

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**  
**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**  
**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

---

2024

№ 2

УДК 624.138

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ  
КОРНЕЙ ИВЫ С ПРОЦЕССОМ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Ма Юньцзин**

*Совместный российско-китайский университет МГУ-ППИ,  
E-mail: 1600280192@qq.com, 518172, г. Шэньчжэнь, Китай*

Исследован механизм разрушения корней ивы в засушливых и полузасушливых регионах Китая. Методом акустической эмиссии проанализировано разрушение корня при его растяжении. Фрактальная размерность сечения разрыва корня рассчитана с помощью технологии обработки цифровых изображений. Показано, что прочность на растяжение и предельное удлинение корня уменьшаются с увеличением его диаметра. Выявлено, что при увеличении диаметра корня прочность на сдвиг уменьшается. Акустическая эмиссия позволяет не только количественно описать характер разрушения корня, но и определить его критическое удлинение, когда корень перестает воспринимать нагрузку. Предложены оптимальные глубины ведения горных работ, позволяющие снизить деформацию поверхности, избежать повреждения корневой системы и сохранить растительность на поверхности.

*Корень ивы, акустическая эмиссия, коэффициент повреждения, прочность на растяжение, глубина добычи, защита растительности*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240204  
EDN: NPPIZE

---

Большая часть западных областей Китая находится в зоне засушливого и полузасушливого климата и покрыта лесовым грунтом с малым уровнем растительности и уязвимой окружающей средой [1]. Крупномасштабная угледобыча приводит к значительной осадке поверхности с образованием трещин. В результате корневая система произрастающих на поверхности растений разрушается под воздействием растяжения и сдвига, что приводит к отмиранию растений и значительной эрозии почвы. Впоследствии в этих районах учащаются селевые и оползневые явления, происходит опустынивание земель и другие природные катастрофы, после которых восстановление локальной окружающей среды будет труднодостижимым. В этой связи изучение механических свойств корней является актуальной задачей для защиты растительности и экологического восстановления в засушливых областях.

---

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 51323004, 51074163) в рамках Главной программы (№ 50834005), при поддержке Фонда развития инноваций выпускников в провинции Цзянсу (№ CXZZ13\_0924) и Открытого фонда главной государственной лаборатории геомеханики и подземного инженерного дела на больших глубинах (SKLGDUEK1409).

Влияние корней на укрепление почвы, а также их механические свойства рассмотрены многими исследователями. Модель укрепления почвы создана в [2, 3] на основе рассмотрения корня растения абсолютно упругим телом. В [4] предложен подход, в котором корень представлен как пучок волокон. С помощью рассмотрения деформаций растяжения и сдвига в [5–7] подтверждено постепенное разрушение корня. Испытания системы “корень – почва” на прямой сдвиг показали, что плотность корня значительно влияет на прочность всей системы на сдвиг [8, 9]. В [10, 11] рассмотрено влияние расположения корня в почве и его диаметра на прочность системы “корень – почва” на сдвиг. Показано, что при одинаковой влажности прочность на сдвиг повышается при увеличении диаметра корня. В инженерной практике высадка растений выполняется для предотвращения эрозии почвы и стабилизации неустойчивых склонов [12]. В [13] разработаны модели укрепления почвы с помощью георешетки, изучена проницаемость почвы и сопротивляемость эрозии при сохранении растительности.

В [14] рассмотрены вопросы контроля развития растений для создания устойчивой экосистемы. В [15] приведены характеристики и морфологические свойства корней растений, произрастающих в полузасушливых областях Бразилии. В [16] изучено влияние климатических изменений на гидрологический баланс и реакцию растительности, в [17–19] — ирригационных мероприятий, углеродного цикла и уровня азота на корневую систему в засушливых областях. В [20] выявлено, что корни кукурузы, произрастающей в рыхлой почве, жестче, чем в твердой, однако прочность корней в твердой почве больше, чем в мягкой.

В настоящей работе проведен анализ механических свойств и характер разрушения корней ивы из засушливых областей Китая. Математически описана степень повреждения корней в результате осадки поверхности, что предоставляет теоретическую основу для восстановления земель и сохранения растительности в горнодобывающих районах с засушливым и полузасушливым климатом.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы корней ивы собраны из засушливых и полузасушливых областей Китая (рис. 1). Из-за недостатка влаги корни ивы значительно заглубляются в почву для поглощения воды. При обрушении подземных полостей возникает смещение слоев почвы, в результате чего появляются силы сдвига, впоследствии преобразуемые в силы растяжения, которые повреждают корневую систему. Как только число поврежденных корней достигает некоторого порогового значения, растение не может поглощать питательные вещества и отмирает.



Рис. 1. Климатические зоны Китая

Для исследований собрано 10 образцов корней ивы, расположенных на расстоянии 50 м друг от друга (рис. 2). Образцы помещались в герметичный пластиковый контейнер для удержания влаги и находились в холодильнике при поддерживаемой температуре 4 °С с целью сохранения биологической активности корней. Согласно [21], корни, хранящиеся в герметичной упаковке при низкой температуре, обладают теми же механическими свойствами, что и свежие корни.

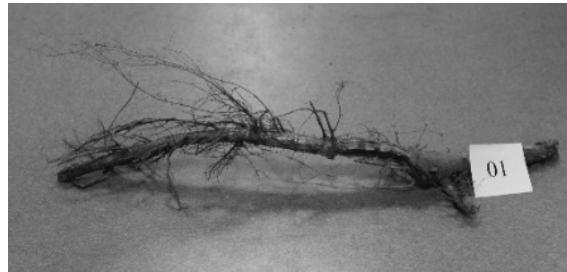


Рис. 2. Внешний вид образца корня ивы

## ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

*Определение прочности образца на растяжение и на сдвиг.* Испытание на растяжение выполнено на универсальной машине, которая обладает возможностью нагружать образец, измерять и фиксировать смещения и нагрузки. Корни диаметром более 8 мм достаточно сложно испытывать на растяжение, поэтому образцы классифицированы по диаметру от 1 до 7 мм и по длине от 200 до 250 мм с диапазоном измерения 100 мм.

Перед испытаниями измерялся диаметр корня с помощью штангенциркуля в пяти точках, равнорасположенных по длине корня. Диаметр разлома рассчитан путем интерполяции диаметров двух ближайших к разлому точек. Скорость растяжения установлена на отметке 1 мм/мин, прочность на растяжение и относительное удлинение определялись по формулам

$$T_r = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{l},$$

где  $T_r$  — предельная прочность на растяжение, МПа;  $F_{\max}$  — пиковое значение растягивающей силы, Н;  $D$  — диаметр корня до разрыва, мм;  $\varepsilon$  — относительное удлинение корня;  $\Delta L$  — абсолютное удлинение корня, мм;  $l$  — изначальная длина корня, мм.

При испытании на двойной сдвиг образец устанавливался в зажимы и к нему прикладывалась некоторая сила (рис. 3а). На начальной стадии он испытывал небольшую упругую деформацию. Когда напряжение сдвига достигало критического значения, которое образец не способен воспринимать, наступала стадия упруго-пластического деформирования. Напряжение, при котором происходил разрыв образца, определялось как прочность на сдвиг и рассчитывалось по формуле

$$\tau = \frac{F}{2S} = \frac{2F}{\pi D^2},$$

$F$  — сила сдвига;  $S$  — площадь плоскости сдвига;  $D$  — диаметр корня.

*Мониторинг акустической эмиссии и обработка цифрового изображения.* Акустическая эмиссия представляет собой упругую волну, сгенерированную быстрым высвобождением энергии под воздействием внешних условий (нагрузка или температура). Пьезоэлектрический керамический зонд, установленный на поверхности материала, преобразует энергию упругой волны в электрический сигнал, который усиливается и обрабатывается. Выходной сигнал — характеристический параметр источника акустической эмиссии.

Количественное описание трещин внутри корня имеет важное значение, так как позволяет сделать вывод о внутренней структуре и характерных дефектах, которые определяют биомеханические свойства корня. Параметры разрыва корня являются определяющими для сохранения растения. В настоящей работе проанализирован поперечный разрез корня и его разрушение растяжением методом фрактальной геометрии с помощью специального видеомикроскопа с последующей обработкой полученных цифровых изображений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Прочностные характеристики корня на растяжение.* Корень ивы состоит из множества волокон, проявляющих разные нелинейные механические свойства. При осевом растяжении волокна разрушаются постепенно. На начальной стадии нагрузку воспринимает перидерма (наружная оболочка) и флоэма (волокна, проводящие питательные вещества и состоящие из живых клеток). С увеличением растягивающего усилия волокна флоэмы растягиваются, проявляют свойства упругого материала. На средней стадии растяжения волокна флоэмы разрушаются, и нагрузка воспринимается волокнами ксилемы (проводят питательные вещества и состоят из мертвых клеток), которые проявляют нелинейные упругие свойства ввиду низкой жесткости.

На стадии упругой деформации кривые “напряжение – деформация” имеют близкий угол наклона. Это показывает, что модуль упругости материала почти не преобразуется при изменении диаметра и длины корня (рис. 3б). На кривой выделяются несколько пиков, объясняющихся многими факторами, в том числе неравномерной структурой. Выявлено, что прочность корня уменьшается от 37.00 до 21.23 МПа при увеличении его диаметра от 2.08 до 5.35 мм. Сопротивляемость корня растяжению увеличивается от 125.73 Н (диаметр 2.08 мм) до 477.27 Н (диаметр 5.35 мм). Таким образом, максимальная сопротивляемость растяжению растет при увеличении диаметра. При увеличении диаметра корня модуль упругости изменяется в диапазоне 0.52–0.81 ГПа, предельное удлинение — 0.085–0.026.

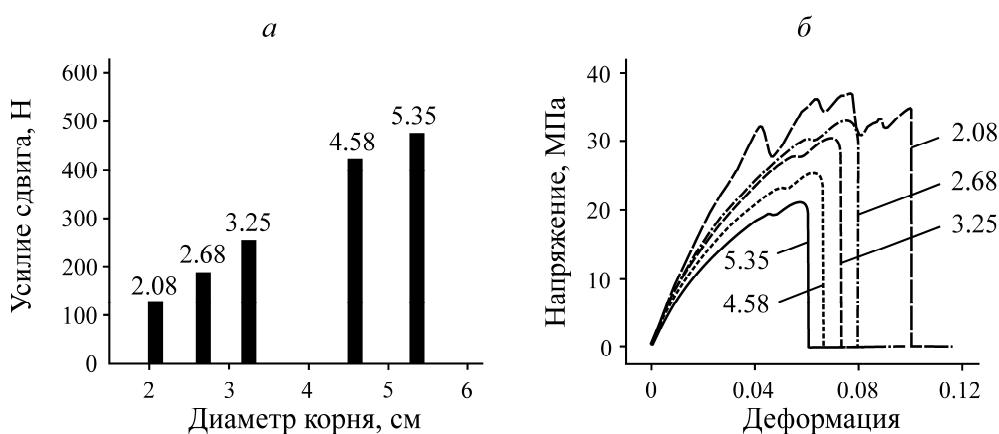


Рис. 3. Механические характеристики корня ивы с разным диаметром: а — сопротивляемость корней сдвигу; б — корреляция напряжения и деформации

Прочность на растяжение корня уменьшается при увеличении его диаметра: чем тоньше корень, тем прочность на растяжение больше. В результате регрессионного анализа соотношения между прочностью на растяжение и средним диаметром образца получена зависимость, представленная на рис. 4. Данный результат согласуется с [22]. Коэффициент корреляции  $R^2=0.918$  демонстрирует сильную зависимость прочности растяжения корня ивы от его диаметра.

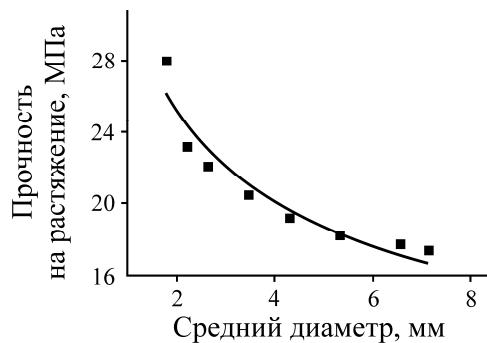


Рис. 4. Соотношение между прочностью корня на растяжение и его диаметром

*Прочностные характеристики корня на сдвиг.* При чистом радиальном сдвиге разрыв корня ивы происходит с участием деформации изгиба. Для анализа взяты два образца В2 и В12. Образец В2 выбран в качестве представителя группы В1–В6 с диаметрами 5–8 мм (рис. 5а). На участке *AB* усилие повышалось от 0 до 0.13 кН; на *BC* — от 0.13 до 0.81 кН, здесь происходило разрушение эпидермы (для образцов без эпидермы участок *BC* отсутствовал). На участке *CD* усилие сдвига увеличилось от 0.81 кН до 3.01 кН, на корень воздействовала как сдвиговая, так и изгибающая деформация. В точке *D* произошел основный разрыв корня, однако некоторые волокна в середине поперечного сечения соединяли оторвавшиеся части корня. Угол наклона участка *BC* меньше, чем угол наклона *CD*, так как волокна ксилемы более прочные, чем волокна флюэмы. Нагружение оставшихся волокон в середине поперечного сечения продолжалось (участок *DE*), на участке *EF* снизилась скорость уменьшения нагрузки и в точке *F* произошел полный разрыв корня.

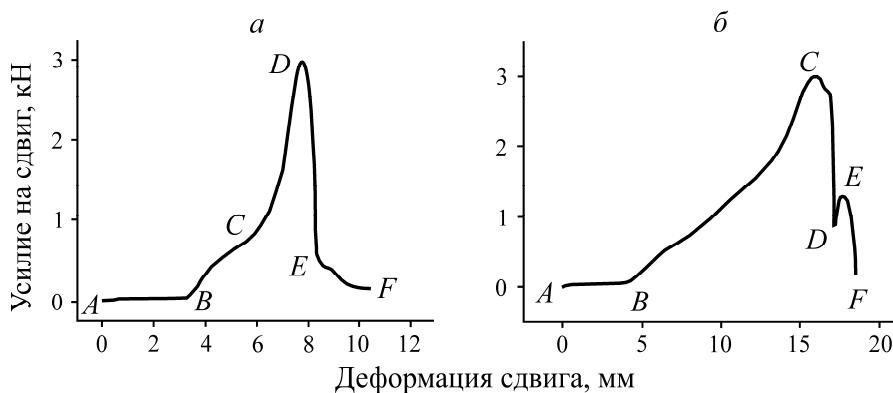


Рис. 5. Развитие деформации сдвига в зависимости от прикладываемого усилия для образцов В2 (а) и В12 (б)

Диаметр образцов в группе В7–В17 превышал 10 мм. Для анализа взят образец В12, из которого удалены волокна флюэмы. На рис. 5б виден восходящий участок *BC* примерно с одним уровнем наклона, в отличие от В2. Усилие сдвига на участке *BC* повышалось от 0 до 3.05 кН. Так как после основного разрыва в точке *C* количество оставшихся волокон, способных воспринимать нагрузку, больше, чем у образца В2, то на отметке 0.83 кН началась стадия вторичного нагружения (участок *DE*). Окончательный разрыв корня произошел в точке *F*.

Для анализа прочности корня на сдвиг выбраны две группы образцов (рис. 6). В десяти образцах наблюдалась два пика, подобные В12. Видна некоторая дисперсия кривых, обусловленная неравномерной структурой и внутренними дефектами корня. Для группы образцов с диаметром 6.5–8.5 мм усилие сдвига составило 3–4 кН, прочность на сдвиг — 32.69–40.94 МПа. Усилие сдвига для образцов диаметра 9.5–10.5 см — 4.5–6.0 кН, прочность на сдвиг — 30.17–32.35 МПа. При увеличении диаметра корня прочность на сдвиг уменьшается.

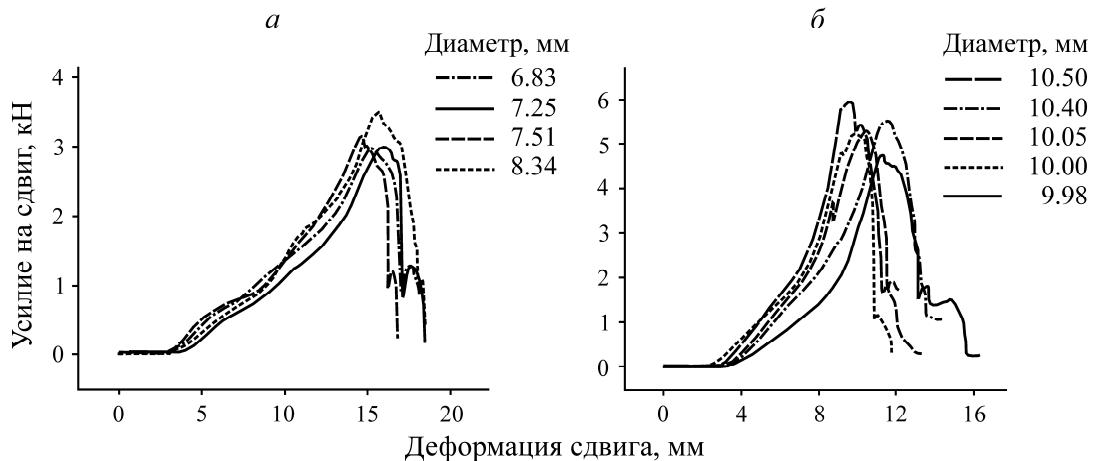


Рис. 6. Деформация сдвига образцов с диаметрами, мм: 6.5–8.5 (а) и 9.5–10.5 (б)

*Параметры акустической эмиссии при разрушении корня.* Для исследуемого образца до временной отметки 500 с сигналы акустической эмиссии (АЭ) имели низкую частоту и низкую энергию ( $\leq 25$  и  $\leq 30 \cdot 10^{-18}$  аДж). Количество сигналов АЭ постепенно увеличивалось после достижения максимального уровня нагрузки и достигло 124 с пиковой энергией  $118 \cdot 10^{-18}$  аДж. Постепенное увеличение количества сигналов и энергии показывает, что волокна не способны далее воспринимать нагрузку и постепенно разрушаются. При пиковой нагрузке образец входит в стадию быстрого разрушения, когда энергия и количество сигналов резко увеличиваются (рис. 7).

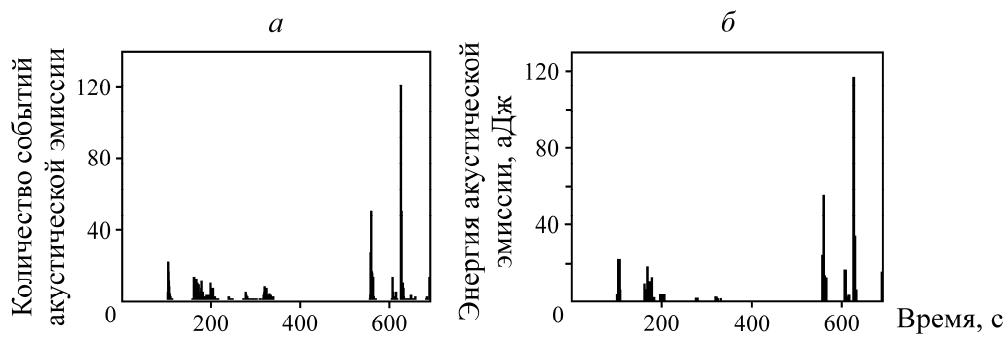


Рис. 7. Измерение акустической эмиссии в процессе растяжения образца

Количество сигналов АЭ хорошо согласуется с кривой “напряжение – деформация”. Пиковые значения появляются в момент разрушения образца или с небольшой задержкой после. На начальной стадии нагружения генерировалось небольшое количество сигналов АЭ (рис. 8). После разрушения волокон корня их количество резко увеличилось и достигло пикового значения, что по времени совпало с пиковым напряжением. На стадии упругой деформации сиг-

налы АЭ не обнаружены или их крайне мало. Появление АЭ зафиксировано на стадии пластической деформации корня, когда волокна накопили энергию в ходе упругой деформации и стали ее высвобождать. Изменение аккумулятивного количества сигналов АЭ совпадает с изменением растягивающего усилия, следовательно, параметры АЭ способны точно отражать мельчайшие изменения в структуре материала. Каждое разрушение волокон сопровождается событием акустической эмиссии, поэтому время разрыва волокон легко определить на кривой аккумулятивного количества сигналов АЭ. Акустическая эмиссия позволяет количественно описать характер разрушения корня.

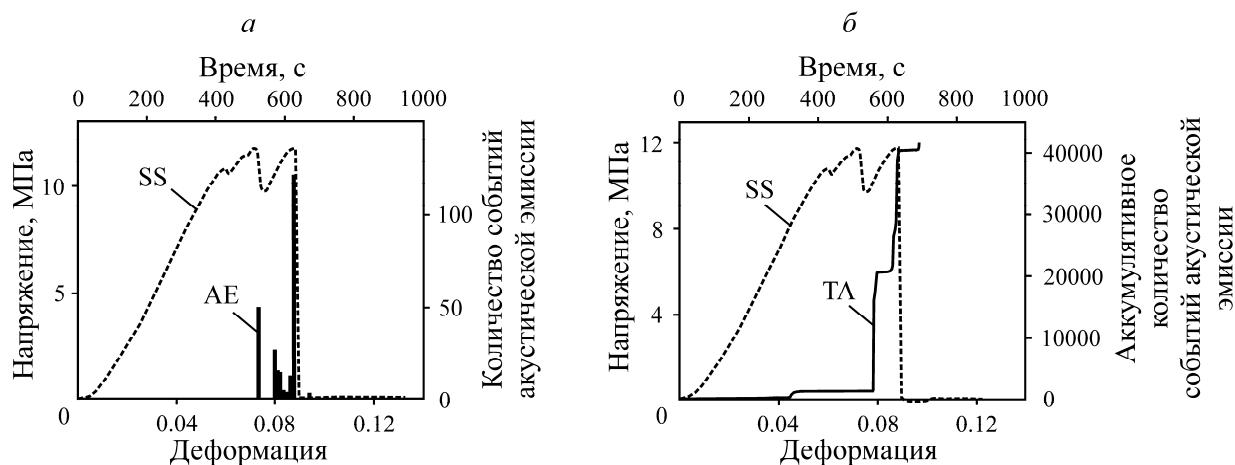


Рис. 8. Акустическая эмиссия в зависимости от напряжения и деформации при растяжении:  
SS — напряжение; AE — количество импульсов; ТА — аккумулятивное количество событий акустической эмиссии

*Фрактальные характеристики поверхности разрыва корня.* Микроскопическими методами исследований выявлено, что прочность корня на растяжение зависит от его размерных характеристик: при увеличении диаметра прочность корня уменьшается. Это объясняется тем, что корень растения — типичный анизотропный материал с неравномерным распределением внутренних дефектов, поэтому его волокна (ксилема и флюэма) по-разному реагируют на одинаковое поле внешних усилий, т. е. волокна различаются по жесткости. Под действием поля внешних усилий разрыв волокон является неравномерным и случайным событием, поэтому до основного разрыва корня считается фрактальным. Разница фрактальных характеристик трещин — основная причина зависимости прочности корня от его размера. Бинарные изображения анализировались с помощью инструмента FracLab в программном обеспечении Matlab (рис. 9).

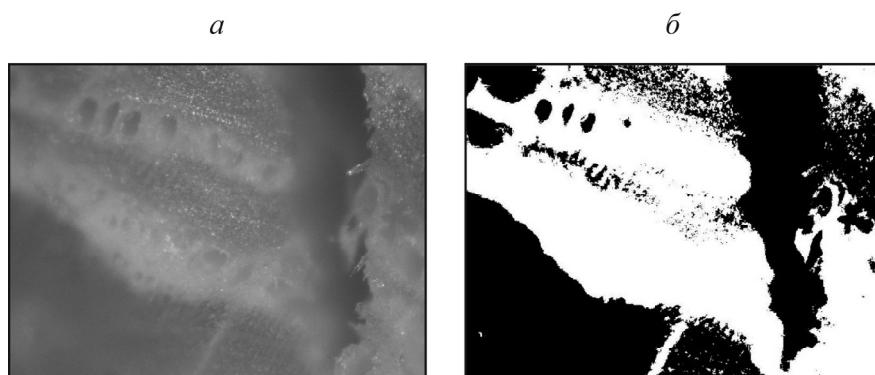


Рис. 9. Поверхность разрыва под микроскопом (а) и преобразованная в двоичную форму (б)

Фрактальные размерности ксилемы и флоэмы фиксировались до растяжения на поперечном сечении корня. Фрактальная размерность поверхности разрыва корня в результате растяжения больше исходного сечения до растяжения (рис. 10 $a$ ). Фрактальная размерность сечения увеличивается с изменением микроструктуры корня. Однако фрактальная размерность поверхности разрыва снижается при увеличении диаметра корня. Кривая фрактальной размерности сечения корня до растяжения описывается линейным уравнением  $D = 2.445 - 0.064r$  ( $R^2 = 0.9306$ ), после растяжения —  $D = 2.578 - 0.065r$  ( $R^2 = 0.9441$ ), где  $r$  — диаметр.

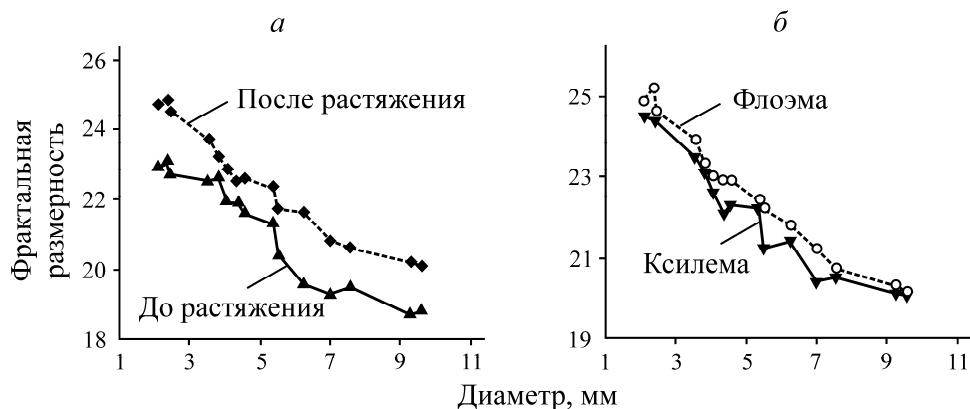


Рис. 10. Фрактальная размерность поверхности разрыва корня ивы

Морфологическая структура разрыва отражает общий характер разрушения материала. Шероховатое сечение соответствует вязкому разрушению, гладкое — хрупкому. Чем больше фрактальная размерность, тем больше шероховатость поверхности разрыва. Фрактальная размерность флоэмы ниже, чем у ксилемы, и уменьшается при увеличении диаметра (рис. 10 $b$ ). Это означает, что при увеличении диаметра сопротивляемость корня ивы растяжению уменьшается и флоэма в большей степени определяет сопротивляемость, чем ксилема. Между долей флоэмы в корне растения и увеличением длины корня при растяжении имеется положительная корреляция, между удлинением и долей ксилемы в корне — отрицательная [23]. Анализ фрактальной размерности поверхности разрыва корня ивы может использоваться для количественного описания характера повреждения и разрушения корня различного диаметра на разных его участках.

*Аккумулятивные параметры акустической эмиссии и коэффициент повреждения корня.* Разрушение материала можно представить в виде изменения механических свойств входящих в материал компонентов и структур, которое вызвано образованием или расширением внутренних дефектов под воздействием внешних нагрузок или окружающей среды. Разрушение может быть хрупким, упруго-пластичным, ползучим, усталостными в зависимости от явлений, протекающих в процессе разрушения. Предлагается использовать понятие коэффициента повреждения. Степень повреждения оценивается долей поврежденной части в общей площади поверхности:

$$D = 1 - \psi = 1 - \frac{A_d}{A},$$

где  $\psi$  — показатель целостности;  $A$  — площадь поверхности, воспринимающей нагрузку;  $A_d$  — площадь, занятая микродефектами.

Энергия акустической эмиссии и аккумулятивное количество сигналов АЭ способны отражать характер повреждения материалов при их растяжении. Аккумулятивное энергия используется в качестве основы для разработки модели повреждения при испытаниях на растяжение. Состояние поврежденного материала оценивается отношением аккумулятивной энергии АЭ при определенной нагрузке к аккумулятивной энергии АЭ при пиковом напряжении. Такое соотношение определяет коэффициент повреждения:

$$D = \frac{N}{N_0}, \quad N = \exp\left(a + b \frac{\ln(x)}{x} + \frac{c}{x^2}\right).$$

Здесь  $N_0$  — аккумулятивная энергия акустической эмиссии, соответствующая предельной нагрузке на образец;  $N$  — аккумулятивная энергия акустической эмиссии при некоторой нагрузке (если  $D=0$  — повреждение материала отсутствует, если  $D=1$  — материал разрушается).

Аппроксимация  $N$  выражением  $\exp(18.308 + 1021.518 \ln(t)/t + 13132.851/t^2)$  с  $R^2=0.982$  способна точно отражать степень повреждения образца (рис. 11). Развитие кривой энергии АЭ позволяет оценить степень его повреждения по углу наклона на протяжении всего процесса нагружения. На стадии упругой деформации угол наклона кривой стремится к нулю, образование и развитие внутренних дефектов имеет низкую интенсивность. На стадии пластической деформации происходит постепенное увеличение угла наклона, что означает быстрое развитие трещин и в конечном итоге приводит к разрыву корня.

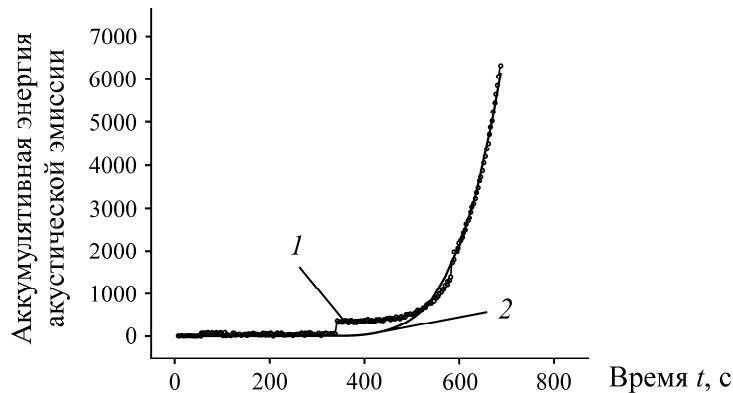


Рис. 11. Развитие аккумулятивной энергии во времени: 1 — аккумулятивная энергия АЭ; 2 — кривая аппроксимации

В ходе испытаний усилие нагружения определялось смещением, поэтому время нагружения пропорционально деформации растяжения:

$$\varepsilon = \frac{vt}{L},$$

где  $v$  — скорость нагружения образца на универсальной испытательной машине,  $L$  — расстояние, на которое изменился образец.

Выражая коэффициент повреждения через деформацию растяжения  $\varepsilon$ , получим

$$D = \frac{\exp\left(13.308 + 1021.518 \frac{\ln(7644.444\varepsilon)}{7644.444\varepsilon} + \frac{1}{4449.728\varepsilon^2}\right)}{6299.729}.$$

В [24] рассмотрено влияние различной степени повреждения корня на его способность к восстановлению. Выявлено, что доля подземной биомассы постепенно уменьшается при увеличении степени повреждения корня от 0 до 2/3. Степень повреждения 2/3 — критический уровень, после которого корень теряет способность к восстановлению. Критическое значение удлинения корня 0.085 определено путем подстановки коэффициента повреждения 2/3 в формулу для  $D$ . Если в результате осадки горных пород среднее удлинение корня превысит полученное пороговое значение, то корень уже не восстановится, что приведет к гибели растительности на значительной площади. Если удлинение корня — меньше порогового значения, то повреждение корня не приведет к отмиранию, что позволит сохранить способность растительности на поверхности к восстановлению.

*Повреждение корневой системы в результате осадки горных пород.* При отработке угольного пласта образуется большой объем выработанного пространства, влияющий на изменение исходного равновесного напряженно-деформированного состояния массива окружающих пород, в результате чего происходят его смещения и деформации. Когда напряжения растяжения достигают определенного уровня, на поверхности образуются трещины и происходит разрушение корневой системы произрастающих на поверхности растений.

Годовой уровень выпадения осадков в регионах произрастания ивы достаточно низкий, уровень испарения влаги — высокий. В процессе подземной угледобычи на поверхности образуются трещины и наблюдается ее осадка. Благодаря обильно разветвленной корневой системе, ива из почвы поглощает влагу и питательные вещества, однако ее корни тонкие и уязвимыми к разрывам при образовании трещин на поверхности. Влажность почвы — ключевой фактор организации экосистем и биологического разнообразия [25], поэтому удержание влаги в почве крайне важно для засушливых регионов.

Отработка угольного пласта № 6 осуществлялась в основном в засушливой области. Исходя из полученных данных, для анализа выбраны две области добычи (рис. 12). Для каждой области измерена горная осадка на 30 точках с интервалом 20 м.

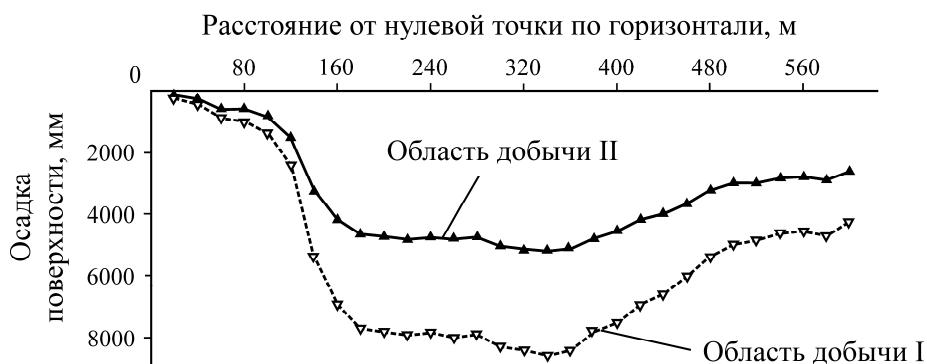


Рис. 12. Осадки поверхности в двух рассматриваемых областях добычи

Средняя глубина залегания пласта составляла 211 м, средняя мощность — 16.53 м, средний угол падения — 3° при простых геологических условиях и устойчивом залегании. Параметры осадки представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Параметры поверхности при отработке угольного пласта

Область добычи	Мощность пласта, м	Максимальная осадка поверхности, мм	Максимальный уклон поверхности, град	$\Delta L$ , мм
I	16.0	8583.06	147.1	0.0880
II	14.2	5201.21	87.0	0.0333

Так как поверхность до горных работ была горизонтальной и измеренное горизонтальное смещение поверхности крайне мало, то поверхностная осадка рассчитывалась как

$$W_{ij} = W_j - W_i,$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L_0^2 + W_{ij}^2} - L_0}{L_0},$$

где  $W_{ij}$  — разница осадки между двумя соседними точками измерения;  $W_i, W_j$  — осадки в точках  $i, j$ ;  $\varepsilon$  — среднее удлинение поверхности;  $L_0 = 20$  м — расстояние между двумя соседними точками измерения.

Предельное удлинение, которое может выдержать корень ивы, обозначим  $\varepsilon_g$ . Если  $\varepsilon \geq \varepsilon_g$ , корень разрывается; если  $\varepsilon < \varepsilon_g$ , корень остается целым и сохраняет способность к восстановлению. На основании этого условия можно выполнить оптимизацию параметров подземной угледобычи.

Видно, что в области добычи I  $\varepsilon < \varepsilon_g$ , т. е. корневая система ивы частично повреждена и растения сохраняют жизнь; в области добычи II  $\varepsilon \geq \varepsilon_g$ , большое количество растений погибло в результате разрушения корневой системы. Следовательно, мощность пласта — важный фактор, определяющий деформацию дневной поверхности. Если мощность пласта имеет оптимальное значение, то горизонтальное смещение и осадка поверхности малы. Если максимальная горизонтальная деформация поверхности не превышает допустимое удлинение корня, то корневая система сохраняет способность к восстановлению, чем обеспечивает выживаемость ивы.

## ВЫВОДЫ

При увеличении диаметра корня ивы его предельная сопротивляемость растяжению повышается, а предельная прочность на растяжение уменьшается, регрессионная кривая имеет экспоненциальный характер. Корень растения — типичный анизотропный материал, который имеет низкую сопротивляемость на сдвиг; основными механическими параметрами являются: предельная прочность на растяжение и предельное удлинение.

Разрыв корня представляет собой процесс, в котором его волокна разрушаются асинхронно по причине внутренней неравномерной структуры. Разрушение каждого волокна сопровождается сигналом акустической эмиссии, на основании чего можно установить закономерность развития степени повреждения. Также получены параметры повреждения по фрактальной размерности на изображениях поверхности разрыва, которые могут быть использованы в инженерной практике.

Горизонтальные деформации в результате подземной угледобычи могут быть определены в ходе измерений на местности. На основании механических свойств корня ивы и их зависимости от диаметра можно спрогнозировать влияние деформации почвы, вызванной разными методами подземной угледобычи, на корневую систему ивы, в результате чего появляется возможность по оптимизации добычи угля.

Авторы выражают благодарность исследователям данной тематики за предоставленные результаты, которые значительно помогли в проведении испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shaogang L. and Zhengfu B.** Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China, *Acta Ecological Sinica*, 2014, Vol. 34, No. 11. — P. 2837–2843.
2. **Wu Tien H., MK I., and Swanston D. N.** Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Can Geotech. J.*, 1979, Vol. 16, No. 1. — P. 19–33.
3. **Waldron L. J.** Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil, *Soil Sci. Soc. Am.*, 1977, Vol. 41. — P. 843–849.
4. **Pollen N. and Simon A.** Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model, *Water Resour. Res.*, 2005, Vol. 41, No. 7. — P. 226–244.
5. **Riestenburg M.** Anchoring of thin colluvium on hillslopes in Cincinnati by roots of sugar maple and white ash, *J. Am. Chem. Soc.*, 1994, Vol. 109, No. 23. — P. 7228–7230.
6. **Norris J.** Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in southern England, *Plant & Soil*, 2005, Vol. 278, No. 1–2. — P. 43–53.
7. **Docker B. and Hubble T.** Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species, *Geomorphology*, 2008, Vol. 100, No. 3–4. — P. 401–418.
8. **Operstein V. and Frydman S.** The influence of vegetation on soil strength. *P. I. Civil Eng-Ground Improvement*, 2000, Vol. 4, No. 2. — P. 81–89.
9. **Mickovski S., Stokes A., Beek R., Ghestem M., and Fourcaud T.** Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis, *Ecol. Eng.*, 2011, Vol. 37, No. 10. — P. 1523–1532.
10. **Mao Z., Ming Y., Bourrier F., and Fourcaud T.** Evaluation of root reinforcement models using numerical modelling approaches, *Plant & Soil*, 2014, Vol. 381, No. 1–2. — P. 249–270.
11. **Bourrier F., Kneib F., Chareyre B., and Fourcaud T.** Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots, *Ecol. Eng.*, 2013, Vol. 61, No. 1. — P. 646–657.
12. **Cazzuffi D., Cardile G., and Gioffrè D.** Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications, *Transp. Infrastruct Geotechnol.*, 2014, Vol. 1, No. 3–4. — P. 262–300.
13. **Pinho-Lopes M., Carlos D., and Lopes M.** Flume tests on fine soil reinforced with geosynthetics: walls of the salt pans (aveiro lagoon, portugal), *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 2015, Vol. 1, No. 2.
14. **Norris J., Stokes A., Mickovski S., Cammeraat E., Beek R., Nicoll B., and Achim A.** Slope stability and erosion control, *Ecotechnological solutions*, 2008.
15. **Pimentel R., Heck R., and Almeida G.** Studying natural root systems in soil of the Semi-Arid region of Brazil, *Soil Interfaces Sustain Dev*, 2015.
16. **Arellano M. and Irmak S.** Reference (potential) evapotranspiration. I: Comparison of temperature, radiation, and combination-based energy balance equations in humid, subhumid, arid, semiarid, and mediterranean-type climates, *J. Irrig. Drain Eng.*, 2014, Vol. 142, No. 4. — 04015065-1-21.
17. **Topak R., Acar B., Uyanöz R., and Ceyhan E.** Performance of partial root-zone drip irrigation for sugar beet production in a semi-arid area, *Agric. Water Manag.*, 2016, Vol. 176. — P. 180–190.
18. **ŞEptar L., Păltineanu C., Gavăt C., and Moale C.** Estimating root activity of a drip-irrigated peach orchard under the soil and climate conditions of a semi-arid region, *Sci. Pap-Series B, Horticulture*, 2015.
19. **Carrillo Y., Dijkstra F., Dan L., Morgan J., Blumenthal D., Waldron S., and Pendall E.** Disentangling root responses to climate change in a semiarid grassland, *Oecologia*, 2014, Vol. 175, No. 2. — P. 699–711.
20. **Goodman A. and Ennos A.** The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize, *Ann. Bot.*, 1999, Vol. 83, No. 3. — P. 293–302.

21. **Bischetti G., Chiaradia E., Simonato T., Speziali B., Vitali B., and Vullo P.** Root strength and root area ratio of forest species in lombardy (northern italy), Plant & Soil, 2005, Vol. 278, No. 1 – 2. — P. 11–22.
22. **Haili Z., Xiasong H., Xiaoqing M., Guorong L., Xingling L., and Guichen C.** Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root, Trans Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, Vol. 25, No. 5. — P. 40–46.
23. **Kun J.** Study on wood fracture parallel to grain based on fractal theory, J. Biomath., 2009, Vol. 4, No. 1. — P. 177–182.
24. **Yinli B., Jinhua S., Jian Z., Ziheng S., Yun C., and Huan S** Remediation effects of plant root growth inoculated with AM fungi on simulation subsidence injured, J. China Coal Soc., 2017, Vol. 42, No. 4. — P. 1013–1020.
25. **Kumar R., Shankar V., and Jat M.** Evaluation of nonlinear root uptake model for uniform root zone vis-à-vis multilayer root zone, J. Irrig. Drain Eng., 2013, Vol. 140, No. 2. — 04013010-1-9.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 10/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024