

ЛЕССОВЫЙ ПСЕВДОКАРСТ И ОПЫТ УКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ МАССИВОВ И ОТКОСОВ ИСКУССТВЕННЫМИ ПОСАДКАМИ РАСТЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕССОВОГО ПЛАТО В ПРОВИНЦИЯХ ГАНЬСУ И ШЭНЬСИ, КИТАЙ)

LOESS PSEUDOKARST AND EXPERIENCE OF STABILIZING LOESS MASSIVES AND SLOPES WITH ARTIFICIAL PLANTINGS (BY THE EXAMPLE OF THE LOESS PLATEAU IN THE PROVINCES OF GANSU AND SHANXI, CHINA)

ЛАВРУСЕВИЧ А.А.

Доцент кафедры инженерной геологии и геоэкологии МГСУ,
г. Москва, lavrusevich@yandex.ru

КРАШЕНИННИКОВ В.С.

Аспирант кафедры инженерной геологии и геоэкологии МГСУ,
г. Москва, driller-kvs@yandex.ru

ЛАВРУСЕВИЧ И.А.

Студент МГСУ, г. Москва,
lavrusevich@yandex.ru

LAVRUSEVICH A.A.

An associate professor of the engineering geology and geoecology department of Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, lavrusevich@yandex.ru

KRASHENINNIKOV V.S.

A postgraduate student of the engineering geology and geoecology department of Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, driller-kvs@yandex.ru

LAVRUSEVICH I.A.

A student of the engineering geology and geoecology department of Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, lavrusevich@yandex.ru

Ключевые слова:

робиния псевдоакация; можжевельник китайский; Лессовое плато; Китай; лесс; лессовый псевдокарст; лессовый массив; деградация; укрепление.

Key words:

Robinia pseudoacacia; Juniperus chinensis; Loess Plateau; China; loess; loess pseudokarst; loess massif; degradation; stabilization.

Аннотация

В статье приводятся интересные факты по укреплению лессовых откосов и склонов в Китае. Посадки робинии псевдоакация (*Robinia pseudoacacia*), оказывается, не всегда способствуют их устойчивости. Нередко корни этого растения провоцируют развитие лессового псевдокарста (ЛП), который является первичным при разрушении лессовых массивов. В работе приводится обновленная классификация его поверхностных и подземных форм и дается характеристика вновь выделенного придолинно-балочного (промежуточного) и приуроченного к бровкам откосов типов ЛП. Приводится предварительный расчет полной деградации Лессового плато (Китай).

Введение

Массивы лессовых пород Китая, обладая эфемерными свойствами, подвержены усиленному воздействию псевдокарста и эрозии, которое многократно увеличилось после начала активного освоения данных территорий человеком. Основная цель правительства Китая сберечь этот уникальный регион от разрушающей деятельности воды и влияния техногенеза. Для этого предприняты многочисленные попытки приостановки развития псевдокарста и эрозии, одной из которых является облесение склонов и откосов различными высшими растениями. Связанным с этим наблюдениям и посвящена настоящая статья.

Abstract

The article provides some interesting facts on stabilizing loess massives and slopes in China. It turns out that *Robinia pseudoacacia* plantings not always contribute to their stability. The roots of this plant often provoke developing loess pseudokarst (LP) that is primary for loess massives destruction. The paper presents an updated classification of its surface and underground forms and a characteristic of the newly singled out near valley gully (intermediate) and connected with the slope top types of LP. A preliminary calculation of the total degradation of the Loess Plateau (China) is given.

Лессовое плато

Лессовые массивы Китая уникальны по своим размерам и свойствам слагающих их пород. Они распространены в этой стране главным образом между 30-й и 45-й параллелями. Крупнейший из них — Лессовое плато — располагается в среднем течении реки Хуанхэ на севере Китая. Его площадь составляет порядка 580 тыс. км², что сопоставимо с размерами такого крупного европейского государства, как Франция.

Лессовое плато ограничено на севере пустыней Ордос, на востоке — хребтом Тайханшань, на западе — восточными отрогами Куньлуня, на северо-западе — пустыней Алашань, на юге — хребтом Циньлин. Преобладающие высоты хребтов — 1200–1500 м, хотя в пределах Лессового плато имеются отдельные хребты (Люпаньшань, Люй-

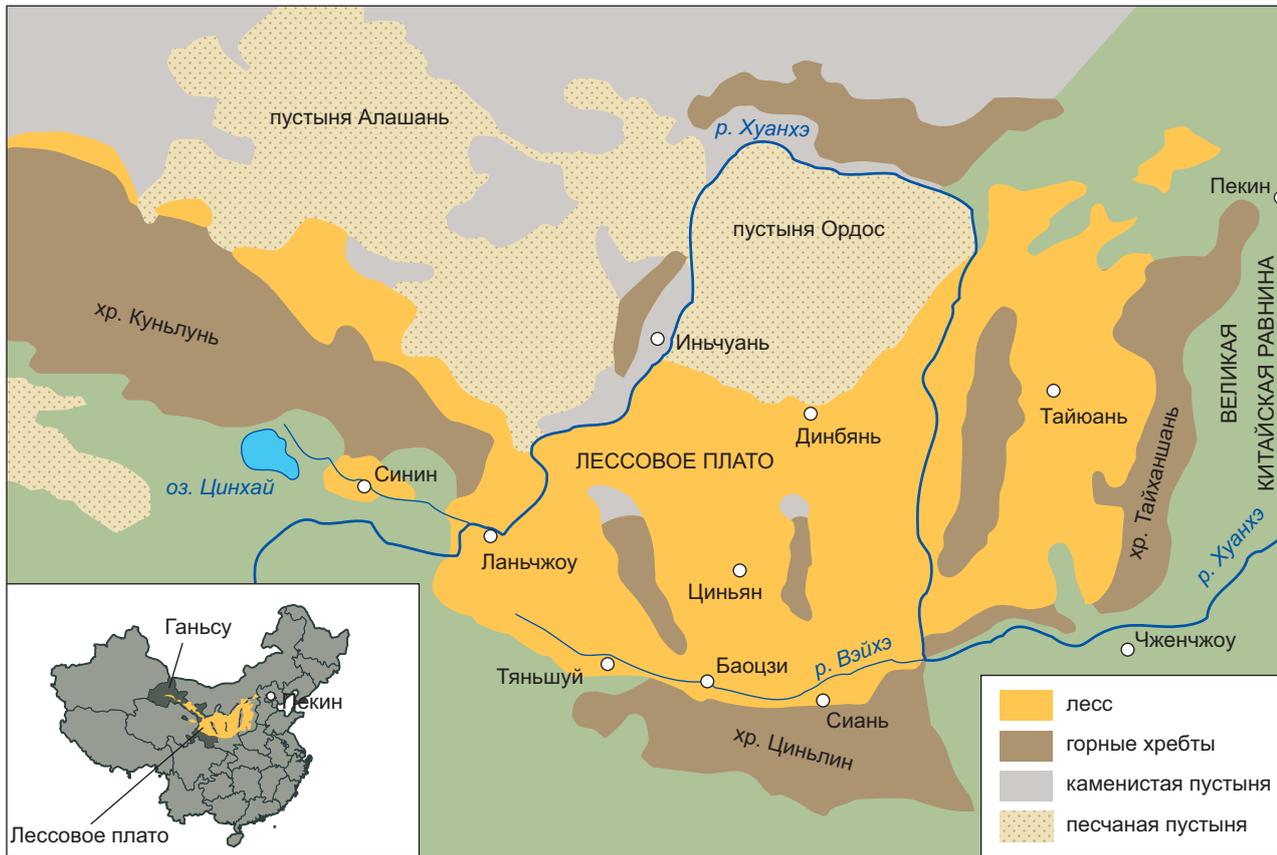


Рис. 1. Схема Лессового плато в окаймлении реки Хуанхэ и окружающие ее хребты и пустыни

ляншань, Утайшань и др.), гребни которых местами достигают 2500 м и более (рис. 1).

В геологическом отношении эта территория представляет собой впадину, заполненную мезозойскими отложениями, перекрытыми толщей лессовых пород, мощность которой обычно колеблется от 100 до 200 м, увеличиваясь на севере до 250 м, а в восточной части провинции Ганьсу — до 500 м и более [18, 28]. Возраст Лессового плато, по мнению некоторых исследователей, составляет от 1,67 до 2,40 млн лет [37].

Климат плато умеренный, с сухой холодной зимой и жарким летом. Средняя температура января — от минус 8°C на севере до минус 4°C на юге, июля — от плюс 22°C на севере до плюс 34°C на юге. Осадков выпадает от 500 мм/год на востоке до 250 мм/год на северо-западе, при этом испарение составляет более 1000 мм/год. Таким образом, радиационный индекс сухости как отношение радиационного баланса к скрытой теплоте испарения на Лессовом плато значительно превышает 1, что позволяет лессам сохранять свои эфемерные свойства [10]. Большая часть осадков выпадает во время летнего муссона (июль — сентябрь), обычно в виде ливней, стимулирующих развитие эрозии. Реки часто текут в глубоких ущельях и выносят в долины огромное количество взвешенных и влекомых частиц.

Естественная растительность (лесостепь — на юго-востоке, сухая степь — на северо-западе) сохранилась лишь в местах, неудобных для возделывания. Вся поверхность распаханна, лессовые склоны высотой до 1000 м и более искусственно

террасированы. С лессами связано исключительное плодородие почв на плато (хотя нередко они смыты), позволяющих получать богатые урожаи ценнейших сельскохозяйственных культур — хлопчатника, проса, гаоляна, пшеницы, плодово-ягодных культур и др. Сегодня в пределах Лессового плато производится более пятой части всей сельскохозяйственной продукции Китая.

Хотя плотность населения в этом районе меньше по сравнению с приморскими, техногенная нагрузка на лессы достаточно высока из-за наличия многочисленных населенных пунктов, строительства промышленных, гражданских и ирригационных сооружений, активного сельскохозяйственного освоения. В последние годы в связи с ростом и развитием китайской экономики активно развивается дорожное строительство. В пределах Лессового плато строят многочисленные автодорожные магистрали высокого международного уровня. Они пересекают плато в виде прямых линий, прорезая хребты тоннелями и поднимаясь над руслами водотоков мостовыми переходами более 100 м высотой.

В силу геологической истории района, геоморфологических и литологических особенностей его пород, а также современной техногенной нагрузки площадь эродированных земель Лессового плато на сегодняшний день порядка 450 тыс. км², что составляет более 77% от всей его территории. Таким образом, данный район является одним из самых сильноэродированных и эродированных не только в Китае, но и во всем мире. Из-за значительной эродированности он давно потерял свой

первоначальный платообразный облик. Это связано с тем, что лессы являются породами, наиболее подверженными влиянию воды и ветра [34].

Река Хуанхэ практически опоясывает плато и ежегодно выносит в пределы Великой Китайской равнины до 1600 млн т размытых пород [31]. Это в 30 раз больше, чем для реки Нил, и в 98 раз больше, чем для Миссисипи. Хуанхэ переносит огромное количество взвешенных наносов, занимая первое место в мире по количеству твердых наносов в своих водах. Отсюда ее цвет и название, означающее в переводе «Желтая река».

Вынос такого объема твердых частиц на Великую Китайскую равнину приводит к повышению отметок русла р. Хуанхэ более чем на 10 см в год, в результате чего его дно местами расположено на 6–12 м выше прилегающей низменности, что способствует прорывам берегов и дамб с затоплением огромных территорий и перемещениям русла.

Лесс — уникальная горная порода, обладающая рядом специфических эфемерных свойств, которые выделяют ее из всего многообразия инженерно-геологических образований четвертичного периода [24]. Это низкая влажность и высокая пористость, просадочность и подверженность развитию псевдокарста, содержание карбонатов и малое количество легкорастворимых соединений и др.

Лессовые породы наиболее чутко реагируют на малейшие изменения окружающей среды, теряя при любом воздействии на них свои уникальные свойства, прежде всего при изменении влажностного режима. Они в значительной степени подвержены эрозии: в среднем на 1 км² поверхности Лессового плато приходится 6–7 км оврагов. Несмотря на небольшое количество годовых осадков, иногда до 40% из них выпадает в течение суток, что приводит к значительному росту длины оврагов. К. Пай отмечает, что после такой «бури» общая длина оврагов данного района увеличивается на 40 км! [34]

Говоря о сильной эродированности плато, нельзя обойти лессовый псевдокарст, потому что именно его возникновение и развитие являются первопричинами нарушения целостности лессовых массивов. Эрозия же в полной мере подключается к их деградации несколько позже.

Лессовый псевдокарст

Говоря о лессовом псевдокарсте (ЛП), нельзя не остановиться на истории становления самих терминов «псевдокарст» (*англ.* pseudokarst) и «лессовый псевдокарст» (*англ.* loess pseudokarst, или pseudokarst of loess rocks).

Впервые описание псевдокарстовых форм мы находим в монументальном труде Ф. Рихтгофена «Китай» (1877 г.) [35], где автор описывает многочисленные формы разрушения лессовых массивов и анализирует механизм и динамику их развития.

Немецкий геолог Вальтер фон Кнебель также использовал термин «псевдокарст» (*нем.* pseudoverkarstung). Наблюдая, как в Исландии водные потоки исчезают в трещиноватых базальтах, он записал в

1906 г.: «Во многих областях... характерны потоки внутри лавового массива, что является особенностью его структурно-текстурного строения, и это необходимо рассматривать как псевдокарст» [30].

Л. Фуллер в 1922 г. [27] описывал формы лессового псевдокарста в Китае, приводя эффектные фотографии образовавшихся в результате его развития мостов и арок при выходе псевдокарстовых оврагов в более крупные долины, провалы и остаточные формы рельефа — стены.

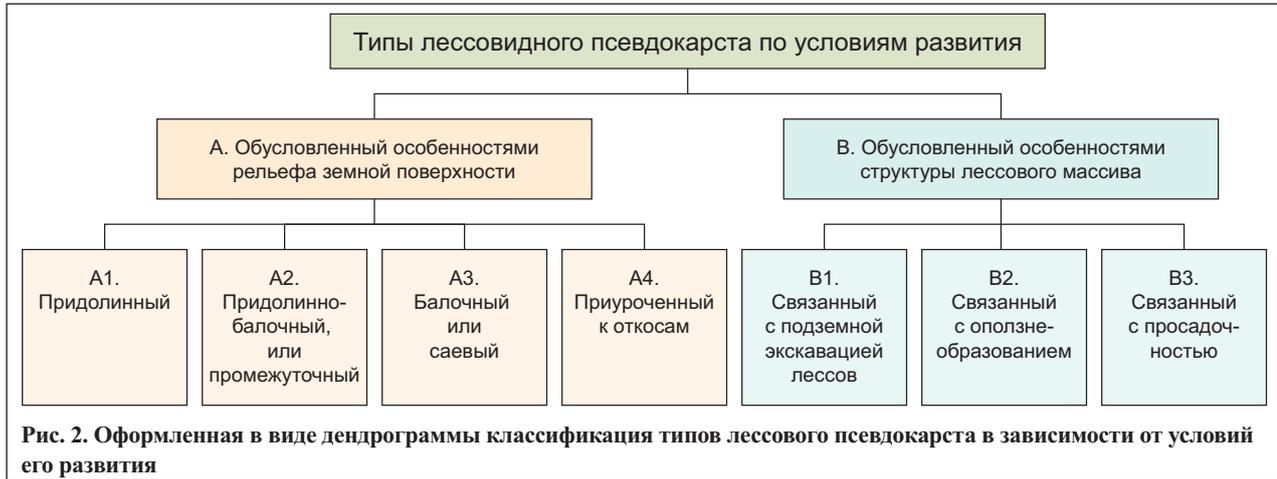
На территории СССР, а затем и России лессовый псевдокарст изучали М.М. Решеткин, К.И. Лисицин, И.Г. Глухов и др. [10]. В «Геологическом словаре» 1973 г. издания [5] термин «псевдокарст» трактовался следующим образом: «Псевдокарст (ложный карст) — западинно-впадинный рельеф, образованный понижениями разного размера, внешне напоминающий карст, но возникший в результате иных процессов». В 1975 г. был опубликован известный труд Н.И. Кригера «Лессовый псевдокарст» [10], где этот автор впервые привел классификацию псевдокарстовых форм рельефа и дал подробный анализ литературы, посвященной этим вопросам как у нас в стране, так и за рубежом. Позже Н.И. Кригер с соавторами опубликовали целую серию статей, посвященных морфологии, механизму, динамике и методам исследования псевдокарста [11, 12 и др.]. Например, в работе [11] приводится следующий вывод: «Таким образом, лессовый псевдокарст представляет собой сложный зональный процесс изменения подземного и поверхностного рельефа в недоуплотненных лессовых породах, обладающих “водобоязнью”».

В трудах международной лессовой комиссии ИНКВА 1989 г. [6] приведен перечень основных научных работ, посвященных ЛП.

В нормативной литературе нашей страны термин «лессовый псевдокарст» впервые встречается в п. 1.8 ВСН 33-2.2.06-86 [3], где в местах длительного действия градиентов фильтрации воды рекомендуется проводить мероприятия по защите от химической и механической суффозии и ЛП. В п. 6.10 СНиП 11-02-96 [21] указывается, что при изысканиях в районах распространения просадочных грунтов необходимо также обращать особое внимание на развитие лессового псевдокарста. В проекте актуализированной редакции СНиП 11-02-1996 (п. 6.5.3.2 [20]) рекомендации по поводу ЛП остались без изменений.

Завершить этот краткий экскурс в историю становления терминов «псевдокарст» и «лессовый псевдокарст» хотелось бы цитатой из доклада Г.Н. Дублянского и В.Н. Дублянской [7], сделанного на совещании, проходившем в г. Кунгуре в 1992 г.: «В настоящее время понятие “псевдокарст” во всем мире приобрело права научного термина».

Лессовый псевдокарст — результат гидромеханического, гравитационного, биологического и физико-химического зональных процессов, протекающих в недоуплотненных лессовых породах при их избыточном (как правило, техногенном) увлажнении и приводящих к образованию форм, очень напоминающих типичные карстовые (во-



ронки, колодцы, провалы, пещеры, тоннели, останцы и др.) [13]. Доминирующим здесь является именно механическое отторжение частиц вертикальным турбулентным водным потоком в трещинах, ходах землероев и корнеходах. Поэтому при поступлении большого количества воды ЛП развивается весьма стремительно.

Проявления (формы) ЛП очень разнообразны. Факторы, способствующие их образованию, делятся на природные и техногенные.

По условиям развития и воздействия природных и техногенных факторов можно выделить типы лессового псевдокарста, представленные на рис. 2. Характеристика придолинного (А1), балочного (А3), связанного с подземной экскавацией грунтов (В1) и других его типов уже приводилась в литературе [13, 14]. Здесь же кратко остановимся на двух впервые выделенных типах — придолинно-балочном, или промежуточном (А2), и приуроченном к бровкам откосов (А4).

Придолинно-балочный, или промежуточный, тип лессового псевдокарста (А2) развит в пределах слабовыраженных в рельефе сглаженных уступов в

адырной части предгорий. Это зона относительно резкого изменения общего угла наклона поверхности (как правило, идет изменение угла на 5° и более). Именно здесь, в зоне шириной от 20 до 50 м, и идет развитие единичных псевдокарстовых форм. Оно связано с начальной стадией развития ЛП и деградацией лессового массива на данной территории.

Освоение слабонаклонных лессовых массивов, ранее не вовлеченных в сельхозоборот, приводит к нарушению естественного растительного защитного покрова и меняет режим влажности, а обвалывание зоны увеличения угла склона для задержания влаги из атмосферных осадков приводит к формированию псевдокарста.

В указанном типе ЛП, как правило, проявляется парагенезис оползнеобразования и псевдокарста. Переувлажнение лесса в локальной зоне, нарушенной псевдокарстом, приводит к смещению грунта в виде небольшой оплывины площадью до 100 м^2 и глубиной до 2 м. Затем уже в нарушенной оползнем зоне вновь продолжается развитие псевдокарста, что наглядно демонстрирует фотография, представленная на рис. 3.



Рис. 3. Придолинно-балочный (промежуточный) тип лессового псевдокарста, приуроченный к зонам, пораженным оползнями-оплывинами. Территория плавного перехода равнинной части в горную. Южный склон Гиссарского хребта (Таджикистан)



Приуроченный к бровкам откосов тип лессового псевдокарста (А4) развивается в виде полос шириной до 20–30 м, протягивающихся вдоль искусственных выемок или откосов. В силу своей «молодости» он развит, как правило, на локальных участках неконтролируемого водосброса или нарушения растительного покрова массива и представлен цепью воронок небольшой протяженности и провалами площадью до 10–20 м². При своевременно проведенных мероприятиях по борьбе с этим типом ЛП он затухает, однако в случае выпадения аномально большого количества осадков он вновь активизируется. О подобных псевдокарстовых формах при освоении Михайловского рудника Курской магнитной аномалии (КМА) говорит Л.С. Табаксблат [23].

Морфология лессового псевдокарста чрезвычайно разнообразна. В силу своеобразия физико-химических свойств лессовых пород внутри псевдокарстовых полостей не образуются такие характерные для карста формы, как сталактиты, сталагмиты и сталагнаты (хотя авторы, неоднократно проникая в псевдокарстовые пещеры, отмечали на горизонтальных поверхностях небольшие, высотой до 5–6 см и диаметром до 4–8 см, образования из переувлажненного лесса, напоминавшие сталактиты, дальнейшего увеличения которых, как правило, не происходило). Однако для ЛП характерно обилие разнообразных форм, во многом схожих с формами типичного карстового рельефа.

Классификация псевдокарстовых форм рельефа в лессах была предложена Н.И. Кригером в 1975 г. [10]. Она была расширена и уточнена им и его коллегами позднее [12]. В дальнейшем вышла в свет работа, в которой один из авторов настоящей статьи с соавтором вновь расширили и уточнили данную классификацию [16]. С дополнениями, основанными на их многолетнем опыте изучения псевдокарста в Таджикистане, Узбекистане, Рос-

сии и Китае, она может быть представлена в виде дендрограммы, изображенной на рис. 4.

В *поверхностные псевдокарстовые провальные формы рельефа* авторы включили *провалы*, которые представляют собой впадины с вертикальными стенками, образующиеся в результате обрушения сводов пещер и тоннелей [22]. Это наиболее крупные провальные формы псевдокарста. Они характеризуются самой различной конфигурацией в плане. Размеры провалов — от десятков до тысяч квадратных метров. Если они приурочены к подземным водотокам, то имеют некоторую вытянутость по ходу движения последних. В отличие от траншей провалы имеют большую глубину (до 15–20 м) и площадь до тысяч квадратных метров (рис. 5).

На возникновение и развитие лессового псевдокарста оказывает влияние обширный комплекс факторов (геохимических, геоморфологических, климатических, почвенных, биологических, техногенных и др.). Установлено, что наиболее интенсивное его развитие происходит при техногенном воздействии человека на лессовые породы. Количество форм псевдокарста, возникших в результате техногенного нарушения сложившегося природного равновесия, превышает количество форм, образовавшихся в природных условиях, более чем в 13 раз [15].

Для *предотвращения разрушения лессовых массивов* осуществляют различного рода *защитные мероприятия*, используя целый комплекс методов, которые можно разделить на три группы: (1) водозащитные; (2) конструктивные; (3) устраняющие способность лессовых пород к псевдокарстованию и эрозии [1].

К *водозащитным* относятся мероприятия, предусматривающие отвод поступающих атмосферных, техногенных и подземных вод, тщательную гидроизоляцию лессового массива.



Рис. 5. Псевдокарстовые провалы на склоне юго-западной экспозиции в провинции Ганьсу (Китай). Диаметр провалов — более 100 м, глубина — от 10 до 20 м

К *конструктивным* относятся мероприятия по организации и устройству цивилизованного сброса с лессового массива поступающей воды (до базиса эрозии). В случае если в массиве уже имеются видимые псевдокарстовые проявления (узкие ходы, воронки, провалы и др.), проводится их своевременное тампонирование и засыпка местным увлажненным грунтом с уплотнением до $1,6 \text{ г/см}^3$. Также применяется устройство горизонтальных или наклонных террас с обваловыванием по кромке с целью ослабления процессов эрозии с последующей высадкой лесных культур.

К *устраняющим способность лессовых пород к псевдокарстованию и эрозии* относятся мероприятия по механической (трамбовка, замачивание, взрывы и др.) и физико-химической (обжиг, силикатизация, пропитка цементными растворами, обработка солями, укрепление органическим веществом и др.) обработке лессовых массивов. Это так называемые *методы технической мелиорации лессовых грунтов*.

Посадки робинии псевдоакация и можжевельника китайского

Остановимся более подробно на высадке лесных культур, относящейся к конструктивным мероприятиям.

Защитная противоденудационная роль наземной растительности хорошо известна. При высокой степени покрытия ею почва даже на склонах крутизной до 30° может быть защищена от смыва. В течение года, особенно весной, лучше всего защищают почву от эрозии многолетние травы. Со-

мкнутый травостой также является надежным амортизатором ударов капель.

Важным биогенным фактором, влияющим на водопроницаемость почвы, является рост и разложение корней растений. Как известно, корни распространяются предпочтительно по порам, ходам насекомых и червей, пустотам от разложившихся корешков, избегая как уплотненных участков почвы, так и больших пустот. Закупоривание пор корнями может временно значительно уменьшить водопроницаемость лессового массива.

В целом можно констатировать, что растения с густой и неглубоко проникающей корневой системой закрепляют верхний слой почвы, снижая вероятность развития лессового псевдокарста, тогда как растения, обладающие мощными длинными корнями, наоборот, могут способствовать развитию ЛП, подготавливая пути для проникновения поверхностных вод в толщу лессов. Действительно, при вертикальной ориентировке «корнеходов» происходит повышенная инфильтрация воды с поверхности — следовательно, повышается влажность массива. При наличии более 6 «корнеходов» на 1 м^2 котлована прочность лессового массива значительно снижается [17]. Отметим, что, например, корни полыни (*Artemisia baldshuanica* Krasch. & Zaprtzag.) и верблюжьей колючки (*Alhagi kirghisorum* Schrenk), достигая толщины в несколько сантиметров, проникают на глубину до 10–15 м.

Особое место среди древесных растений занимает робиния псевдоакация (*Robinia pseudoacacia* L.), принадлежащая к семейству бобовых. Р.П. Барыкина и М.А. Михеева [2, 19] отмечают, что для нее ха-

рактен наименьший водный дефицит, относительно повышенное водоудерживание, высокая засухо-, жаро- и газоустойчивость по сравнению с другими древесными растениями. Все виды рода робиния культивируются как декоративные деревья (и лишь акация белая используется также в лесохозяйственных и мелиоративных целях). Оценка по соответствующим методикам показала, что наибольший процент здоровых особей отмечается именно у робинии псевдоакация [19].

Робиния обладает далеко разветвляющейся корневой системой, что обуславливает ее устойчивость к ветру. Ее корневая система приспособлена к условиям аридных регионов, что выражается в проникновении главного столбового корня до глубины 25 м и развитой корневой системе верхового типа для сбора поверхностной влаги в периоды выпадения осадков.

Этот интродуцированный в Европе и Азии вид происходит из Северной Америки, где он растет на влажных известняковых почвах в лиственных лесах (на низменностях и вплоть до высоты 1350 м над уровнем моря) от Пенсильвании до Джорджии и Оклахомы (род робиния назван в честь Веспасиана Робина, который впервые привез это растение в Европу из Америки в 1620 г.). Робиния псевдоакация широко известна в странах Западной Европы. В некоторых областях ее, так же как и у нас в России, ошибочно считают аборигенным видом. Это листопадное дерево до 30 м высотой с диаметром ствола до 30–40 см, с просвечивающей раскидистой ажурной кроной, состоящей из обособлен-

ных ярусов. Кора его ствола серо-коричневая или темно-серая, с длинными продольными трещинами, голыми побегам и острыми колючками длиной до 5 см. Растет робиния псевдоакация быстро, особенно в первое десятилетие, хорошо переносит обрезку ветвей и пересадку, живет до 300 лет. Она очень светолюбива, засухоустойчива и малотребовательна к плодородию и влажности почвы (однако на сырых тяжелых почвах она чаще страдает от морозов и гибнет) [9].

По данным Е.И. Захаровой [8], робиния псевдоакация весьма неприхотлива. Однако полученные этим автором экспериментальные данные подтверждают мнение многих ученых о ее гибели на мокрых почвах при избытке застойной влаги.

Интересен многолетний опыт посадок данного растения в Таджикистане, где также широко распространены лессовые породы, хотя культура и опыт террасирования склонов и посадок робинии там стали развиваться только после установления советской власти [4]. Для предотвращения стока там строились канаво-террасы (на расстоянии 20–30 м друг от друга), на которые высаживалась робиния псевдоакация. Через 20 лет ее деревья достигали высоты 11 м и чувствовали себя комфортно. Однако при исследовании облесения Шахринаусского района (Таджикистан) был сделан вывод о том, что на склонах южной экспозиции более эффективным оказывается древесно-кустарниковый тип растительности. Это связано с меньшим иссушением почв за счет лучшего развития травянистой растительности [4].



Рис. 6. Оползневый склон крупного псевдокарстового оврага в провинции Ганьсу (Китай). 90% видимых на фотографии деревьев представлены робинией псевдоакацией (*Robinia pseudoacacia*)



Рис. 7. Одинокое растущее дерево робинии псевдоакация (*Robinia pseudoacacia*). При увеличении видно, что основной корень приурочен к вертикальной трещине, рассекающей лессовый массив

Авторы настоящей статьи наблюдали посадки робинии псевдоакация на лессовых склонах провинций Ганьсу и Шэньси в Китае. Она хорошо прижилась на террасированных склонах различной экспозиции при искусственных посадках, а также благодаря своей неприхотливости широко распространилась по Лессовому плато в результате самосева (см. рис. 6).

Обследованный авторами склон юго-восточной экспозиции около моста автотрассы Сиань — Биньсянь местами имел угол склона более 35° , а в местах развития псевдокарстовых провалов — до $60\text{--}70^\circ$. Всего на участке насчитывалось 15 провалов диаметром от 3 до 8 м, глубиной некоторых из них до 13 м. В период сдачи моста строителями было проведено террасирование откоса. Террасы в верхней части склона на момент обследования имели уступы высотой до 3 м и полки шириной до 4 м. В средней и нижней частях склона сохранившиеся террасы имели уступы высотой до 1,8 м, полки шириной до 2 м и небольшие валики по бровкам для задержки атмосферных осадков.

При обследовании одного из псевдокарстовых провалов на данном участке на глубине 8,9 м был обнаружен обнаженный корень погибшей робинии псевдоакация диаметром 8 см (рис. 7). Этот провал имел диаметр 5,5 м и глубину 8,9 м. Одному из авторов удалось спуститься в его нижнюю часть (рис. 8). Дно его было неровным, заваленным обломками лессовой породы с фрагментами ствола и ветвей погибшей робинии псевдоакация. В его северо-восточной части был виден заплывший понор диаметром около 0,7 м, углублявшийся в сторону стенки провала. Вдоль вертикального эрозионного размыва, как уже отмечалось, был виден обнажившийся корень робинии псевдоакация темно-коричневого цвета,

гладкий, с немного шелушившейся поверхностью. На видимом отрезке этого корня не наблюдалось крупных и мелких отростков (что было связано с глубоким залеганием грунтовых вод). Отростки на глубине 8,9 м не были функциональными. При более детальном обследовании можно было с уверенностью предположить, что первопричиной формирования этого конкретного провала явилась инфильтрация атмосферных осадков вдоль основного корня робинии псевдоакация.

Отметим, что при описании псевдокарстовой пещеры высотой 12 м и диаметром до 3,5 м в лессовых породах на левом берегу Дуная близ селения Сурдук края Воеводина в Сербии авторы работы [33] неоднократно ссылались на то, что свод пещеры такой величины мог сохраниться при наличии многочисленных деревьев робинии псевдоакация, росших на поверхности лессового массива. Очевидно, за первоначально возникшими трещинами последовало образование воронкообразного провала, однако дальнейшее развитие псевдокарста прекратилось в связи с наличием многочисленных деревьев описываемого вида, которые скрепили этот провал своими корневыми системами [25].

Таким образом, влияние робинии псевдоакация на устойчивость лессовых откосов и массивов двоякое. С одной стороны, в искусственных посадках ее корни, глубоко проникающие в склон на глубину до 25 м, «армируют» и укрепляют массив, предотвращая его разрушение. С другой — если растение по тем или иным причинам погибло, то оставшийся после разложения корня вертикальный ход будет являться идеальным водопроводящим каналом до глубины 25 м. Из-за этого в лесах, обладающих на протяжении тысячелетий ма-



Рис. 8. Склон, осложненный серией провалов в северной части магистрального моста автодороги Сиань – Биньсянь. Стрелкой указан обследованный авторами провал диаметром 5,5 м и глубиной 8,9 м

лой влажностью, высокой пористостью и недоуплотненностью, начинается развитие псевдокарста. Кроме того, авторы неоднократно отмечали процесс вертикального движения воды вглубь лессового массива вдоль корней абсолютно здоровых растений.

Не менее интересен и наблюдавшийся авторами опыт укрепления лессовых откосов в провинции Шэньси посадками можжевельника китайского (*Juniperus chinensis* L.). Это растение применяют как декоративное садово-парковое, а также в полезашитном лесоразведении как почвозакрепительное. Именно последнее его свойство используется для укрепления откосов. Корневая система у него мощная, глубокая и широко разветвляющаяся. Она универсальная, т.к. главный корень проникает глубоко вниз в поисках грунтовых вод, а боковые, горизонтальные, корни собирают влагу во время летне-осенних паводков и спасают растение от дефляции.

Можжевельник китайский засухоустойчив, светолюбив, морозостоек, хорошо переносит стрижку. Он лучше развивается на легких питательных почвах. В отличие от посадок робинии псевдоакации, которые культивируют при террасировании склонов, можжевельник сажают на крутых, до 70°, откосах. Высаживают двух-трехлетние саженцы в шахматном порядке с размером до 0,8 м (ранней весной). Глубина посадки составляет до 0,3 м (рис. 9). Подобная методика только еще внедряется при эксплуатации дорожных откосов, поэтому при обследовании более

2500 км автодорог в провинциях Ганьсу и Шэньси, к сожалению, не было встречено откосов с более ранними посадками можжевельника.

Освоение Лессового плато началось 8 тыс. лет назад. Здесь уже 6 тыс. лет выращивают и возделывают различные сельскохозяйственные культуры. Сельскохозяйственное террасирование склонов для удержания воды и уменьшения эрозионных и дефляционных потерь почвы практиковалось, по крайней мере, уже 3 тыс. лет назад [29]. Древнее искусство террасирования было основой натурального сельского хозяйства в регионе. Часто на террасах сажались деревья и кусты для того, чтобы замедлить процессы эрозии. Многочисленные археологические данные свидетельствуют о том, что пещерные жилища в регионе использовались с доисторических времен — по крайней мере, уже 2,5 тыс. лет назад [31]. Большинство сельских жителей Лессового плато (40 млн человек) до сих пор живут в этих очень удобных, но небезопасных жилищах.

Освоение Лессового плато привело к практическому уничтожению его природного растительного покрова [26]. Расширение обрабатываемых земель ослабило общее эрозионное состояние плато, т.к. они на 23% менее устойчивы к эрозии, чем необработанные территории [32]. В период династии Хань (221 г. до н.э. — 206 г. н.э.) были выжжены огромные пространства в данном регионе. Основной целью этого был контроль за передвижением монгольских кочевников, регулярно нападавших на сельскохозяйственные районы [36]. В результате всего этого Лессовое плато, как



Рис. 9. Лессовый откос с посадками можжевельника китайского (*Juniperus chinensis* L.)

уже было сказано, является самой эродированной территорией на Земле. Правительство Китая в последние десятилетия предпринимает серьезные меры по исправлению сложившейся ситуации, однако главной особенностью лесса является его необратимая деградация [24].

Расчет деградации Лессового плато

Попробуем провести очень приблизительный расчет деградации Лессового плато в результате развития псевдокарста и эрозии. В связи с этим напомним, что его деградация многократно усилилась после вырубки леса для удовлетворения нужд населения, что вызвало многократное увеличение ЛПП и усиленную эрозию. За 5 тыс. лет с момента активного освоения территории Лессового плато вплоть до начала XXI в. предпринимались лишь слабые попытки восстановления его лесной поверхности. Поэтому основная цель приведенного ниже расчета — показать именно техногенную составляющую в процессе деградации плато, не учитывая палеогеографическую обстановку на данной территории в раннем голоцене.

Если принять, что ежегодно река Хуанхэ выносит $m = 1,6$ млрд т (или $1,6 \times 10^{15}$ г) лессовой породы в пределы Великой Китайской равнины, а плотность ρ лесса в среднем равна $1,4$ г/см³, то можно вычислить объем V выносимого грунта, используя формулу: $V = m / \rho$. Отсюда $V = (1,6 \times 10^{15}) / 1,4 \approx 1,14 \times 10^{15}$ см³ = 1,14 млрд м³ = 1,14 км³. То есть река Хуанхэ ежегодно выносит в пределы Китайской равнины 1,14 км³ разрушенных лессов.

Площадь Лессового плато составляет 580 тыс. км². Если принять, что средняя мощность лессов на его территории составляет около 0,1 км, то об-

щий объем их толщи в пределах плато будет приблизительно равен 58 тыс. км³. Если в год выносятся примерно 1,14 км³, то за 100 лет — 114 км³. Значит, за 50 тыс. лет при нынешнем техногенном воздействии Лессовое плато будет полностью деградировано. То, что ПРИРОДА создавала на протяжении миллионов лет, человечество готово разрушить за 50 тыс. лет!

Если принять во внимание, что человек начал активное освоение Лессового плато за 3 тыс. лет до н.э. и продолжает это делать в течение 2 тыс. лет нашей эры, то у плато остается около 45 тыс. лет для существования. С точки зрения продолжительности человеческой жизни это огромный промежуток времени. В плане же масштабов геологического времени это составляет всего лишь мгновение.

Заключение

Высаживание различных растений на лессовых склонах и откосах, предпринимаемое с целью их укрепления и предотвращения их деградации, не всегда имеет однозначные последствия. Например, корни робинии псевдоакации нередко, наоборот, способствуют проникновению воды в лессовый массив и последующему развитию псевдокарста и эрозии.

Активное разрушение Лессового плато в Китае началось после того, как человек стал активно рубить и уничтожать аборигенную растительность этой территории, что вызвало многократное усиление развития ЛПП и эрозии. Для его уменьшения с середины XX в. предпринимались слабые попытки облесения плато. Но, к сожалению, до сегодняшнего дня оно остается самой эродированной территорией в мире. ❖

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев В.П., Потапов А.Д.* Инженерная геология. М.: Высшая школа, 2000. 512 с.
2. *Барыкина Р.М.* Особенности образования корневых отпрысков у белой акации (*Robinia pseudoacacia* L) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1958. Т. 63. № 4. С. 57–71.
3. ВСН 33-2.2.06-86. Мелиоративные системы и сооружения. Оросительные системы на просадочных грунтах. Основные положения. М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР, 1986.
4. *Галактионов В.Ф.* Опыт горно-облесительных работ в Шахринаусском лесхозе Таджикской ССР // Труды Чаткальской горномелиоративной опытной станции. Вып. 1. Ташкент, 1960. С. 126–140.
5. Геологический словарь. Т. 2 / отв. ред. К.Н. Паффенгольц. М.: Недра, 1973. С. 156.
6. Геология лессов и лессовидных пород СССР // Труды Лессовой комиссии ИНКВА. Т. 1, 2. Москва, 1989. С. 69.
7. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Понятие «псевдокарст» и его сущность // Проблемы псевдокарста: тезисы докладов на совещании по проблемам псевдокарста, г. Кунгур, 1992. Пермь, 1992. С. 6–9.
8. *Захарова Е.И.* Влияние лесорастительных условий на сохранность и рост робинии лжеакация в лесных культурах при интродукции // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2009. № 1 (21). С. 58–61.
9. Иллюстрированный определитель растений Ленинградской области / под ред. А.Л. Буданцева, Г.П. Яковлева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 339 с.
10. *Кригер Н.И.* Лессовый псевдокарст // Вопросы теории и методики инженерной геодинамики: труды ПНИИИС Госстроя СССР. 1975. Вып. 32. С. 25–49.
11. *Кригер Н.И., Ботников В.И., Лаврусевич С.А. и др.* Псевдокарст в лессовых породах // Геоморфология. 1983. №3. С. 79–84.
12. *Кригер Н.И., Гранит Б.А., и др.* Опыт комплексного изучения лессового псевдокарста для строительных целей (на примере окрестностей Алма-Аты) // Комплексные исследования в инженерных изысканиях для строительства: сборник научных трудов ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1982. С. 50–63.
13. *Лаврусевич А.А.* Некоторые особенности инженерно-геологических изысканий на территориях, пораженных лессовым псевдокарстом // Инженерные изыскания. № 10. 2010. С. 20–23.
14. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А.* Типы лессового псевдокарста и оценка уровня геологической опасности // Доклады международной научно-практической конференции «Ресурсно-экологические проблемы Волжского бассейна», Владимир — Москва, 2011. С. 75–77.
15. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич С.А.* Опыт оценки активизации псевдокарстовых процессов в лессах (на примере Яванской долины Таджикистан) // Геоэкология. № 4. 2011. С. 362–369.
16. *Лаврусевич С.А., Лаврусевич А.А.* Псевдокарст на территории сельскохозяйственного освоения земель в Таджикистане // Доклады АН Таджикской ССР. 1983. Т. 26. № 11. С. 723–725.
17. *Ларионов А.К., Приклонский В.А., Ананьев В.П.* Лессовые породы СССР и их строительные свойства. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 367 с.
18. *Ли Сы-гуан.* Геология Китая. М.: Иностранная литература, 1952. 520 с.
19. *Михеева М.А.* Геоэкологическая оценка биоразнообразия и устойчивости древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Воронежа): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2009. 23 с.
20. Проект СП XX.XXXXX.2012. Актуализированная редакция СНиП 11-02-1996. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Минрегион России, 2011.
21. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Минстрой России, 1996.
22. *Ступишин А.В.* Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1967. 291 с.
23. *Табаксблат Л.С.* Инженерно-геологические явления на Михайловском карьере КМА // Геология и полезные ископаемые центрально-черноземных областей. Изд-во Воронежского ун-та. 1964. С. 265–267.
24. *Трофимов В.Т.* Инженерная геология массивов лессовых пород. М.: Изд-во МГУ, 2008. 398 с.
25. *Beek L., Wint J., Cammeraat L., Edwards J.* Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes // Plant and Soil. 2005. V. 278. P. 55–74.
26. *Cook S., Li F., Wei H.* Rainwater harvesting agriculture in Gansu Province, PRC // Journal of Soil and Water Conservation. 2000. V. 55. P. 112–114.
27. *Fuller M.L.* Some unusual erosion features in the loess of China // Geographical Review. 1922. V. 12. P. 570–584.
28. *Huang C.C., Pang J., Zhao J.* Chinese loess and the evolution of the East Asian monsoon // Progress in Physical Geography. 2000. V. 24. P. 75–96.
29. *Kleine D.* Who will feed China? // Journal of Soil and Water Conservation. 1997. V. 52. P. 398–399.
30. *Knebel W.von.* Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene / Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1906.
31. *Li J.* Comment: population effects on deforestation and soil erosion in China // Population and Development Review. 1990. V. 16. P. 254–258.
32. *Luk S.* Soil erosion and land management in the Loess Plateau Region, North China // Chinese Geography and Environment. 1991. V. 3. № 4. P. 3–28.
33. *Lukić T., Marković S., Stevens T. et al.* The loess «cave» near the village of Surduk — an unusual pseudokarst landform in the loess of Vojvodina, Serbia // Acta Carsologica. 2009. V. 38. № 2–3. P. 227–235.
34. *Pye K.* Aeolian dust and dust deposits. London, Orlando: Academic Press, 1987, 334 p.
35. *Richtofen F.von.* China. Bd. 1, 2. Berlin, 1877. P. 726.
36. *Veeck G., Li Z., Gao L.* Terrace construction and productivity on loessal soils in Zhongyang County, Shanxi Province, PRC // Annals of the Association of American Geographers. 1995. V. 85. P. 450–467.
37. *Xin-min M., Derbyshire E.* Landslides and their control in the Chinese Loess Plateau: models and case studies from Gansu Province, China // Geological Society, London. Engineering Geology Special Publications. 1998. January 1. V. 15. P. 141–153.