Северном Тимане // Vestnik IG Komi SC UB RAS. 2018. № 1. Р. 25–44. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-1-25-44>
4. Бортников Н.С., Новиков В.М., Савко А.Д., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Бушueva Е.Б., Крайнов А.В., Дмитриев Д.А. Структурно-морфологические особенности каолинита различных стадий литогенеза глинистых пород (на примере Воронежской антеклизы) // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 5. С. 426–440.
5. Голубцов В.А., Хохлова О.С., Черкашина А.А. Карбонатные ризолиты в дюнных песках долины реки Белой (Верхнее Приангарье) // Почвоведение. 2019. № 1. С. 97–108.
6. Заварзина Д.Г. Биогеохимические факторы преобразования соединений железа в восстановительной обстановке. Автореф. дис. ... к. г.-м. наук. М., 2001. 24 с.
7. Иноземцев С.А., Таргульян В.А. Верхнепермские палеопочвы: свойства, процессы, условия формирования. М.: ГЕОС, 2010. 188 с.
8. Иноземцев С.А., Наугольных С.В., Якименко Е.Ю. Верхнепермские палеопочвы на известняках: морфология и генезис (среднее течение р. Волга) // Почвоведение. 2011. № 6. С. 660–674.
9. Кабанов П.Б., Алексеева Т.В. и Алексеев А.О. Серпуховский ярус карбона в типовой местности: седиментология, минералогия, геохимия, сопоставление разрезов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2012. Т. 20. № 1. С. 18–48.
10. Мосейчик Ю.В. Раннекаменноугольная флора Подмосквового бассейна. Т. I. Состав, экология, эволюция, фитогеографические связи и стратиграфическое значение. М.: ГЕОС, 2009. 187 с.
11. Наугольных С.В. Новый представитель рода *Radicitis Potonie* из верхнедевонских отложений России // Pre-

- historic. Палеонтологическое наследие: изучение и сохранение. М.: Медиа-Гранд, 2015. С. 31–40.
12. Рысков Я.Г., Величко А.А., Николаев В.И., Олейник С.А., Тимирева С.Н., Нечаев В.П., Панин П.Г., Морозова Т.Д. Реконструкция палеотемператур и осадков в плейстоцене по изотопному составу гумуса и карбонатов лёссов Русской равнины // Почвоведение. 2008. № 9. С. 1062–1070.
  13. Снигиревская Н.С. Корневые системы археоптерисовых в верхнем девоне Донбасса // Ежегодник Всесоюзного палеонтологического общества. 1984. Вып. XXVII. С. 28–41.
  14. Снигиревский С.М., Кочева Л.С., Безносоев П.А., Павлова М.А. Северный Тиман как один из древнейших угленосных районов Земли. Мат-лы Всерос. конф. “Природное геологическое наследие Европейского севера России”. Сыктывкар, 2017. С. 77–80.
  15. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Лысак Л.В., Завгородняя Ю.А., Чалова Т.С., Карпунин М.М., Изосимова Ю.Г. Биологические характеристики и содержание подвижных соединений Fe, Al и Si в ризосфере ели в подзолистой почве // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1330–1339.
  16. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Данилин И.В., Изосимова Ю.Г., Чалова Т.С. Кислотно-основные свойства и состав глинистых минералов в ризосфере клена остролистного и ели обыкновенной в подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 6. С. 743–754.
  17. Теодорович Г.И. Аутигенные минералы осадочных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 233 с.
  18. Фефилова А.П. Конкреции в ископаемых почвах пермо-карбонных отложений Донецкого бассейна и их связь с климатом // Литология и полезные ископаемые. 1972. № 5. С. 67–74.
  19. Швецов М.С. К вопросу о стратиграфии нижнекаменноугольных отложений южного крыла Подмосковного бассейна // Вестн. Моск. горн. акад. 1922. Т. 1. № 2. С. 223–242.
  20. Шумилов И.Х. Условия сохранности инситных корневых систем в девонских отложениях Среднего Тимана // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. С. 60–69.
  21. 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 // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2016. V. 450. P. 1–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.02.030>
  22. Alekseeva T., Kabanov P., Alekseev A., Kalinin P., Alekseeva V. Characteristics of early Earth's critical zone based on Middle-Late Devonian palaeosols properties (Voronezh High, Russia) // Clays Clay Minerals. 2016. V. 64. № 5. P. 677–694.  
<https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.064044>
  23. Arefev M.P., Naugolnykh S.V. Fossil roots from the upper Tatarian deposits in the basin of the Sukhona and Malaya Severnaya Dvina rivers: stratigraphy, taxonomy and paleoecology // Paleontological J. 1998. V. 32. № 1. P. 82–96.
  24. Cramer M.D., Hawkins H.J. A physiological mechanism for the formation of root casts // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2009. 274. P. 125–133.
  25. Foster G.L., Royer D.L., Lunt D.J. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years // Nature Comm. 2017. V. 8. P. 14845.
  26. Gibshman N.B., Kabanov P.B., Alekseev A.S. et al. Novogurovsky quarry: Upper Visean and Serpukhovian, in Type and Reference Carboniferous Sections in the South Part of the Moscow Basin // Field Trip Guidebook of International IUSC Field Meeting. August 11–12. Moscow, 2009. P. 13–44.
  27. Harrier L.A. The arbuscular mycorrhizal symbiosis: a molecular review of the fungal dimension // J. Experiment. Botany. 2001. V. 52. Supl. 1. P. 469–478.
  28. Jones D.L., Hodge A., Kuzyakov Ya. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition // New Phytologist. 2004. V. 163. P. 459–480.
  29. 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. Sedimentary Res. 2010. V. 80. P. 195–215.
  30. Kholodov V.N., Butuzova G.Yu. Siderite formation and evolution of sedimentary iron ore deposits in the Earth's History // Geology Ore Deposits. 2008. V. 50. № 4. P. 299–319.
  31. Klappa C.F. Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance // Sedimentology. 1980. V. 27. P. 613–629.
  32. 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. Sedimentary Res. 2006. V. 76. P. 633–646.
  33. Nascimento D.L., Batezelli A., Ladeira F.S.B. The paleoecological and paleoenvironmental importance of root traces: plant distribution and topographic significance of root patterns in Upper Cretaceous paleosols // Catena. 2019. V. 172. P. 789–806.
  34. Naugolnykh S.V. Upper Cretaceous Paleosols of the Bain-Dzak Section, Southern Mongolia // Paleontological J. 2016. V. 50. № 12. P. 1451–1469.
  35. Passey S.R. The habit and origin of siderite spherules in the Eocene coal-bearing Prestfjall Formation, Faroe Islands // Int. J. Coal Geology. 2014. V. 122. P. 76–90.
  36. Raven J.A., Edwards D. Roots: evolutionary origins and biogeochemical significance // J. Experiment. Botany. 2001. V. 52. P. 381–401.
  37. Retallack G.J. Soils of the past: An introduction to paleopedology. Malden, USA: Blackwell Sci., 2001. 404 p.
  38. Retallack G.J., Huang C. Ecology and evolution of Devonian trees in New York, USA // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2011. V. 299. P. 110–128.
  39. Royer D.L., Berner R.A., Montanez I.P., Tabor N.J., Beerling D.J. CO<sub>2</sub> as a primary driver of Phanerozoic Climate // GSA Today. 2004. V. 4. № 3. P. 4–10.
  40. Shumilov I.Kh. Gleization and paleosols in Devonian red rocks of the Middle Timan Region // Lithology Mineral Res. 2014. V. 49. № 4. P. 308–319.

41. Sun Qingfeng, Wang Hong, Zamanian K. Radiocarbon age discrepancies between the carbonate cement and the root relicts of rhizoliths from the Badan Jaran and the Tenggeri deserts, Northwest China // *Catena*. 2019. V. 180. P. 263–270.
42. Tabor N.J., Myers T.S. Paleosols as indicators of paleo-environment and paleoclimate // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2015. V. 43. P. 11.1–11.29.
43. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems – A review // *Plant and Soil*. 2004. V. 267. P. 191–206.
44. Visscher H., Brinkhuis H., Dilcher D.L., Elsik W.C., Looij C.V., Rampino M.R., Traverse A. The terminal Paleozoic fungal event: evidence of terrestrial ecosystem destabilization and collapse // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Ecology*. 1996. V. 93. P. 2155–2158.
45. Yakimenko E., Inozemtsev S., Naugolnykh S. Upper Permian paleosols (Salarevskian Formation) in the central part of the Russian Platform: paleoecology and paleoenvironment // *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*. 2004. V. 21. № 1. P. 110–119.
46. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: forms and formation processes // *Earth-Sci. Rev.* 2016. V. 157. P. 1–17.

## Rhizoliths in Devonian and Early Carboniferous Paleosols and Their Paleoecological Interpretation

T. V. Alekseeva\*

*Institute Physical Chemical and Biological Problems of Soil Science Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

\*e-mail: alekseeva@issp.serpukhov.su

Collected *in situ* rhizoliths from Devonian and Early Carboniferous paleosols in the southern part of the Russian Platform (Kaluga, Belgorod and Voronezh oblasts) were studied by means of scanning electron microscopy, X-ray diffraction, XRF and mass – spectrometry. In Devonian paleosols developed from volcanic – sedimentary deposits, the rhizoliths are presented by petrified individual roots of different plants, rooting systems, and their diagenetically transformed products – ferruginous concretions. Mineralogically, they are dominated by goethite and siderite in different proportions. Some of them include charcoals and/or pyrite-substituted plant tissues. This kind of rhizoliths was developed under reducing conditions in (semi)hydromorphic paleosols or under flooding on the burial stage. Carboniferous paleosols on marine limestones contain several types of rhizoliths: casts (prevail), imprints and root channels (less abundant), rare rhizocretions with arbuscular mycorrhiza. All of them are characterized by complete mineralization of plant tissues. Casts and rhizocretions are substituted with calcite. The isotopic composition of C in the latter is within  $-5.68 < \delta^{13}\text{C} < -1.16\text{‰}$ . The data obtained show that rhizoliths are important sources of information on biodiversity, physiology of plants, paleoenvironments at different scales including global. The information content depends on the type of rhizolith.

**Keywords:** geochemistry, isotopic composition of C and O in carbonates, mycorrhiza, mineralogy, Paleozoic, siderite