

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 699.8:551.3

ФИТОГЕННЫЙ ПСЕВДОКАРСТ И УСЛОВИЯ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

© 2021 г. А. А. Лаврусевич^{1,*}, Т. А. Цуцупа^{2,**}, В. А. Салдин^{3,***}, И. А. Лаврусевич^{1,****}

¹ ФГБУ ВО НИУ “Московский государственный строительный университет”,
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337 Россия

² ФГБОУ ВО “Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева”,
ул. Комсомольская, д. 95, г. Орел, 302026 Россия

³ ФГБУН Федеральный исследовательский центр “Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук” ФИЦ Коми НЦ Уро РАН, ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982 Россия

*E-mail: lavrusevich@yandex.ru

**E-mail: tsutsupa@mail.ru

***E-mail: victorsaldin@yandex.ru

****E-mail: 4914907@gmail.com

Поступила в редакцию 05.10.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.

Принята к публикации 23.11.2020 г.

В статье приводятся данные о сложном геологическом процессе — подземной эрозии, проявлением которой является псевдокарст. Активное развитие этого процесса связано, как правило, с техногенезом особенно в последние десятилетия, и ставит этот опасный геологический феномен в один ряд с такими грозными процессами как оползни, сели, обвалы, карст и др. Представлена классификация основных видов псевдокарста. Приведен пример впервые выделенного вида псевдокарста, связанного с абиотическими и биотическими (растительность) факторами. Показано, что в природных условиях Северного и Приполярного Урала в прибрежной части террас развивается весьма необычный вид псевдокарста, который оказывает негативное влияние на устойчивость уступов террас. Специфика механизма и скорость развития “фитогенного” псевдокарста и отсутствие понижения условий его формирования, может инициировать развитие оползневой эрозии или способствовать обвальному разрушению уступа террасы за счет последовательного циклического отступления бровки террасы в зоне развития подземной эрозии.

Ключевые слова: подземная эрозия, псевдокарст, корнеобитаемый слой, фитогенный псевдокарст, подземный эрозионный канал, Северный и Приполярный Урал, р. Щугор

DOI: 10.31857/S0869780921010057

ВВЕДЕНИЕ

Псевдокарст (ложный карст) — западинно-впадинный рельеф, образованный понижениями разного размера, внешне напоминающий карст, но возникший в результате иных процессов [6]. Более 100 лет идет дискуссия о содержании понятия “псевдокарст”. Изучению “карстоподобных” форм рельефа, образованных в результате иных процессов, посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Практически все авторы отмечают, что основное отличие псевдокарста от карстового процесса — отсутствие растворимых пород, состоящих из неустойчивых к воде минералов классов карбонатов, сульфатов и галогенов, хотя формы рельефа как подземные, так и поверхностные, одинаковы. Хотя, в литературе отмечены случаи техногенного псевдокарста в карбонатных породах [13]. Очевидно, в этом случае можно применить термин

“карст на подработанных территориях” [23]. Очень кратко остановимся на истории появления термина “псевдокарст” в научной литературе, так как это уже достаточно подробно изложено в следующих работах [9, 10, 12, 15 и др.].

Очевидно впервые термин “псевдокарст” появился в научной литературе в 1906 г., его ввел немецкий геолог Вальтер фон Кнебель. Известно, что он использовал это специальное обозначение в своей работе “Höhlenkundemit Berücksichtigung der Karstphänomene” (1906 г.) в конкретном применении к псевдокарстовому процессу [28]. Наблюдая как в Исландии водные потоки исчезают в трещиноватых базальтах, он под впечатлением увиденного записал: “Во многих областях распространения лавы, характерны водные потоки внутри лавового массива, что безусловно, является особенностью его структурно-текстурного

Таблица 1. Классификация псевдокарста

Виды псевдокарста (Types of Pseudokarst)	1	Псевдокарст в лавовых потоках – rheogenic pseudokarst (pseudokarst on lava flows)
	2	Внутриледниковый псевдокарст – glacier pseudokarst
	3	Трещинный псевдокарст, включая прибрежный псевдокарст – crevice pseudokarst, including littoral pseudokarst
	4	Псевдокарст в коллювиально-делювиальных отложениях (осыпях) – talus pseudokarst
	5	Псевдокарстовый бедленд, тоннели и пещеры в лессах – bedlands and piping loess pseudokarst
	6	Псевдокарст в вечной мерзлоте – permafrost pseudokarst
	7	Техногенный псевдокарст – technogenic pseudokarst
	8	Консеквентный псевдокарст – consequent pseudokarst
	9	<i>Псевдокарст в делювиально-пролювиальных отложениях – deluvial and proluvial pseudokarst</i>
	10	<i>Псевдокарст в аллювиально-пролювиальных отложениях – alluvial and proluvial pseudokarst</i>
	11	<i>Псевдокарст в ритмично чередующихся алевролитах и аргиллитах (флиш) – flysch pseudokarst (in aleurolites and argillites)</i>
	12	<i>Фитогенный псевдокарст – phytogenic pseudokarst</i>

Курсивом выделены вновь описанные (9–12) виды псевдокарста.

строения и это необходимо рассматривать как “псевдокарст” (pseudoverkarstung) [28, с. 171].

В Риме описываются псевдокарстовые пещеры в лавовых трубках на горе Этна [27]. Много работ, в которых косвенно описаны псевдокарстовые формы рельефа известные в большинстве стран Европы, по крайней мере, со времен средневековья. Но, перенесемся в конец XX, начало XI в. Точка определенности в отношении термина псевдокарст никак не ставилась в отечественной литературе вплоть до начала 1990-х годов. Началом нового этапа в изучении псевдокарста стало совещание по проблемам псевдокарста, прошедшее в 1992 г. в Перми, на котором присутствовали и выступали известные карстоведы В.Н. Андрейчук, Г.Н. Дублянская, В.Н. Дублянский и многие другие [1, 7], которые констатировали жизненность термина. Время не стоит на месте и в 1997 г., на 12 Международном Конгрессе по Спелеологии в Ла-Шо-де-Фоне (Швейцария) был организован комитет по изучению псевдокарста. Это явилось отправным моментом. Стали проходить регулярные международные псевдокарстовые конгрессы: Бразилия 2001 г., Греция 2005 г., Италия 2008 г., Италия 2012 г. и др. В 1997 г. на 12 Международном конгрессе ВМС (IUS) по итогам рабочей сессии, была принята следующая классификация псевдокарста [27], которую мы представим в виде таблицы (табл. 1).

Авторы, изучая псевдокарстовые явления на протяжении последних десятилетий, дополнили и расширили данную классификацию. В частности, изучая территорию Крымского полуострова, авторы пришли к выводу о достаточно широком развитии как уже описанных в таблице некоторых форм псевдокарста (прибрежный, лессовый, коллювиально-делювиальный, техногенный и др.),

так и вновь выделенных (номера 9–12) [11, 13]. Однако в литературе псевдокарстовые явления Крымского полуострова до настоящего времени освещены недостаточно, хотя существуют отдельные работы. Отсутствие должного внимания и непонимание механизма, причин и скорости развития этого процесса может привести в ближайшем будущем к разрушению уже существующих сооружений и вызвать формирование оползней-потоков в зонах активного рекреационного освоения.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый участок развития нового вида псевдокарста приурочен к территории, которая относится к бореально-континентальной области Европы и расположен в пределах двух регионов I порядка: Восточно-Европейской равнины и Уральской горной страны. Изучая бассейн р. Шугор (правобережный приток р. Печоры, Северный и Приполярный Урал) на территории заповедника Югид Ва Интинского района Республики Коми, авторы обнаружили уникальное явление псевдокарста, связанное исключительно с природными факторами (позиция 12 в табл. 1) – фитогенный псевдокарст.

Восточная часть территории Северного и Приполярного Урала уникальна своими разнообразными ландшафтами, что позволяет на протяжении всего нескольких километров увидеть и густую хвойную тайгу, и лиственный криволестье, и альпийские луга, и гольцовые тундры, что обусловлено разнообразием климатических, гидрологических, геоморфологических, тектонических и литолого-петрографических особенностей территории.

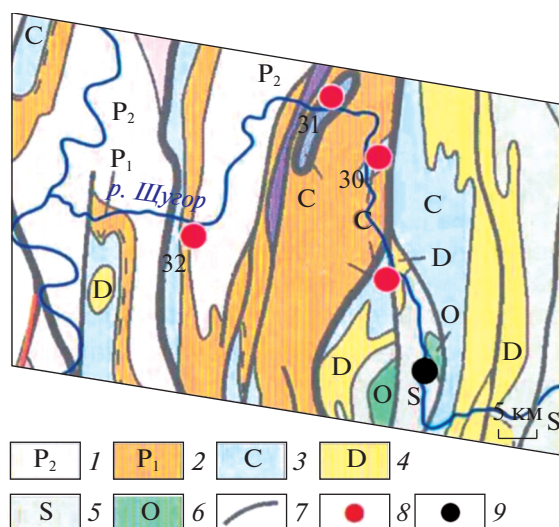


Рис. 1. Геологическая карта среднего и нижнего течения р. Шугор. Условные обозначения: 1, 2 – пермская система: 1 – верхний отдел; 2 – нижний отдел; 3 – каменноугольная система; 4 – девонская система; 5 – силурийская система; 6 – ордовикская система; 7 – тектонические нарушения; 8 – ОГН (объекты геологического наследия): 30 – Верхние Ворота; 31 – Средние Ворота; 32 – Нижние Ворота; 34 – Пристаньшорский разрез; 9 – участок развития фитогенного псевдокарста [5].

Река Шугор самый водоносный правобережный приток р. Печоры, питание которого обусловлено сбором воды с площади почти 10 000 км², при длине реки более 300 км [26]. Бассейн реки приурочен к двум крупным орографическим районам Урала, различным по строению; левый борт с меньшими гипсометрическими отметками и соответственно меньшей расчлененностью рельефа – это северная часть Северного Урала, и правый борт более возвышенный и расчлененный – южная часть Приполярного Урала. Географической границей между Приполярным и Северным Уралом является гора Тельпоз-из (высота 1650 м). Истоки реки находятся на высоте 720 м над уровнем моря на южном склоне горы Ярута в хребте Саран-из.

Там, где река прорезает прочные докембрийские и палеозойские карбонатные породы (от ордовикских до пермских) образуются живописные каньоны с высотой скал до 40–50 м. Несколько скальных обнажений, имеющих важное научное значение, отнесены к объектам геологического наследия: Нижние Ворота, Средние ворота, Верхние ворота и Пристаньшорский. В современном структурно-тектоническом плане Нижние, Средние и Верхние Ворота находятся в Большесынинской впадине Предуральского краевого прогиба, а Пристаньшорский, расположенный восточнее этих объектов, – в Западно-Уральской мегазоне (рис. 1) [5].



Рис. 2. Бечевник правого берега р. Шугор (недалеко от бывшего поселения Мичабечевник).

Долина реки хорошо сформирована. Русло реки глубокое, течение быстрое, долина просторная с широкими бечевниками (рис. 2). Вдоль русел р. Шугор и ее крупного притока Большой Паток выделяют 4 надпойменных террасы, образованные в соответствии с геологической историей формирования долины, которые фрагментарно прослеживаются вдоль левого и правого бортов реки.

На более мелких притоках выделяют обычно не более двух уровней надпойменных террас. Время формирования террас Шугора и его притоков неоплейстоцен-голоцен [18]. Аллювий террас представляет собой переслаивание мелких песков и песков средней крупности, нередко крупных, с включением гравия. В нижней части террасы идет огрубение материала до гравийно-галечникового (нередко в нижней прирусловой части с валунами). Редко встречается наклонная, вниз по течению, слоистость.

Аллювиальные отложения пестрого петрографического состава. На протяжении всей долины, через определенные промежутки, встречаются каменистые мелководные участки русла с быстрым течением – перекаты или шиверы, в среднем течении протяженный участок (порядка 2.5 км) представлен порогами. Из экзогенных геологических процессов ведущим является поверхностная эрозия: деятельность водотоков, а также выветривание, карст, оползни и обвалы. Поверхность террас имеет слабый наклон и сильно залесена.

Растительный мир территории разнообразен. На западном склоне Северного Урала преимущественно развиты средне и северо-таежные леса, преимущественно из сибирской ели, реже сибирской пихты, березы и кедра. Подлесок развит слабо. На гольцовых участках развиты мхи и ерники. Леса местами сильно заболочены. Это подтверждает споро-пыльцевой анализ пойменного аллювия. Содержание древесных до 60%, содержа-

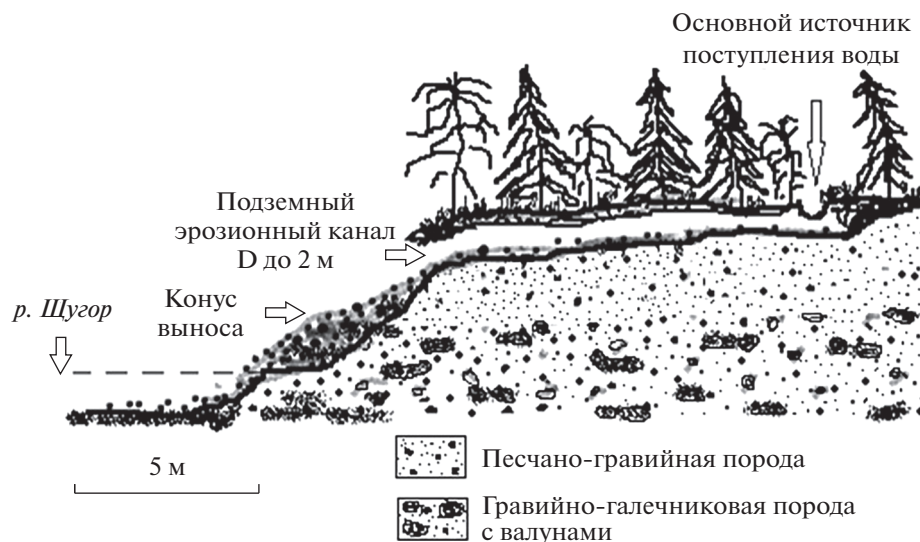


Рис. 3. Схема сформировавшегося подземного эрозионного канала в песчано-гравийной породе верхней части II надпойменной террасы р. Шугор.

ние пыльцы травянистых и кустарничковых растений — 20–35%, содержание спор колеблется в широком диапазоне от 5 до 55%. В группе пыльцы древесных растений преобладает пыльца древовидной (38%) и карликовой (20%) березы; пыльца ольховника составляет 13%, ольхи — 10%, сосны — 9%, ивы от 2 до 10%, ели — от 5 до 19% [20]. Для данных районов характерны подзолистые почвы, которые формируются в условиях преобладания осадков над испарением и, как следствие, промывной тип водного режима, обеднение растительного слоя зольными компонентами, низкотемпературный режим, медленное разложение микрофлорой органики и формирование слабо разлагающейся подстилки [19].

ПРОЯВЛЕНИЯ ФИТОГЕННОГО ПСЕВДОКАРСТА И МЕХАНИЗМ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Встреченные выходы подземных эрозионных каналов, приурочены к прибрежковым частям левобережной речной террасы р. Шугор. Это, так называемый, придолинный тип псевдокарста, который впервые был выделен и описан для лесовых массивов пораженных подземной эрозией Н.И. Кригером в 1975 г. [9, 10]. Согласно В.П. Хоменко (2003) такой процесс называется “присклоновым фильтрационным разрушением горных пород”. Фильтрационное разрушение горных пород на склонах (в прибрежковой части уступов шириной до нескольких десятков и даже сотен метров) может происходить в условно плавной (медленной) и резкой (стремительной) форме [25].

Для плавной (медленной) формы процесса характерен длительный период времени, в течение которого частичное фильтрационное разрушение сменяется полным фильтрационным разрушением горных пород, а основным морфологическим признаком является ниша, сформировавшаяся в водопроницаемых породах. Если присклоновое фильтрационное разрушение продолжается, и ниша врывается внутрь склона, она может постепенно превратиться либо в “глухой подземный канал”, либо в подземный канал с выходом на поверхность в месте основного поступления воды (рис. 3) и вызвать в последующем образование провалов вдоль его оси.

Для резкой (стремительной) формы процесса, характерен короткий период времени (сутки или даже часы), когда в результате поступления большого количества воды в массив суффозионно-неустойчивых пород происходит формирование подземного канала в области поступления воды, а в зоне выноса формируется “конус выноса”. На приведенной схеме показан сформировавшийся подземный эрозионный канал в результате поступления воды в отдалении от бровки террасы, протяженностью около 15 м. Как раз такие суффозионные ниши нередко являются причиной образования оползней суффозионного генезиса или по так называемому “суффозионному механизму”, которые активно разрушают берега рек и водохранилищ, в виде циклического обваливания пород [24, 25, 29].

На исследуемом участке подземный эрозионный канал сформировался в несвязных (рыхлых) дисперсных породах, так как они перекрыты прочным или слабо размываемым экраном естественного происхождения, а ниже лежащие поро-

ды также являются экраном, так как обладают меньшими значениями коэффициента фильтрации за счет присутствия глинистых частиц (см. рис. 3). Например, как при зафиксированном суффозионно-эрозионном выносе природных несвязных дисперсных грунтов верхней части аллювиальной террасы р. Волга, где в результате подземной эрозии сформировался подземный канал под железобетонными плитами облицовки откоса берегоукрепительного сооружения [16].

Роль верхнего экрана, в данном случае, выполняет очень своеобразное природное образование, в состав которого входит лесная подстилка, верхний почвенный горизонт, пронизанный многочисленными корнями древесной, кустарничковой и травянистой растительности.

Изменение горных пород в результате воздействия агентов выветривания (атмосферных осадков, инсоляции, жизнедеятельности организмов и пр.) приводит в конечном итоге к формированию почвы. Совокупность всех абиотических и биотических факторов — составляет биогеоэкологический комплекс, где почва является связующим звеном между его компонентами. Почвы, расположенные под лесной, луговой, степной растительностью, характеризуются хорошей водопрочностью и структурным состоянием. Они оказывают немалое влияние на разрастание корней древесных и травянистых растений. В свою очередь, корневая система растений обладает структурообразующей способностью, так как более крупные корни и мелкие корешки, густо переплетаясь, пронизывают почву во всех направлениях [2, 22]. Корни, распределяясь в почве, движутся между крупными и мелкими агрегатами, проникают в трещины, норы и подземные ходы животных, продвигаются по следам сгнивших корней и корневищ растений. Мелкие корни и корневые волоски способны внедриться и в нерасчлененную часть почвы или подпочвы [14].

Чем больше в почве корней и корневых остатков, тем выше их структурообразующая способность, что коррелирует с объемом надземной растительной массы [2]. И.Б. Ревут [21] подчеркивает значение однолетних и многолетних растений в расчленении почвы и улучшении ее структуры. По данным Г.Н. Лысака [17], почвенные структурные агрегаты, образованные под многолетними травами, не разрушаются довольно продолжительное время. В итоге повышается противозерозионная устойчивость почвы. Апикальное нарастание корневых окончаний способствует быстрому освоению почвенного пространства, при этом обходя поверхность надземной части растений значительно уступает корневой. Ветвление и нарастание корней обеспечивает доступ растений к питательным веществам, что приводит к необходимости удерживать почвенные агрегаты, насы-

щенные минеральными веществами и влагой, в непосредственной близости от зоны поглощения (зона корневых волосков). Достигается это при помощи слизи, выделяемой кончиком корня в области корневого чехлика. Слизь способствует и продвижению корня в субстрате, и удержанию влаги, и растворению органических компонентов почвы. Кроме того, слизь смачивает почвенные агрегаты, контактирующие с корнем, скрепляя их. По мере роста корня такие обработанные почвенные комочки оказываются в зоне корневых волосков, где происходит наиболее активное всасывание питательных веществ. Слизистые выделения корня обеспечивают и прочный контакт клеточных стенок со структурными элементами субстрата [4]. Таким образом, в непосредственной близости от корня всегда сосредоточены прилипшие комочки почвы. Впоследствии, в ходе разложения корневых остатков, образуется перегной, органические вещества которого пропитывают почвенные агрегаты и склеивают их, как цемент [3]. Однако, при переработке органических веществ почвенными микроорганизмами, прочность почвенных агрегатов несколько снижается.

Формирование свежего перегноя связано с жизнедеятельностью многолетних трав, надземная часть которых, ежегодно отмирая, обеспечивает накопление гумуса, что способствует образованию почвенной структуры. В свою очередь, состав и характер почв влияют на формирование корневых систем травянистых и древесных растений. Почвенный покров национального парка Югыд-ва отличается разнообразием почвообразующих пород, а систематический список почв насчитывает более 20 их подтипов. В частности, под еловыми и елово-березовыми лесами с зеленомошным покровом формируются глееподзолистые почвы [19]. Кроме того, средообразующие древесные породы первой величины (ель, береза, кедр) определяют характер растительности II и III ярусов, где широко представлены многолетние травы, полукустарнички, кустарнички и кустарники (*Rubus chamaemorus*, *Arctous alpina*, *Empetrum hermaphrodi-hermaphrodi-hermaphrodi-tum*, *Vaccinium myrtilus*, *V. uliginosum*, *Betula nana*, *Salix glauca*, *S. lanata*, *S. lapponum*). Совокупность корневых систем этих растений приводит к значительному улучшению структурного состояния почв и появлению водоустойчивых структурных агрегатов. Одной из биологических особенностей ели является эфемерность ее стержневого корня. У 2–3-летних особей он прекращает рост в длину и трансформируется в утолщение, от которого отходят горизонтальные корни. Эта связано с филогенетическим развитием елей в горных условиях, на слаборазвитых почвах, так как здесь горизонтальные корни имеют решающее значение для жизнеобеспеченности деревьев. Скелетные горизонтальные корни первого порядка ветвятся до



Рис. 4. Суффозионная ниша в прибрежной части второй левобережной террасы р. Шугор (7 км ниже по течению от устья притока — р. Седью, левый берег). Неглубоко залегающие корни ели создают основу прочного почвенного слоя.

четвертого-пятого порядков с незначительным числом вертикальных ответвлений. Корневые системы древесных и многолетних травянистых растений равномерно распределяются в корнеобитаемом слое, в особенности в ее верхней части, и образуют значительные переплетения, способствующие удержанию почвы. Дернина и мочковатая корневая система многолетних трав замедляет скорость водных потоков во время дождей, разбивая их на более мелкие ручейки, что в свою очередь способствует защите почвы от смыва.

Формирование ниши происходит, как правило, в весенне-осенний период максимального увлажнения верхнего горизонта в результате сезонного промерзания и оттаивания почвенного горизонта и выпадения максимального количества осадков (рис. 4). Гранулометрический состав подпочвенного горизонта следующий: содержание фракций менее 0.002 мм до 5%, пылеватой фракции 0.05–0.002 мм — 25%, песчаной фракции 2.0–0.05 мм — 43%, гравийной 10.0–2.0 мм — 9%, галечника 10.0–200.0 мм до 13%, валунов 8%. Наличие в конусе выноса до 8% валунов и крупного галечника говорит о том, что эрозионный водный поток обладал большой кинетической энергией. Судя по состоянию почвенного слоя над подземным эрозионным каналом (псевдокарстовым ходом) в момент его фиксации (август месяц), в следующем году в весенний период максимального увлажнения произойдет его частичное разрушение в прибрежной части террасы и ее фрагментарное отступление от русла реки вглубь террасы (рис. 5).

При увеличении (см. рис. 5б) хорошо виден подземный эрозионный канал и гранулометрический состав грубообломочной фракции вынесенной водным потоком, в результате подземной эрозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении данного типа псевдокарста, где активное участие принимают такие процессы как

(а)



(б)



Рис. 5. Суффозионная ниша в прибрежной части II левобережной террасы р. Шугор (7 км ниже по течению от устья левобережного притока — р. Седью). Прочно сплетенные корни ели, березы, кедра, пихты и кустарничковых образуют верхний слабо размываемый изолирующий экран.

суффозия и подземная эрозия, нельзя не остановиться на главной особенности формирования этой необычной формы разрушения присклоновой части террасы. Этой особенностью является почвенный горизонт, переплетенный корнями древесной, кустарничковой и травянистой растительности, способный сохранять устойчивость сводов подземных эрозионных каналов, сформированных под ним за счет развития подземной эрозии. Нам кажется, что можно назвать встреченные формы “фитогенным псевдокарстом”, потому что решающую роль в формировании данного геологического феномена, помимо подземной эрозии, играют растения. При изучении подобных явлений необходим системный подход, основанный на исследовании объекта как целостной системы, со своей структурой и эмерджентными свойствами, которые возникают в результате синергетического взаимодействия ее компонентов [8]. Именно системный подход, применяя теоретические и эмпирические методы исследований, позволяет комплексно рассмотреть исследуемый объект и сделать заключение о причинах и факторах, способствующих его развитию.

В настоящее время человечество, вооруженное техникой, провоцирует деградацию естественных ландшафтов. Человек все сильнее преобразовывает верхние горизонты геологической среды, создавая для себя наиболее комфортные условия, что способствует активизации такого грозного феномена как псевдокарст. Однако, встреченное нами явление, не связано с техногенезом и формируется исключительно за счет синергетического взаимодействия абиотических и биотических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрейчук В.Н.* Введение // Проблема псевдокарста: тез. докл. совещ. / Кунгур. лаб.-стационар ГИ УрО РАН. Пермь, 1992. С. 3–6.
2. *Вершинин П.В.* Почвенная структура и условия ее формирования. М.—Л.: АН СССР, 1958. 189 с.
3. *Вильямс В.Р.* Почвоведение: Избр. сочинения: В 2-х т. 3-е изд. Т. 1, 2. М.—Л.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1926. 323 с., 448 с.
4. *Волков О.И.* Влияние корневых выделений прорастающих семян (*Hordeum vulgare* L.) на качественный и количественный состав органических компонентов почвы // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 4. С. 359–368.
5. Геологическое наследие р. Щугор // В кн. Геологическое наследие республики Коми (Россия) / Сост. П.П. Юханов. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2008. 350 с.
6. Геологический словарь. В 3-х томах. Изд. третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 2. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
7. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Понятие “псевдокарст” и его сущность // Проблема псевдокарста: тез. докл. совещ. / Кунгур. лаб.-стационар ГИ УрО РАН. Пермь, 1992. С. 6–9.
8. *Королев В.А., Трофимов В.Т.* Инженерная геология: история, методология и номологические основы. Монография. М.: КДУ, 2016. 292 с.
9. *Кригер Н.И., Лаврусевич С.А.* Происхождение лесового псевдокарста // Докл. АН Тадж. ССР. Т. 24. № 7. 1981. С. 444–448.
10. *Кригер Н.И.* Лессовый псевдокарст // Вопросы теории и методики инженерной геодинамики. Тр. ПНИИС, 95. вып. 32. С. 25–49.
11. *Лаврусевич А.А., Брюхань Ф.Ф., Лаврусевич И.А., Хоменко В.П.* Псевдокарстовые явления в четвертичных и коренных отложениях юго-востока Крымского полуострова // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 15–18.
12. *Лаврусевич А.А., Крашенинников В.С., Лаврусевич И.А.* Лессовый псевдокарст и опыт укрепления лессовых массивов и откосов искусственными посадками некоторых растений (на примере лессового плато КНР, провинции Ганьсу и Шеньси) // Инженерная геология. № 1. 2012. С. 48–58.
13. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А., Алешина Т.С., Аллабергеннова Э.М., Кузнецова О.Г.* Опасность развития техногенного псевдокарста (на примере участка в юго-западной части Крымского полуострова) // Геориск-2018: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам снижения природных опасностей и рисков. М.: РУДН, С. 329–333.
14. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А.* Некоторые геоэкологические аспекты устойчивости лессовых массивов (биотические факторы формирования лессового псевдокарста) // Геоэкология. 2020. № 2. С. 28–38.
15. *Лаврусевич А.А.* Псевдокарст // В сб. Опасные для строительства геологические процессы: матер. Междунар. семинара, посв. 70-летию док. геол.-мин. наук В.П. Хоменко. М.: МИСИ—МГСУ, 2019. С. 16–21.
16. *Лаврусевич И.А., Лаврусевич А.А.* Геоэкологические аспекты развития присклоновой суффозии правого берега реки Волга // Сергеевские чтения. Вып. 18. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. М.: РУДН, 2016. С. 150–153.
17. *Лысак Г.Н.* Агротехника защищает землю. Челябинск: Южно-Урал. кн. изд-во, 1983. 89 с.
18. Объяснительная записка к Государственной геологической карте РФ мас-ба 1:20000. Изд. второе. Серия Северо-Уральская, лист Q-40-XXXV (Мича-бичевник) / Сост. М.А. Шишкин, Д.Х. Зархидзе, А.А. Коптяев. СПб., 2000. 128 с.
19. *Платов Н.А., Лаврусевич А.А.* Почвоведение для строителей: Учеб. пос. М.: АСВ, 2016. 96 с.
20. *Розенбаум Г.Э.* Палеогеография низовьев долины реки Печоры с верхнечетвертичного времени // В кн.: Кайнозойский покров Большеземельской тундры. М.: Изд-во МГУ, 1963. С. 82–90.
21. *Ревут И.Б.* Физика почв. Л: Колос, 1972. 370 с.

22. Саввинов Н.И. Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках. М: Гос. изд-во с.-х. и колхоз.-кооп. лит-ры, 1931. 46 с.
23. СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Ч. 1. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях. М.: Минрегион России, 2012. 78 с.
24. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
25. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
26. Щугор // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / Глав. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Т. 29. М: Сов. энциклопедия, 1978. 639 с.
27. Halliday W.R. Pseudokarst in the 21 st century // Journal of Cave and Karst Studies. 2007. V. 69. P. 103–113.
28. Knebel W. von. Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene // Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15 Braunschweig: Friederich: Vieweg und Sohn, 1906. 222 p.
29. Terzaghi, K., Peck R.B. Soil mechanics in engineering practice. N.–Y.: John Wiley & Sons, 1948. 566 p.

PHYTOGENIC PSEUDOKARST AND CONDITIONS OF ITS FORMATION

A. A. Lavrusevich^{a,#}, T. A. Tsutsupa^{b,##}, V. A. Saldin^{c,###}, and I. A. Lavrusevich^{a,####}

^a National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

^b Orel State University, ul. Komsomolskaya, 95, Orel, 302026 Russia

^c Federal Research Centre, Komi Science Centre, the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 24, Syktyvkar, 167982 Russia

[#]E-mail: lavrusevich@yandex.ru

^{##}E-mail: tsutsupa@mail.ru

^{###}E-mail: victorsaldin@yandex.ru

^{####}E-mail: 4914907@gmail.com

The article provides data on the underground (subsurface) erosion — a complex geological process, pseudokarst being one of its manifestations. The dynamic development of pseudokarst is most often related to technogenesis, especially in the past decades, what puts that hazardous geological process in one row with other geohazards, i.e., mudflows, avalanches, karst etc. The pseudokarst typification, which was originally suggested at the international congress in Switzerland, is represented. The terraces of the Shchugor River (the right-bank tributary of the Pechora river) provide an example of the newly set type of pseudokarst, related to abiotic and biotic (vegetation) factors. It is shown that in the natural environment of the North and Nether-Polar Urals (the territory that belongs to the boreal-continental region of Europe) a very unusual type of pseudokarst develops in the slope part of the terraces, which exerts a negative effect on the stability of the near-edge part of the terraces. The development of extended small-diameter cavities under the surface of the root layer in the near-edge part of river terraces leads to the disintegration of the massif and general disturbance of stability. Root systems of woody and perennial herbaceous plants are evenly distributed in the root layer, especially in its upper part, that form vast intertwinements that help to retain the soil. For example, the spruce tap root stops its elongation in 2–3 years and transforms into the thickening, from which the horizontal roots extend. This is due to the phylogenetic development of spruce trees in mountainous conditions, on immature soils, since here horizontal roots are crucial for the life sustaining of trees. The fibrous root system of perennial grasses is also widely developed in the root layer that slows down the speed of water streams during rain-falls and snow melting, dividing flows into smaller streamlets, that helps to protect the soil from washing out. Such root layer, up to several tens of centimeters thick, is strong enough to hold the overlap of the erosional cavities formed below. Often, a smooth subsidence of the surface is observed over the cavities. Any movement along the edge of the terrace ledge by car or on foot, over the formed pseudokarst cavities, can lead to a sudden collapse. The specific mechanism and the rate of development of “phytogenic” pseudokarst with the lack of understanding of its formation conditions, can lead to the development of a landslide process or contribute to the landslide destruction of the terrace ledge due to the successive cyclic retreat of the terrace edge in the zone of pseudokarst development.

Keywords: underground (subsurface) erosion, piping, pseudokarst, root layer, phytogenic pseudokarst, erosion channel, Northern and Subpolar Urals, Shchugor river

REFERENCES

1. Andreichuk, V.N. *Vvedenie* [Introduction]. *Problema psevdokarsta: tezisy doklada soveshchaniya*. [Pseudokarst problem. Abstracts of Meeting papers]. *Kungurskaya laboratoriya-statsionar GI UrO RAN*, Perm, 1992, pp. 3–6. (in Russian)
2. Vershinin, P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow-Leningrad, AN SSSR Publ., 1958, 189 p. (in Russian)
3. Vil'yams, V.R. *Pochvovedenie* [Soil science]. 3rd edition, vol. 1, 2. Moscow-Leningrad, Gos. izd-vo s-kh. liter., 1926, 323 p., 448 p. (in Russian)

4. Volkov, O.I. *Vliyanie kornevykh vydelenii prorastayushchikh semyan (Hordeum vulgare L.) na kachestvennyi i kolichestvennyi sostav organicheskikh komponentov pochvy* [Influence of root exudates of germinating seeds (*Hordeum vulgare* L.) for the qualitative and quantitative composition of organic soil components]. *Zhurnal obshchei biologii*, 2010, vol. 71, no. 4, pp. 359–368. (in Russian)
5. *Geologicheskoe nasledie r. Shchugor* [Geological heritage of the Shchugor River]. *Geologicheskoe nasledie respubliki Komi (Rossia)* [Geological heritage of the Komi Republic (Russia)]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 350 p. (in Russian)
6. *Geologicheskii slovar'* [Geological dictionary]. Petrov, O.V., Editor-in-chief, vol. 2. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2011, 480 p. (in Russian)
7. Dublyanskaya, G.N., Dublyanskii, V.N. *Ponyatie "pseudokarst" i ego sushchnost'* [The concept of "pseudokarst" and its essence]. *Problema pseudokarsta: tezisy doklada soveshchaniya* [Pseudokarst problem. Abstracts of Meeting papers] *Kungurskaya laboratoriya-statsionar GI UrO RAN*, Perm, 1992, pp. 6–9. (in Russian)
8. Korolev, V.A., Trofimov, V.T. *Inzhenernaya geologiya: istoriya, metodologiya i nomologicheskie osnovy* [Engineering Geology: history, methodology, and nomological foundations]. Moscow, KDU Publ., 2016, 292 p. (in Russian)
9. Kriger, N.I. *Lessovyi pseudokarst* [Loess pseudokarst]. *Voprosy teorii i metodiki inzhenernoi geodinamiki* [Issues of the theory and methodology of engineering geodynamics]. *Trudy PNIIS*, 1975, no. 32, pp. 25. (in Russian)
10. Kriger, N.I., Lavrushevich, S.A. *Proiskhozhdenie lessovogo pseudokarsta* [The origin of loess pseudokarst]. *Dokl. AN Tadzh. SSR*, 1981, vol. 24, no. 7, pp. 444–448. (in Russian)
11. Lavrushevich, A.A., Bryukhan', F.F., Lavrushevich, I.A., Khomenko, V.P. *Pseudokarstovye yavleniya v chetvertichnykh i korennykh otlozheniyakh yugo-vostoka Krymskogo poluostrova* [Pseudokarst phenomena in Quaternary and bedrock deposits of the southeast of the Crimean Peninsula]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014, no. 11, pp. 15–18. (in Russian)
12. Lavrushevich, A.A., Krasheninnikov, V.S., Lavrushevich, I.A. *Lyossovyy pseudokarst i opyt ukrepleniya lyossovyykh massivov i otkosov iskusstvennymi posadkami nekotorykh rastenii (na primere lessovogo plato KNR, provintsii Gan'su i Shen'si)* [Loess pseudokarst and the experience in stabilizing loess massifs and slopes with artificial plantings (by the example of the loess plateau in the provinces of Gansu and Shanxi, China)]. *Inzhenernaya geologiya*, 2012, no. 1, pp. 48–58. (in Russian)
13. Lavrushevich, A.A., Lavrushevich, I.A., Aleshina, T.S., Allabergenova, E.M., Kuznetsova, O.G. *Opasnost' razvitiya tekhnogennogo pseudokarsta (na primere uchastka v yugo-zapadnoi chasti Krymskogo poluostrova)* [The danger of the development of technogenic pseudokarst (by the example of a site in the southwestern part of the Crimean Peninsula)]. *Georisk-2018 Conference*, Moscow, RUDN Publ., pp. 329–333. (in Russian)
14. Lavrushevich, A.A., Lavrushevich, I.A. *Nekotorye geoekologicheskie aspekty ustoychivosti lessovykh massivov (bioticheskie faktory formirovaniya lessovogo pseudokarsta)* [Some geoecological aspects of loess massifs stability (biotic factors of loess pseudokarst formation)]. *Geoekologiya*, 2020, no. 2, pp. 28–38. (in Russian)
15. Lavrushevich, A.A. *Pseudokarst* [Pseudokarst]. *Opasnye dlya stroitel'stva geologicheskie protsessy* [Geological processes hazardous for construction]. 2019, pp. 16–21. (in Russian)
16. Lavrushevich, I.A., Lavrushevich, A.A. *Geoekologicheskie aspekty razvitiya prisklonovoi suffozii pravogo berega reki Volga* [Geoecological aspects of the development of the slope suffusion of the right bank of the Volga River]. *Sergeevskie chteniya*, 2016, pp. 150–153. (in Russian)
17. Lysak, G.N. *Agrotekhnika zashchishchaet zemlyu* [Agricultural technology protects the land]. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izd-vo, 1983, 89 p. (in Russian)
18. *Obyasnitel'naya zapiska k Gosudarstvennoi geologicheskoi karte RF mas-ba 1:20000* [Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 20000]. *Izдание vtoroe. Seriya Severo-Ural'skaya, list Q-40-XXXV*. Sost. M.A. Shishkin, D.Kh. Zarkhidze, A.A. Koptyaev. St. Petersburg, 2000, 128 p. (in Russian)
19. Platov, N.A., Lavrushevich, A.A. *Pochvovedenie dlya stroitelei* [Soil Science for Builders]. Moscow, ASV Publ., 2016, 96 p. (in Russian)
20. Rozenbaum, G.E. *Paleogeografiya nizov'ev doliny reki Pechory s verkhnechetvertichnogo vremeni* [Paleogeography of the lower reaches of the Pechora River valley from the Upper Quaternary]. *Kainozoiskii pokrov Bol'shezemel'skoi tundry* [Cenozoic cover of the Bol'shezemel'skaya tundra]. Moscow, MGU Publ., 1963, pp. 82–90. (in Russian)
21. Revut, I.B. *Fizika pochv* [Soil physics]. St. Petersburg, Kolos, 1972, 370 p. (in Russian)
22. Savvinov, N.I. *Struktura pochvy i ee prochnost' na tseline, perelege i staropakhotnykh uchastkakh* [The structure of the soil and its strength on virgin soil, fallow and old arable areas]. Moscow, Gos. izd-vo s-kh i kolkh-koop. Liter., 1931, 46 p. (in Russian)
23. SP 21.13330.2012. *Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvaemykh territoriyakh i prosadochnykh gruntakh. Chast' 1. Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvaemykh territoriyakh* [Code of Rules 21.13330.2012. Buildings and structures in undermined areas and subsiding soils. Part 1. Buildings and structures in undermined territories]. Moscow, Minregion Rossii, 2012, 78 p. (in Russian)
24. Tikhvinskii, I.O. *Otsenka i prognoz ustoychivosti opolznevyykh sklonov* [Assessment and forecast of the stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 144 p. (in Russian)
25. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
26. *Shchugor* [Shchugor]. *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* [Great Soviet Encyclopedia]. 3rd edition, vol. 29, Moscow, Sov. Encyclopedia, 1978, 639 p. (in Russian)
27. Halliday, W.R. Pseudokarst in the 21 st century. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2007, V. 69, pp. 103–113.
28. Knebel, W. von. *Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene. Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15* Braunschweig: Friederich: Vieweg und Sohn, 1906, 222 p.
29. Terzaghi, K., Peck R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. N.–Y.: John Wiley & Sons, 1948, 566 p.