

ИНСИТНЫЕ КОРНЕВЫЕ СИСТЕМЫ В ДЕВОНСКИХ ПАЛЕОПОЧВАХ СРЕДНЕГО ТИМАНА

© 2024 г. И. Х. Шумилов^{а, *}, О. П. Тельнова^{а, **}

^аИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: ikh_shumiliv@mail.ru

**e-mail: telnova@geo.komisc.ru

Поступила в редакцию 04.05.2023 г.

После доработки 15.07.2023 г.

Принята к публикации 17.08.2023 г.

По мере развития жизни существовало небольшое количество ключевых эволюционных событий, которые инициировали глобальные биосферные изменения. Одним из таких событий было взрывное развитие наземной растительности и появление в девонский период лесных экосистем. Для колонизации суши, начатой мохообразными и их предками, требовалось появление и развитие разнообразных корневых систем. Корни эволюционировали отдельно и независимо в нескольких основных направлениях, быстро расширяя свою функциональность. В среднем течении р. Цильмы на Среднем Тимане в красноцветных отложениях среднего и верхнего девона исследованы многочисленные палеопочвенные горизонты и их комплексы. Согласно палинологическим данным, на этой территории наземная флора отличалась высоким разнообразием. Исследованные древние почвы отличаются присутствием инситных корней различных типов. Целью работы было морфологическое описание обнаруженных корневых систем. Систематика девонских корневых систем на сегодняшний день находится на этапе первичного накопления данных. В результате исследований в палеопочвах выделены три морфологических типа корневых систем, принадлежавших преимущественно травоподобным растениям. В палеоботанической литературе отсутствуют описания подобных объектов. Морфологические типы корневых систем скоррелированы с геоморфологическими особенностями изучаемой территории.

Ключевые слова: ископаемые корни, красноцветные отложения, педогенез, средний девон

DOI: 10.31857/S0032180X24010011, **EDN:** ZLTKEG

ВВЕДЕНИЕ

Девонский период в истории Земли — время огромных эволюционных изменений в растительных сообществах наземной флоры от небольших бескорневых и безлистных травоподобных растений до лесных экосистем. Взрывное освоение суши растениями с появлением первых корнеобитаемых почв является одним из важнейших глобальных этапов в развитии биосферы. Следствием этого стали глобальные перестройки состава атмосферы и изменения климата [7, 8, 15]. Эволюция корневых систем, в свою очередь, трансформировала наземные экосистемы путем воздействия на процессы выветривания почв и круговорота углерода и питательных веществ в планетарном масштабе [14, 16, 17, 25].

Корни эволюционировали отдельно и независимо в нескольких основных направлениях, быстро расширяя свою функциональность

и сложность [11]. Однако исследователи указывают на весьма ограниченное количество находок ископаемых растительных фрагментов из девонских отложений, что существенно затрудняет прослеживание происхождения и эволюции столь древних растений [14].

Ископаемые корни *in situ* являются важнейшим и наиболее достоверным источником информации о растительности, часто единственным в силу плохой сохранности наземных частей многих растений или полного отсутствия их fossilized остатков [1].

На сегодняшний день в палеоботанической литературе существует заметный пробел — крайне мало информации о древних корнях и корнеподобных органах высших растений [2]. Следует подчеркнуть, что чем древнее такие объекты, тем меньше данных о них. Систематика девонских корневых систем находится на этапе первичного накопления

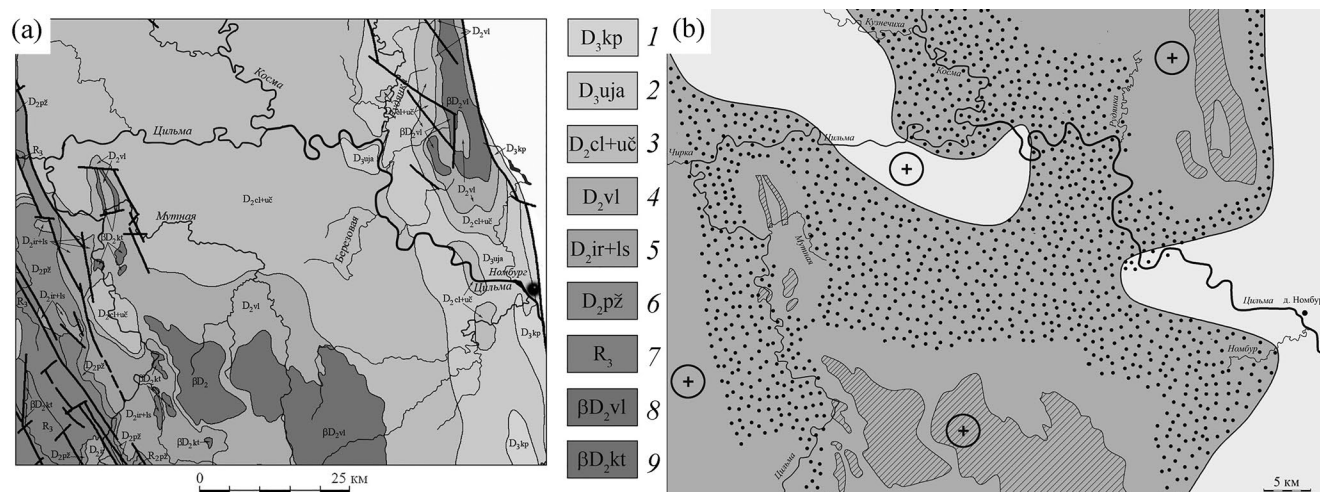


Рис. 1. а – фрагмент геологической карты ТПНИЦ (г. Ухта, 2000 г.): Свиты 1–5: 1 – крайпольская, 2 – устьерегская, 3 – шилемская и устьчиркинская, 4 – валсовская, 5 – лиственничная и яранская; 6 – пижемская серия; 7 – верхний рифей (фундамент), 8 – валсовские базальтовые покровы и туфы; 9 – Канино-Тиманский долеритовый гипабиссальный комплекс. б – распространённость красноцветных пролювиальных отложений на заключительном этапе формирования устьерегской свиты.

сведений [13]. Существует закономерность – чем крупнее были растения, тем больше информации по их строению, корневым системам, в частности, сохраняется. Это объясняется прежде всего тем, что в ископаемом виде крупные растения (деревья) нередко захоронены автохтонно, сохраняя многочисленные органические связи между стволами, стеблями и корневыми системами [9, 10, 12, 24]. Это служит основанием для увязки корневых систем и растений, которым они принадлежали. Гораздо реже удается диагностировать и классифицировать корни более мелких растений, как правило, имеющих одревесневшие наземные части. По травоподобным растениям информация практически отсутствует.

В период с 2008 по 2020 гг. в ходе экспедиционных исследований в среднем течении р. Цильмы на Среднем Тимане были обнаружены и исследованы многочисленные палеопочвенные горизонты и их комплексы как в зеленоцветных, так и красноцветных девонских отложениях [19, 22].

Одной из ярких особенностей, погребенных палеопочв является наличие в них многочисленных инситных корней. В результате исследований было выделено три морфологических типа корневых систем травоподобных растений, описанию которых посвящена данная статья, как вклад в первичный массив данных о девонских растительных сообществах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Геологический очерк. В геологическом строении района выделяются два структурных этажа,

сложенных рифейским фундаментом и перекрывающими его терригенными отложениями среднего и верхнего девона (рис. 1а). Залегание пород чехла субгоризонтальное, осложнено малоамплитудной брахискладчатостью.

Согласно проведенным реконструкциям истории осадконакопления в пределах Цилемской площади [21], в среднем девоне последовательно от свиты к свите нарастала регрессивная составляющая циклов, в результате чего максимум площадного развития красноцветных пород приходится на завершающий этап формирования устьчиркинской свиты среднего девона (рис. 1б).

На участках латерального замещения зеленоцветных отложений красноцветными в некоторых разрезах зеленоцветных пород отмечаются признаки девонского педогенеза: небольшие (диаметром до 5 мм) корневые трубки, ветвящиеся сверху вниз и заполненные железистыми охрами; чрезвычайно редко отмечаются углефицированные инситные корни. Редкие находки корневых систем в преимущественно зеленоцветных отложениях объясняются не отсутствием растительности на соответствующих территориях, а иными причинами. Во-первых, зеленоцветные породы обнажаются в довольно крутых обрывах слабо доступных для детального исследования, во-вторых, палеопочвенные горизонты (с корнями) ничем не отличаются от пород субстрата и с расстояния не определяются, и, в-третьих, при существовавших условиях осадконакопления корневые системы не сохранялись [20].

По мере приближения к пролювиальным структурам на фоне увеличения количества красноцвет-

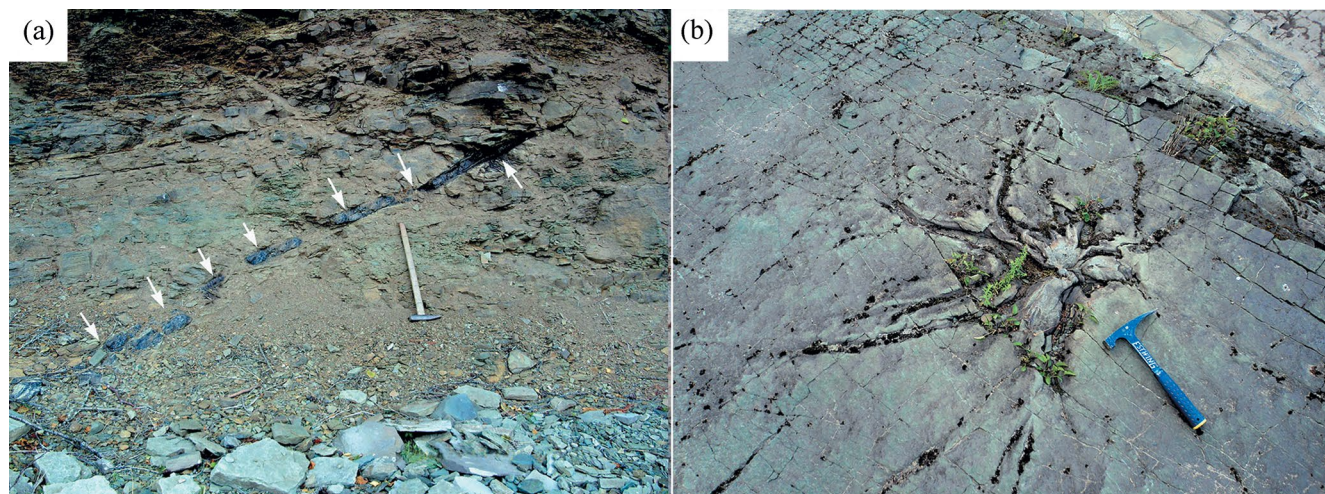


Рис. 2. Фрагменты ископаемых растений: а — фрагмент древесного ствола; б — корневая система в песчанике (фото С. М. Снигиревского).

ной составляющей появляются трещины усыхания на многочисленных поверхностях напластования пород, отмечаются корытообразные промоины, врезаемые в подстилающие породы, характерна высокая насыщенность остатками углефицированных растений от пылеватого детрита до целых стволов деревьев (рис. 2а) [26]. Следует особо отметить, что только в отложениях стыка водоем—суша С. М. Снигиревским в 2020 г. обнаружены крупные корневые системы деревьев (рис. 2б).

В красноцветных отложениях завершающих стадий формирования свит отмечаются многочисленные палеопочвенные горизонты, хорошо различимые по пестрой окраске на фоне бурых, шоколадно-коричневых цветов глинистых отложений субстрата.

Максимум мощности (до 40 м) красноцветных осадков завершающей стадии среднего девона приходится на участок нижнего течения р. Косма — р. Рудянка — р. Осиновая.

Исследования показали, что красноцветная толща имеет ритмичное строение и сложена элементарными циклитами мощностью 0.2–1.7 м, кровли которых часто хорошо выделяются по палеопочвенным горизонтам и захороненным на бывших дневных поверхностях рассеянных крупных фрагментов растений, окруженных светлыми ореолами оглеения [18, 20].

Основной объем пролювиальных построек сложен нелитифицированными легко распускающимися в воде глинистыми породами. Тем не менее, они уплотнены под влиянием литостатического давления, разбиты трещинами кливажа. В шлифованных образцах и петрографических шлифах (изготовленных в сухом режиме) отчетливо видно, что породы сложены разноокрашенными

глинистыми обломками размером 1–5 мм в поперечнике, а некоторые достигают диаметра 20 мм. На долю такого обломочного материала приходится до 90% объема породы. Окраска обломков пород варьирует в широких пределах от темно-коричневой до светло-бежевой, почти белой, что придает породе порфировый облик (рис. 3а, 3б). Видимо, разноокрашенные зерна принадлежали разным горизонтам денудированных кор выветривания. Глинистые обломки имеют округлую, реже угловато-округлую форму с хорошо выраженными границами (рис. 3с), чаще их очертания размыты, осложнены заливами, завихрениями, сами обломки выглядят, скорее, комками или сгустками (рис. 3д). Характерной особенностью матрицы является наличие в ней элементов флюидальности, следов полужидкого течения.

Тектурно-структурные особенности изученных красноцветных пород, закономерности распределения их по площади и в разрезе позволяют сделать вывод, что они являются осадками пролювиальных конусов выноса в аэральные и субаэральные условиях [18, 20].

Сход спазматических грязе muddy потоков или селевых оползней происходил при достижении предела устойчивости откоса рыхлых масс, и они, сами по себе, приходили в автокинетическое движение. Либо, как отмечает автор [6], чаще всего откос до этого полного “созревания” не доходит, так как в природе находится много “спусковых крючков” (землетрясения, пеплопады, сезоны ливневых дождей и т.д.), раньше “срока” провоцирующих сход лавин рыхлого материала.

Палеопочвы. Как упоминалось выше, в прикровельных частях многих красноцветных циклитов присутствуют палеопочвенные горизонты.

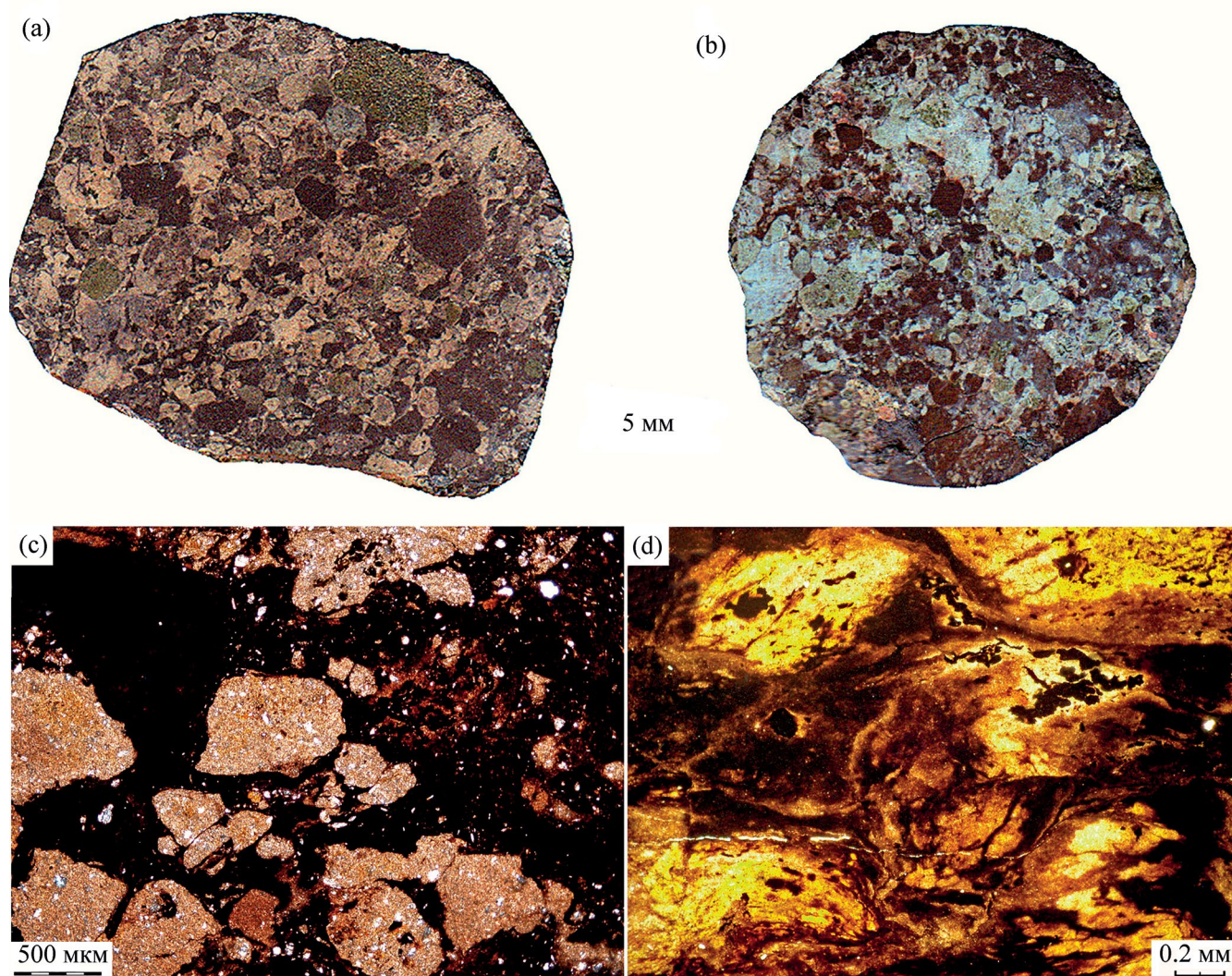


Рис. 3. Красноцветные глинистые породы: а, б – обломочная структура; с, д – формы обломочного материала от остроугольных до размыто-густковых.

Изученные погребенные почвы довольно однообразны, отличаются друг от друга в частных деталях и степенью выраженности генетических горизонтов.

Обобщенный полный палеопочвенный профиль в девонских красноцветных отложениях Среднего Тимана имеет следующее строение (сверху вниз):

1. Слой перлювиального песчаника мелкозернистого с обильными включениями мелких углефицированных фрагментов растений. Толщина слоя не превышает 2.5 см. Как правило, сам песчаный слой, подстилающая и перекрывающая породы оглеены до небесно-голубого цвета.

2. Пятнисто-пестрый элювиальный горизонт: обильные пятна и разводы желтого, розового, лилового, палево-бежевого, серовато-белесого

цветов на сизом, фиолетовом, лилово-красном фоне. Мощность горизонта обычно составляет 10–30 см.

3. Иллювиальный горизонт близок по внешнему виду породе субстрата, но в его окраске отчетливо виден лилово-фиолетовый оттенок, насыщенность которого убывает вниз по профилю. Горизонт обогащен элементами, выщелоченными из элювиального горизонта, их содержание увеличивается в 2–5 раз. Мощность интервала составляет 15–30 см.

4. Порода субстрата имеет цвет от сургучно-коричневого до темно-коричневого, признаков педогенеза не обнаруживается.

Одной из характерных особенностей палеопочвенных горизонтов в девонских отложениях на Среднем Тимане является присутствие в них

многочисленных углефицированных инситных корневых систем. Особо примечательным является тот факт, что в большинстве разрезов корни представлены углефицированным органическим веществом.

Изучение инситных корневых систем производилось в основном в расчистках при послойном снятии породы в горизонтальной и вертикальной плоскостях с фотодокументацией каждого среза. Следует отметить несколько фактов, влияющих на процесс исследования.

Во-первых, красноцветные глинистые породы не литифицированы и легко размокают в воде, тем не менее, они плотные и достаточно прочные для раскалывания. Кроме того, они разбиты густой системой трещин кливажа, что не позволяет делать качественную последовательность горизонтальных и вертикальных срезов в расчистках для пространственного изучения корневых систем.

Во-вторых, от погребенных корней в подавляющем большинстве случаев остается лишь углефицированная внешняя оболочка толщиной не более 0.1 мм, внутренняя полость заполнена глинистым материалом вмещающих пород, но обычно корни сдавлены с боков и сплюснуты под воздействием литостатического давления при диагенезе и катагенезе осадочной толщи.

В-третьих, ранее было установлено [23], что растительное органическое вещество, захороненное в девонских отложениях Цилемской площади, при углефикации превратилось в особый вид угля, совмещающего в себе свойства гагата и фюзена. От фюзена в комплексе свойств отмечается полная оптическая непрозрачность. В силу этого обстоятельства отсутствует возможность изучения органической структуры остатков корней.

И наконец, положительным моментом является то, что все корни окружены зонами оглеения небесно-голубого цвета диаметрами прямо пропорциональными диаметрам корней [18]. Это придает достаточно контрастный рисунок корневых систем даже на пестром фоне палеопочвенных горизонтов, дает возможность проследить корни и их ветвление, даже не видя самих корней.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе полевых и лабораторных исследований было выделено три морфологических типа корневых систем.

Первый тип представлен одиночными корнями диаметром не более 1 мм и длиной до 12 см без какого-либо ветвления. Корни вертикальные, слегка изгибаются в различных направлениях. В плане на поверхностях напластования (рис. 4а, 4б, 5) видно, что они распределены более или менее равномерно в среднем на расстоянии около 1 см друг от

друга, не создают отчетливых сгущений или “дорожек”, как если бы являлись придаточными корнями от стелющихся побегов или ветвей более крупных растений.

Наиболее часто этот тип встречается на самой периферии пролювиальных построек, где для разреза отложений характерно переслаивание красноцветных и зеленоцветных пород. Гипсометрически выше по бывшим склонам они, вероятно, есть, но их остатки затушеваны корневыми системами других типов.

Второй тип представляет собой сложноветвящуюся систему корней с четырьмя—пятью порядками дихотомического ветвления боковых корней (рис. 4с—4е, 5).

Ось первого порядка вертикальна, слабо изогнута без каких-либо ответвлений, ее диаметр колеблется от 3 до 5 мм. Можно предположить наличие главного корня, т.е. стержневой системы. Однако с глубины 7—10 см этот корень начинает интенсивно ветвиться на оси более низких порядков без сохранения оси первого порядка, превращаясь в мочковатую систему.

Вниз ветвление корней нарастает и достигает максимума на глубине 20—25 см. Следует заметить, что каждая ось делится на примерно равнозначные по диаметру две оси более низкого порядка. Корни нитевидные, их диаметр убывает по мере ветвления и у самых мелких осей 4—5 порядка составляет десятые доли миллиметра. Ответвление происходит во всем спектре углов до 90°. Корни всех порядков весьма извилисты, часто переплетаются между собой. Замечено, что на рыхлом песчаном субстрате корни более прямолинейные, чем на глинистом плотном.

По направлению вниз количество боковых отростков постепенно убывает, в результате чего корневая система имеет в пространстве факелообразную форму диаметром на уровне максимального ветвления 10—15 см. Общая глубина прорастания составляет 30—35 см.

Произрастали растения с этим видом корневых систем на расстоянии около 10 см друг от друга и, судя по изученным палеопочвам в красноцветных отложениях, являлись наиболее распространенными в районе исследований.

Третий тип, как и второй, представляет собой сложноветвящуюся систему корней с несколькими порядками ветвления (рис. 4ф—4и, 5), но отличается рядом параметров.

Ось первого порядка почти прямолинейна, проникает на глубину до 70—80 см, где начинает лавинообразно ветвиться на оси более мелких порядков. В отличие от корневых систем второго типа, эта ось густо покрыта нитевидными отростками диаметром доли миллиметра и длиной до

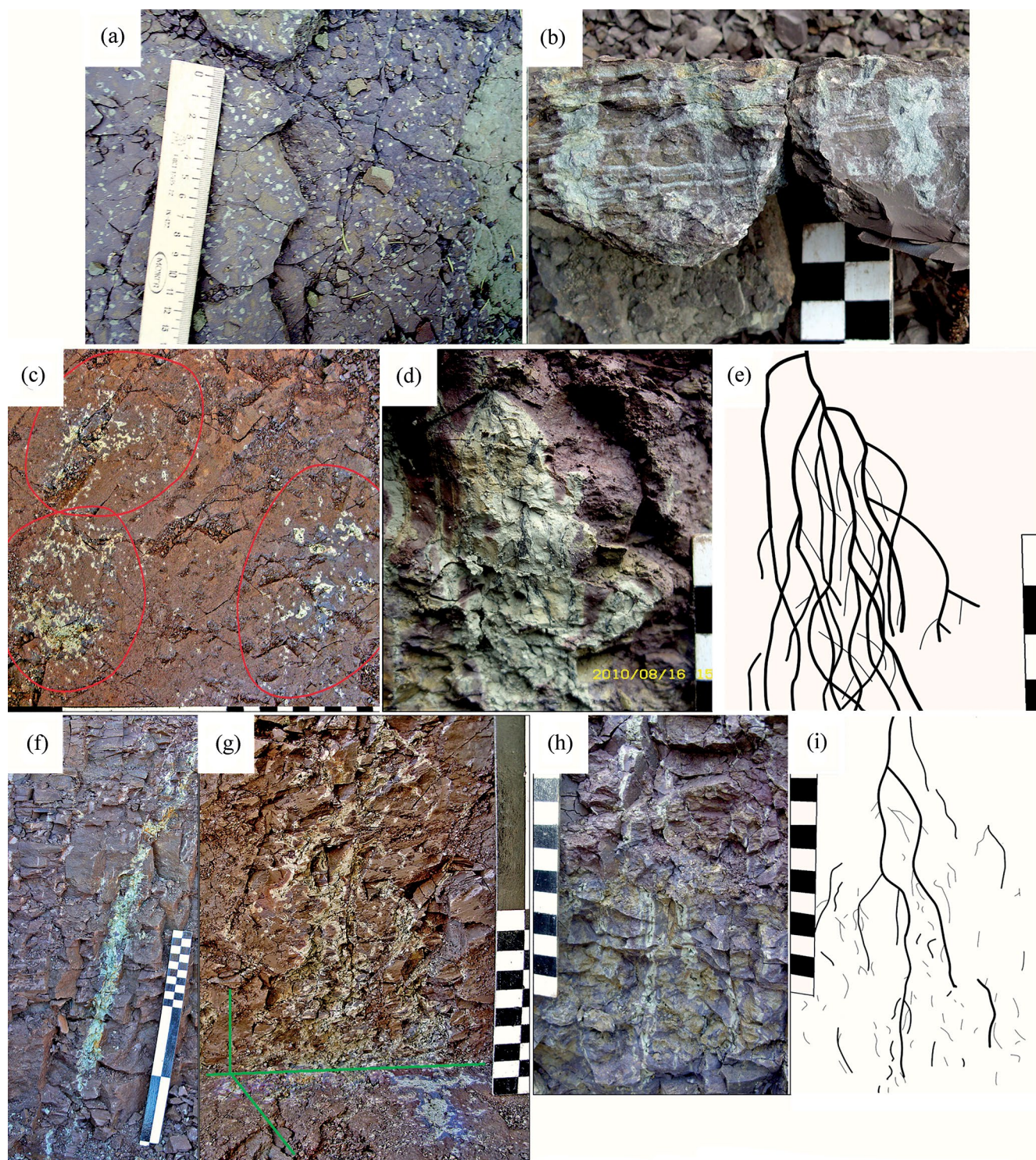


Рис. 4. Корневые системы. 1 тип: а – в плане, б – в вертикальном срезе; 2 тип: с – зоны интенсивного ветвления трех систем в горизонтальном срезе, d – зона интенсивного ветвления в вертикальном срезе, е – реконструкция; 3 тип: f – колоннообразная зона оглеения вокруг “стержневого” корня, g – вертикальный и горизонтальный срезы зоны интенсивного ветвления, h – вертикальный срез зоны интенсивного ветвления, i – реконструкция.

2 см. Выше упоминалось, что каждый корень вне зависимости от размера окружен зоной оглеения. В данном случае эти каймы оглеения вокруг самой оси и ответвлений от нее сливаются в сплошную колоннообразную зону оглеения диаметром до 4 см, контрастно видимую в расчистках. Здесь еще сильнее создается впечатление наличия стержневого корня.

Ниже начинается ветвление, как и в предыдущем типе, без сохранения оси первого порядка. Однако ветвление здесь несколько отличается тем, что корни разделяются не на равнозначные оси, а последовательно утончаются после каждого ветвления. Общая форма “мочки” близка к конусообразной, т.е. корни исчезают примерно на одной глубине. Средний диаметр системы составляет также 10–15 см.

Растения с такими корневыми системами произрастали на удалении друг от друга на расстоянии около 50 см. Это наиболее редко встречающийся тип корневых систем и надежно идентифицирован был лишь в четырех палеопочвах (расчистках). Заметим, что во всех четырех расчистках у обнаруженных систем данного типа “главный” корень отклонен от вертикали на 10° – 15° . Тем не менее, ввиду отсутствия достаточных статистических данных, пока не считаем эту особенность характеристикой вышеуказанного типа корневой системы.

Общим для описанных корневых систем является отсутствие в них каких-либо наростов, утолщений, бугорков и т.д. Как минимум оси первого и второго порядков обладают скульптурированной поверхностью в виде продольных хорошо выраженных чередующихся ребер и борозд. Примечательно, что точно такой же характер поверхности в соответствующем масштабе присущ фрагментам стволов и ветвей растений, определенных по ранее собранным материалам как *Callixylon* [3].

Проведенные исследования позволили авторам выделить три типа корневых систем, встречающихся в палеопочвенных профилях девонских красноцветных отложений на Среднем Тимане. Ранее (судя по опубликованным литературным данным) аналогичные корневые системы не были описаны.

Согласно данным палинологических исследований, в рассматриваемый период (завершающий этап среднего девона) на территории Среднего Тимана наземная флора отличалась высоким разнообразием — палинокомплексы представлены минимум 115 различными видами спор высших растений [26]. Среди растений были представители рениевых, тримерофитовых, зостерофилловых, плауновидных, папоротников, прогимноспермных. Следует заметить, что лишь для сравнительно малого количества спор доподлинно известны их продуценты, останки которых были обнаружены и по ним сделаны реконструкции.

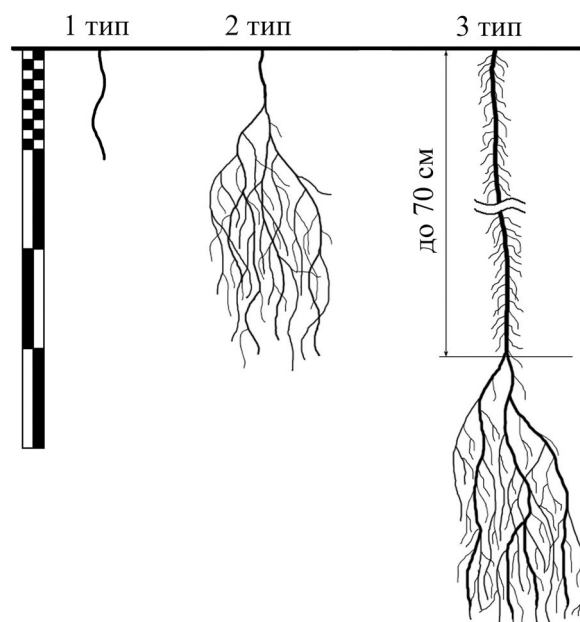


Рис. 5. Типы корневых систем, пояснения в тексте.

В морфологии описанных корневых систем второго и третьего типов, казалось бы, имеет место сочетание стержневой и мочковатой систем, однако даже у современных высших споровых (плаунов, хвощей, папоротников и др.) с самого начала развития растения образуются только придаточные корни, а главный корень у таких растений вообще отсутствует [4, 5]. Скорее всего, в описанных системах ось первого порядка является хорошо развитой стомой, т.е. подземным продолжением стебля растения. Косвенно на это указывает скульптура ее поверхности, аналогичная скульптуре поверхности стволов и ветвей некоторых девонских растений.

Возможно, корневые системы принадлежали небольшим травоподобным растениям, заселявшим пологие склоны пролювиальных построек. Распределялись они закономерно: растения с первым типом корневых систем тяготели к берегам водоемов (периферии пролювиальных структур), выше по склону развивались растения со вторым типом корневых систем, еще выше — с третьим. Но следует обратить особое внимание на тот факт, что ни в одной обнаруженной палеопочве в красноцветных глинистых отложениях, в том числе в образующих педокомплексы, охватывающие в разрезах до 20 м по вертикали, не было обнаружено ни одного крупного корня, например, широко распространенных в районе археоптерисовых. В то же время в зеленоцветных отложениях, расположенных гипсометрически ниже пролювиальных построек, наблюдаем корни крупных растений и многочисленные фрагменты самих растений на

фоне отсутствия или малого распространения корней небольших растений, описанных в настоящей статье. Однако на бывших дневных поверхностях с развитыми почвами нередко встречаются фрагменты крупных растений, которые произрастали где-то выше по склону, что вполне очевидно. Возможно, местом их обитания были выходящие на дневную поверхность коренные породы, в которых присутствовали открытые многочисленные трещины кливажа и, вероятно, подземные водонесные горизонты. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что глинистые склоновые отложения, отличающиеся плотностью слежавшейся глины, монолитные, частично пластичные и водонепроницаемые были крайне неблагоприятным субстратом для произрастания крупных девонских растений. Для питания травоподобных растений, видимо, хватало метеорных вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые описаны три типа корневых систем травоподобных растений среднедевонского возраста, произраставших на некотором удалении от водоемов на склонах пролювиальных конусов выноса, на существенно глинистом субстрате.

Учитывая катастрофический одномоментный характер захоронения грязевыми потоками палеопочв, предполагаем, что травоподобные растения могли сохраниться в прижатом к поверхности, распластанном виде без утраты связи со своими корневыми системами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Т.В. Ризолиты в палеопочвах девона и раннего карбона и их палеоэкологическая интерпретация // Почвоведение. 2020. № 4. С. 398–413.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20040024>
2. Арефьев М.П., Наугольных С.В. Изолированные корни из татарского яруса бассейна рек Сухоны и Малой Северной Двины // Палеонтологический журнал. 1998. № 1. С. 86–99.
3. Орлова О.А., Юрина А.Л., Горденко Н.В. О первой находке древесины археооптерисовых в верхнедевонских отложениях Среднего Тимана // Вестн. Моск. ун-та, сер. 4. Геология. 2011. № 5. С. 42–47.
4. Таршис Л.Г. Анатомия подземных органов высших сосудистых растений. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 221 с.
5. Федоров Ал.А., Кирпичников М.Э., Артюшенко З.Т. Атлас по описательной морфологии высших растений. Стебель и корень. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 352 с.
6. Фролов В.Т. Литология. М.: Изд-во МГУ. Т. 1, 1992; Т. 2, 1993; Т. 3, 1995.
7. Berner R.A. The carbon cycle and CO₂ over Phanerozoic time: the role of land plants // Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci. 1998. V. 353. № 1365. P. 75–82.
<https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0192>
8. Berry C.M. Palaeobotany: the rise of the earth's early forests // Curr. Biol. 2019. № 29. P. 792–794.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.016>
9. Berry C.M. The evolution of the first forests in the Devonian // Vestn. Inst. Geol. Komi Sci. Cent. Ural Branch RAS. 2019. № 11. P. 20–24.
<https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-11-20-24>
10. Driese S.G., Mora C., Elick J. Morphology and taphonomy of root and stump casts of the earliest trees (Middle to Late Devonian), Pennsylvania and New York, U.S.A. // Palaios. 1997. V. 12. № 6. P. 524–537.
<https://doi.org/10.2307/3515409>
11. Kenrick P., Strullu-Derrien Ch. The origin and early evolution of roots // Plant Physiology. 2014. V. 166. № 2. P. 570–580.
<https://doi.org/10.1104/pp.114.244517>
12. Liu L., Wang D.-M., Zhou Y., Qin M., Ferguson D.K., Meng M.-C. A Late Devonian tree lycopsid with large strobili and isotomous roots // Communication Biology. 2022. V. 5. P. 966.
<https://doi.org/10.1038/s42003-022-03934-4>
13. Matsunaga K.K.S., Tomescu A.M.F. Root evolution at the base of the lycopphyte clade: Insights from an Early Devonian lycopphyte // Annals of Botany. 2016. V. 117. № 4. P. 585–598.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcw006>
14. Morris J.L., Leake J.R., Stein W.E., Berry C.M., Marshall J.E.A., Wellman Ch.H., Milton J.A., Hillier S., Mannolini F., Quirk J., Beerling D.J. Investigating Devonian trees as geo-engineers of past climates: linking palaeosols to palaeobotany and experimental geobiology // Palaeontology. 2015. V. 58. № 5. P. 787–801.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.11.067>
15. Retallack G.J. Early forest soils and their role in Devonian global change // Science. 1997. V. 276. № 5312. P. 583–585.
<https://doi.org/10.1126/science.276.5312.583>
16. Retallack G.J. Soils of the past. London: Unwin-Hyman, 1990. 520 p.
<https://doi.org/10.1002/9780470698716>
17. Smart M.S., Filippelli G., Gilhooly III W.P., Marshall J.E.A., Whiteside J.H. Enhanced terrestrial nutrient release during the Devonian emergence and expansion of forests: Evidence from lacustrine phosphorus and geochemical records. Climate Change and Life. Elsevier, 2023. Ch. 5. P. 117–144.
<https://doi.org/10.1130/B36384.1>

18. *Shumilov I.Kh.* Gleization and paleosoils in Devonian red rocks of the Middle Timan region // *Lithology and Min. Res.* 2014. V. 49. № 4. P. 308–319.
<https://doi.org/10.1134/S0024490214040051>
19. *Shumilov I.Kh., Mingalev A.N.* First find of paleosoils in the Devonian red deposits of the Middle Timan // *Doklady Earth Sciences*. 2009. V. 428. № 7. P. 1080–1082.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X09070083>
20. *Shumilov I.Kh.* Preservation conditions of in situ root systems in Devonian sections of the Middle Timan region // *Lithology and Min. Res.* 2013. V. 48. № 1. P. 65–73.
<https://doi.org/10.1134/S0024490212050070>
21. *Shumilov I.Kh., Telnova O.P.* History of the geological evolution of the Tsil'ma river basin (Middle Timan) in the Devonian // *Lithology and Min. Res.* 2017. V. 52. № 3. P. 234–248.
<https://doi.org/10.1134/S0024490217030063>
22. *Shumilov I.Kh.* The first discovery of paleosoils in green Devonian sediments of Middle Timan // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 434. № 4. P. 515–517.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X1010003X>
23. *Shumilov I.Kh.* Unusual Devonian coal: A new type of jet // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56. № 10. P. 1461–1474.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.008>
24. *Stein W.E., Berry C.M., Morris J.L., Hernick L.V., Mannolini F., Ver Straeten C., Landing E., Marshall J.E.A., Wellman C.H., Beerling D.J., Leake J.R.* Mid-Devonian archaeopteris roots signal revolutionary change in earliest fossil forests // *Curr. Biol.* 2020. V. 30. № 3. P. 421–431.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.11.067>
25. *Taylor L.L., Leake J.R., Quirk J., Hardy K., Banwart S.A., Beerling D.J.* Biological weathering and the long-term carbon cycle: integrating mycorrhizal evolution and function into the current paradigm // *Geobiology*. 2009. № 7. P. 171–191.
<https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2009.00194.x>
26. *Tel'nova O.P., Shumilov I.Kh.* Middle–Upper Devonian terrigenous rocks of the Tsil'ma river basin and their palynological characteristics // *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2019. V. 27. № 1. P. 27–50.
<https://doi.org/10.31857/S0869-592X27131-56>

In Situ Root Systems in the Devonian Paleosoils of the Middle Timan

I. Kh. Shumilov^{1,*} and O. P. Telnova^{1,**}

¹*Institute of Geology, FSC Komi SC Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
167000 Syktyvkar, Russia*

**e-mail: ikh_shumiliv@mail.ru*

***e-mail: telnova@geo.komisc.ru*

As life progressed, there were a small number of key evolutionary innovations that initiated global biosphere change. One such event was the explosive development of terrestrial vegetation and the emergence of forest ecosystems during the Devonian period. The colonization of land begun by bryophytes and their ancestors required the appearance and development of a variety of root systems. Roots evolved separately and independently in several main directions, rapidly expanding their functionality and complexity. In the middle Zilma river on the Middle Timan in the red-colored sediments of the Middle and Upper Devonian numerous paleosol horizons and their complexes were studied. According to palynological data in this territory the terrestrial flora was highly diverse. The studied ancient soils are distinguished by the presence of insitu roots of various types. The purpose of the work was a morphological description of the discovered root systems. The taxonomy of Devonian root systems today is in the period of primary data accumulation. As a result of studies three morphological types of root systems belonging mainly to grass-like plants have been identified in paleosoils. There are no descriptions of such objects in paleobotanic literature. Morphological types of root systems are correlated with geomorphological features of the studied territory.

Keywords: fossil roots, red-colored sediments, pedogenesis, Middle Devonian