## ОБЗОРНАЯ статья

Наука о растениях, 03 апреля 2019 | <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00411>

# Лен (*Linum usitatissimum* L.) Волокна для композитного армирования: изучение связи между ростом растений, развитием клеточных стенок и свойствами волокон

Камиль Гуденхуфт, [Ален Бурмо](https://www.frontiersin.org/people/u/479633)\* и [Кристоф Бейли](https://www.frontiersin.org/people/u/186103)

* IRDL, UMR CNRS 6027, Université de Bretagne Sud, Lorient, France

Благодаря сочетанию высоких механических характеристик и растительного происхождения волокна льна являются интересным армированием для экологически чистых композиционных материалов. Все большее количество научных статей и обзоров фокусируется на обработке и свойствах продуктов на основе льна, без учета первоначальной ключевой роли волокон льна, а именно армирующих элементов стебля льна (*Linum usitatissimum* L.). Онтогенез растения, рассеяние свойств волокна вдоль растения или условия роста растений рассматриваются редко. И наоборот, изучение развития льняных волокон и параметров, влияющих на механические свойства растений (в масштабе всего растения или волокна), может быть интересным способом контроля и/или оптимизации характеристик волокон и, в большей степени, продуктов на основе льняного волокна. Первая часть настоящего обзора обобщила общие знания о стадиях роста растений льна и внутренней организации биологических тканей стебля. Кроме того, ключевые результаты, касающиеся развития его волокон, от удлинения до утолщения, рассматриваются, чтобы предложить часть объяснения необычных морфологических свойств волокон льна. Затем стройность льна иллюстрируется сравнением данных научных исследований травянистых и древесных растений. Во втором разделе приводится современное состояние сортовой селекции нескольких основных технических культур. Этот раздел включает различные критерии отбора, а также обзор их влияния на характеристики растений. Особый интерес уделяется устойчивости к полеганию и пониманию этого нежелательного явления. В третьем разделе рассматривается влияние культурных условий, включая скорость прорастания и ее связь с ветром в пологе растения, а также влияние основных тропизмов (а именно, тиг-тропизма, сейсмотропизма и гравитропизма) на характеристики стебля и волокна. Этот раздел иллюстрирует механизмы адаптации растений и то, как окружающая среда может изменять биомеханические свойства растений. Наконец, этот обзор запрашивает знания ботаников, селекционеров и фермеров о выборе потенциальных сортов льна, предназначенных для композитных применений, благодаря оптимизированным характеристикам волокон. На протяжении всей статьи обсуждаются морфология и механические свойства волокон в постоянной связи с их использованием для армирования композиционных материалов.

## Введение

Лен (*Linum usitatissimum* L.) является промышленным растением, представляющим растущий интерес. Поскольку его одомашнивание началось со времен неолита около 10 000 лет назад ([Quillien, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B177)), это растение культивировалось из-за его волокон, что привело к его обозначению “волокнистая культура” или “волокнистое растение”. Волокна льна использовались в качестве текстильного сырья, составляя шнуры и ткацкую пряжу, а затем на более модных предметах одежды или высококачественной тканевой обивке. Совсем недавно, начиная примерно с 1930-х годов ([de Bruyne, 1939](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B60)), и, поддерживаемые как механическими характеристиками, так и впечатляющим отношением длины к диаметру льняных волокон (средний диаметр 20 мкм при длине 25 мм) ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203)), их применение было расширено до более технических применений, а именно в качестве армирования композиционных материалов дляразработка более устойчивых материалов ([Yan et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B212)). В последние годы популярность композитов на основе растительных волокон значительно возросла для замены стеклянных волокон; преимущества растительных волокон по сравнению со стеклянными заключаются в их биологическом происхождении от фотосинтеза и их возобновляемом аспекте, низкой плотности, низкой опасности производственного процесса для здоровья человека, низкой истираемости обрабатывающих инструментов и т.д.и др. ([Pickering et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B173)). Хотя волокна льна имеют аналогичный диапазон специфических механических свойств, чем стеклянные волокна, со средним модулем упругости 52,4 ГПа, прочностью при разрыве 976 МПа и деформацией при разрыве 2,15% при плотности волокна 1,53 ([Lefeuvre et al., 2014b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B136)). В случае композиционных материалов на основе льна волокнистая часть или армирование состоит либо из технических волокон льна, либо из коротких волокон, пропитанных полимерной матрицей. Технические волокна состоят из пучков волокон (более или менее индивидуализированных; [Bensadoun et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B20)) в случайной выровненной нетканой форме ([Merotte et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B146)), однонаправленные слои ([Lefeuvre et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B134)) или более сложные ткани ([Robitaille and Gauvin, 1999](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B186)). Короткие волокна длиной в несколько миллиметров и хорошо индивидуализированные могут быть использованы и для обработки биокомпозитов путем экструзии или инъекции ([Doumbia et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B67)). Полимерная матрица удерживает армирование; это может быть термопластичный полимер ([Le Duigou et al., 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B132), [2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B131); [Dickson et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B62)), но также и термореактивная смола ([Joffe et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B124); [Åkesson et al., 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B2); [Mahboob et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B137)). Наконец, разработка композитов на основе льна является постоянно расширяющейся областью исследований, будь то в масштабе армирования, в масштабе матрицы или в отношении оптимизации интерфейса армирования/матрицы, и является предметом все большего числа работ, включая обзоры ([Summerscales et al., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B199); [Kuet al., 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B126); [Yan et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B212); [Pickering et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B173)).

Таким образом, несмотря на то, что лен является самым ранним одомашненным растением ([Allaby et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B5)), его волокна используются в составе большого спектра материалов, от повседневной одежды до технических композитов. Эти многочисленные существующие приложения и постоянное развитие в направлении более инновационных материалов делают лен растением растущего промышленного интереса. Следовательно, лен является предметом интенсивных исследований в области материаловедения с целью улучшения различных критериев в зависимости от того, используются ли волокна для текстиля или композиционных материалов. Однако гораздо меньше исследований посвящено льну как живому растению для изучения взаимосвязи между свойствами волокон льна и развитием растений, из которых они получены. Среди различных растений, культивируемых человеком для производства волокон, лен имеет много особенностей, которые делают его уникальной моделью развития и архитектуры ([Микшина и др., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B147)). Контроль его роста позволяет его волокнам достичь оптимальной зрелости и исключительных характеристик с точки зрения механической морфологии и характеристик ([Горшкова и др., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100); [Baley and Bourmaud, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B16)). Более того, в течение почти 100 лет он был предметом сортового отбора, который сделал его растением с сильным техническим потенциалом, а также отличным источником вознаграждения для фермеров ([Jankauskiene, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B122)). Сортовой отбор, скорее всего, является источником необычной стройности льна, что позволяет рассматривать растение льна как модель стабильности и источник биоинспирации ([Baley et al., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B17)). Как и любое растение, оно реагирует на внешние стрессы, и на его развитие и архитектуру стебля могут влиять тиг-морфогенез, гравитропизм, а также условия окружающей среды или культивирования ([Moulia et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B156)).

В настоящей работе предлагается обзор литературы, чтобы выделить возможные связи между характеристиками растений льна и их возможным влиянием на характеристики волокон. В первом разделе исследуются основные стадии роста растений льна и внутренняя организация биологических тканей стебля. Кроме того, рассматривается развитие волокон льна от их удлинения до утолщения. Затем стройность льна подчеркивается сравнением с травянистыми растениями и деревьями. Во-вторых, изучается выбор новых сортов льна и связанные с ними критерии отбора. Этот второй раздел включает обзор влияния сортового отбора на характеристики растений, а также более обширный обзор изменений, вызывающих улучшенную устойчивость к полеганию. Наконец, в последнем разделе исследуется влияние культурных условий, в частности саженца, на характеристики стебля и волокна. Рассмотрено влияние условий окружающей среды, таких как поток ветра в пологе растений и основные тропизмы.

## Рост растения льна и развитие его волокон

### Ростом растения

Идеальный климат для выращивания льна находится в умеренных и влажных регионах, где дневная температура не превышает 30°C и выпадает около 700 мм осадков в год; например, умеренные и морские районы Бельгии, Нидерландов или Франции в прибрежной Западной Европе являются очень подходящими местами для выращивания льна ([Султана, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B198)). Выращивание льна начинается с посева, обычно когда верхний слой почвы достигает примерно 7-9°C, т. е., например, между 15 марта и 15 апреля во Франции ([Sultana, 1983](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B197)). После этого стадии роста льна делятся на четыре основных этапа, как и у большинства культур: G (или появление растения), VS, F и SF и, наконец, S ([Lancashire et al., 1991](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B130); [Mediavilla et al., 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B142)). Прорастание обычно начинается примерно через 5-10 дней после посева ([Горшкова и др., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100); [ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)) и характеризуется появлением двух полностью развитых семядолей ([Paul-Victor et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B171)), что оправдывает его классификацию как двудольного растения ([Edwards et al.,1997](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B70)). ВС начинается довольно медленно, растение льна достигает 15 см примерно через 15-20 дней после G ([Gorshkova et al., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99); [ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)). За этим медленным развитием следует период быстрого роста, который длится около 15-20 дней ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99); [ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)). Растение льна способно удлиняться на несколько сантиметров в день во время быстрого роста ([Gorshkova et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100); [Heller et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B111)), достигая 80-90 см за этот 2-недельный период быстрого развития ([Gorshkova et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100); [ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)). Затем рост растений замедляется и завершается во время F, и растение достигает конечной длины около 1 м ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)). Цветение начинается примерно через 50 дней после G; оно длится около 15 дней для всего поля, хотя один цветок длится всего 1 день ([Bert, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B29)). Семена, содержащиеся внутри капсул, образуются через 15 дней после F; их полная зрелость достигается “поздним созреванием”, происходящим через 5-6 недель после F ([Tiver and Williams, 1943](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B202)). Наконец, как и для всех растений, S имеет место ([Lancashire et al., 1991](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B130)). Однако в случае промышленных льняных растений ни SM, ни S не достигаются. Фактически растения вырываются на FM, то есть примерно через 40 дней после F или “желтого созревания”, фазы, которая следует за “зеленым созреванием” (или “ранним созреванием”) ([Горшкова и др., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100)). Наконец, выращивание льна от посева до посадки занимает около 100-120 дней.

В дополнение к опыту фермеров различные этапы вмешательства во время цикла выращивания льна также определяются с учетом кумулятивной температуры, полученной растением после посева, также называемой кумулятивной степенью роста-днем ([Prentice et al., 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B175)). В день *n*кумулятивная формула "степень роста-день" (*GDDn*) рассчитывается как:

GDDn=∑i=1nTmax,i+Tmin,i2−TbaseGDDn=∑i=1nTmax,i+Tmin,i2−Tbase

где *Tmax, i*-максимальная суточная температура,*Tmin, i*-минимальная суточная температура в день *i* (при *i* равна 1 в день посева), а *Tbase* - базовая температура. Для льна базовая температура равна 5°C, так как считается нулевой вегетацией для этого растения (т. Е. Температурой, ниже которой не происходит роста) ([Bert, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B29)), тогда как для большинства культур она обычно составляет 10°C. В случае, когда среднесуточная температура ниже базовой температуры, *GDDi* считается равным 0.

Принимая во внимание этот метод расчета, G льна происходит, когда кумулятивный GDD достигает около 50°C. Цветение происходит при кумулятивной GDD 550°C, тогда как капсулы образуются при достижении более высокой кумулятивной GDD, а именно около 650-700°C. Наконец, волокна считаются зрелыми, когда кумулятивная GDD достигает от 950 до 1100°C. Семена созревают при температуре 1150°C, но растения фактически вырываются при FM ([ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)). Схема, видимая на [рисунке 1](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F1) иллюстрирует путь роста льна в соответствии с кумулятивным GDD. При различных условиях роста (таких как температура или количество осадков) ([Lefeuvre et al., 2014b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B136); [Du et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B68)) или различных методах культивирования (таких как плотность посева) ([Bourmaud et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)) структура роста льна модифицируется. Таким образом, [рисунок 1](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F1) дает только общее представление о стадиях роста льна.

**РИСУНОК 1**



**Рисунок 1.** Схема, иллюстрирующая рост льна, начиная со дня посева, в зависимости от времени после посева и соответствующей кумулятивной степени роста-дня (GDD). *G*: прорастание; *VS*: вегетативная стадия; *F*: цветение; *SF*: формирование семян; *FM*: зрелость волокон; *SM*: зрелость семян; и *S*: старение.

### Внутренняя организация биологических тканей льна

Лен, как и любое растение, состоит из различных частей тела, известных как органы растений; вегетативные органы могут быть сведены к стеблю, листу и корню, каждый из которых имеет определенные функции ([Arber, 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B11)). Органы растений образуют непрерывную структуру, потому что они имеют общее происхождение. Настоящий раздел, как и вся статья, будет посвящен только стеблю, который является ключевым органом онтогенеза льноволокна.

Стебель выполняет две основные функции: проводимость и поддержку ([Gartner, 1995](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B87)). Для выполнения своих жизненно важных функций стебель сам состоит из различных элементов, т. Е. Нескольких типов тканей, состоящих из групп различных типов клеток, различающихся по положению, структуре, происхождению или фазе развития ([Romberger et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B187)). Ткани, составляющие стебель, могут быть разделены на три основные тканевые системы: эпидермальную, сосудистую или наземную ([Romberger et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B187)). Каждый из них инициируется дифференцировкой меристем, т. Е. Областей, где недифференцированные клетки обладают способностью делиться, чтобы производить дополнительные клетки, которые будут дифференцироваться ([Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)), такие как волокна. Меристемы, участвующие в продольном росте стебля, называются первичными меристемами и расположены в верхней части побега (и корней) ([Meicenheimer, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B143)); они отвечают за первичный рост, который приводит к первичным тканям ([Schweingruber et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B191)). Например, прокамбий является первичной меристемой, которая отвечает за первичную сосудистую систему ([Esau, 1942](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B71)). С другой стороны, вторичный рост, ведущий к вторичным тканям, происходит из боковых меристем. Например, сосудистый камбий является боковой меристемой, ответственной за вторичные сосудистые ткани. Этот вторичный рост отвечает за утолщение стебля, довольно ограниченное и по существу приписываемое вторичной ксилеме в случае льна ([Schweingruber et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B191)). Таким образом, лен является травянистым растением, категория, которая относится к растениям, выражающим либо отсутствие, либо плохой вторичный рост органа. Расположение тканей внутри стебля определяет и обеспечивает функциональность этого органа ([Evert, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B73)). Однако трудно разделить клетки и ткани на четкие категории, поскольку вся стволовая система возникает из взаимодействия каждого из них. Информация, приведенная в [таблице 1](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#T1), представляет общую классификацию, основанную на литературе о структурах растений, которая немного отличается между авторами ([Romberger et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B187); [Gartner, 1995](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B87); [van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203); [Evert, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B73); [Schweingruber et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B191); [Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)); кроме того, настоящая классификация фокусируется на основных типах клеток, обнаруженных в стеблях льна, поэтому не является исчерпывающей.

**ТАБЛИЦА 1**



**Таблица 1.** Основные ткани и типы клеток, составляющие стебли льна.

В качестве дополнения к [таблице 1](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#T1)основные ткани или клетки, видимые на поперечном поперечном сечении, идентифицированы на [рисунке 2](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F2), причем волокна, собранные в пучки (до 40 клеток на пучок; [McDougall et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B140)), присутствуют на периферии разреза. [На рисунке 2](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F2) также показаны недостатки, такие как гетерогенное утолщение волокна в пределах одного пучка для данного поперечного сечения, которое является частью этой естественной композитной структуры. Наконец, волокна льна, встречающиеся в пучках, являются элементами склеренхиматозной ткани, расположенной в первичной флоэме ([Esau, 1943](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B72)), что привело к появлению терминов “лубяные волокна” ([Aldaba, 1927](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B3); [Esau, 1943](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B72); [Bergfjord and Holst, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B21)), “первичные флоэмные волокна” ([Evert, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B73); [Gorshkova and Morvan, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B94); [Gorshkov et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B91)) или “перициклические волокна” ([Tiver, 1942](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B201); [Catling and Grayson, 1982](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B43)) иногда встречаются в литературе. В отличие от некоторых других волокнистых растений, лен генерирует только первичные волокна, т. Е. Волокна происходят исключительно из первичного роста ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203)). Например, конопля (*Cannabis sativa* L.) имеет как первичные, так и вторичные волокна, последние подвергаются специальным исследованиям ([Снегирева и др., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B193); [Bourmaud et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B36); [Fernandez-Tendero et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B77)). Однако образование вторичных волокон не будет подробно описано в настоящей работе по причинам, упомянутым выше.

**РИСУНОК 2**



**Рисунок 2.** Описание идентифицируемых тканей и клеток на поперечном сечении в нижней части растущего льна, окрашенного толуидиновым синим.

### Клеточный рост волокон льна

С точки зрения биологии растений волокно-это отдельная клетка склеренхимы, которая обеспечивает механическую поддержку растению. Кроме того, волокно характеризуется экстремальной длиной и отношением длины к диаметру более 1000 ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203)). Кроме того, этот тип клеток демонстрирует впечатляюще толстую клеточную стенку, так как последняя может достигать десяти микрометров в толщину, то есть примерно в 10 раз толще, чем большинство других типов клеток ([Микшина и др., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B147)). Дополнительными характеристиками волокна являются конические концы и веретенообразная форма ([Горшкова и др., 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B92)). Эти замечательные свойства и, что более интересно, усиленное удлинение и утолщение клеточных стенок подтверждаются льняными волокнами, что делает их подходящей моделью роста растительных клеток.

В случае волокон льна (именуемых здесь “волокнами”) клетки инициируются первичным ростом из апикальной меристемы ([Anderson, 1927](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B9); [Ageeva et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). За инициацией волокна следуют две основные стадии: удлинение и утолщение клеточной стенки ([Roach and Deyholos, 2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B184)). Стадия удлинения особенно заметна в случае волокон льна, так как их конечная длина может достигать 65 мм при средних значениях 25 мм ([Горшкова и др., 2003а](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B95)). Эти экстремальные значения могут быть объяснены двухэтапным процессом удлинения: скоординированный рост, а затем интрузивный рост ([McDougall et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B140)). Фактически процесс удлинения волокон льна начинается с скоординированного роста, т. е. Волокна удлиняются синхронно с соседними клетками ([Ageeva et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). Скоординированный рост начинает удлинение волокна от образования клеток до первых миллиметров от вершины, и это происходит для всех типов клеток верхней области стебля ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203)). Однако различные размеры между типами клеток могут быть результатом скоординированного роста из-за различной частоты деления клеток и сроков прекращения деления ([Снегирева и др., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B194)). Скоординированный рост волокна приводит к образованию многоядерных клеток и длится всего несколько часов, в конце которых клетка достигает в среднем 100 мкм в длину и около 5 мкм в диаметре ([Агеева и др., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1); [Снегирева и др., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B194)). Удлинение волокна продолжается при интрузивном росте, когда скорость продольного роста волокна превышает скорость соседних клеток, все еще растущих симпластическим ростом; в этом случае волокнистая клетка пробивается между другими клетками, и оба ее конца образуют “колено”, являющееся характеристикой начала интрузивного роста.[Рисунок 3](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F3)) ([McDougall et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B140); [Ageeva et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). Формы колена исчезают с продвижением интрузии, а появление веретенообразной формы с коническими концами происходит по мере удлинения волокна ([Ageeva et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). Кроме того, интрузивный рост реализуется диффузным ростом, т. Е. Вся поверхность волокна вытягивается ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)), хотя диффузное удлинение может иметь разные скорости по длине волокна, что объясняет образование колен и конических концов ([Агеева и др., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). Интрузивный рост длится дольше, чем скоординированный рост волокон, а именно несколько дней, в течение которых удлинение составляет около 1-2 см в день ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)). Таким образом, интрузивный рост происходит, начиная ниже первых миллиметров до области точки защелки, и приводит к тому, что волокна достигают нескольких сантиметров в длину (в среднем 25 мм ранее упоминалось) при среднем диаметре 20 мкм ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203)). Так называемая “точка привязки” определяется как критическая точка, за которой не происходит удлинения волокна, т. Е. Длина волокна достигает своего максимума на уровне точки привязки ([Горшкова и др., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100), [2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)) ([рис.4](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F4)). Кроме того, поскольку интрузивный рост больше не происходит ниже точки защелки, количество волокон на поперечном сечении при заданной высоте стебля больше не увеличивается в точке защелки или ниже нее ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)). По мере развития растения точка защелки перемещается вдоль стебля; она идентифицируется от начала быстрого роста до окончания роста растения и располагается на 10 см ниже вершины ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)). Кроме того, точка защелки просто определяется как “точка, где разница в нагрузке необходима для разрыва стебля при растяжении” ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)), из-за значительного изменения утолщения волокна и, следовательно, жесткости при изгибе стебля, с гораздо более мягким стеблем выше точки защелки. Впечатляюще, что более мягкие части иногда демонстрируют почти вертикальное положение верхней части растения под действием собственного веса и ветра ([рис. 4А](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F4)). Этот феномен изменения жесткости напрямую связан со второй стадией формирования волокна, а именно утолщением клеточных стенок, происходящим существенно ниже точки защелкивания ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99)). Утолщение клеточных стенок-гораздо более длительный процесс, чем удлинение клеток, так как он длится недели до зрелости растений, т. е. Может занять до 60 дней ([Горшкова и др., 2003b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B99); [Агеева и др., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B1)). Таким образом, этот этап является длительным и сложным процессом, который подробно описан в специальном следующем подразделе.

**РИСУНОК 3**



**Рисунок 3.** Схема, иллюстрирующая удлинение волокна, с волокнами, представленными зеленым цветом. **(А)** первая фаза скоординированного роста; **(Б)** более продвинутая стадия скоординированного роста; **(В)** начало интрузивного роста с волокнами, имеющими “колени” на обоих концах; **(Г)** более продвинутая фаза интрузивного роста, когда волокна становятся гораздо более длинной структурой, чем соседниеклетки и показ конических концов.

**РИСУНОК 4**



**Рисунок 4.** **(А)** Изображения двух стеблей льна разной высоты, имеющих разное расположение точки привязки. **(Б)** Схема, иллюстрирующая различные стадии формирования волокна вдоль стебля льна в зависимости от локализации точки защелки.

### Утолщением клеточных стенок

Благодаря внушительной толщине клеточной стенки льноволокна по сравнению с другими видами растений (клеточные стенки льноволокна могут достигать более 10 мкм, тогда как большинство клеточных стенок имеют толщину несколько микрон) ([Микшина и др., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B147)) процесс утолщения волокон был подвергнут многочисленным исследованиям. Этот процесс приводит к равномерному осаждению клеточных стенок по длине волокна, но к нескольким слоям клеточных стенок, осаждение которых описано ниже ([Снегирева и др., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B194)).

При своем формировании клетка льноволокна, как и другие растительные клетки, состоит из PW и соединяется с другой клеткой через окружающую ML ([Горшкова и др., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B100); [Cosgrove and Jarvis, 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B52)). PW волокон льна-очень тонкая и растяжимая структура, способная выдерживать впечатляющее удлинение волокон. Кроме того, он обладает способностью выдерживать осаждение новейших слоев клеточных стенок ([Горшкова и др., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B93)). Этот основной дополнительный слой, который должен быть нанесен внутри клетки на PW, является так называемым слоем S1, первым и очень тонким слоем SW ([Domenges and Charlet, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B65); [Rihouey et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B183)). Дальнейшие осажденные слои, ответственные за экстремальное утолщение волокна, и, более конкретно, их наименование, являются предметом дискуссий между авторами. На основе недавней статьи, посвященной зрелым волокнам ([Rihouey et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B183)), можно описать следующий дополнительный слой как основной толстый слой, обозначенный как S2 SW слой или предпочтительно G-слой из-за его специфических свойств. А именно, G-слой является волокнисто-специфичным и имеет выраженное содержание целлюлозы (до 90%) с высокой кристалличностью, низкий угол наклона целлюлозных микрофибрилл почти параллелен продольной оси волокна (при МФА, достигающем 8-10°), а также характеризуется отсутствием обоихлигнин и ксилан, его высокое содержание воды, впечатляющая пористость, а также сократительные свойства (это будет подробно описано далее) ([Микшина и др., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B147)). Этот замечательный слой клеточной стенки, являющийся G-слоем, привел к тому, что термин “G-волокно” иногда используется для обозначения волокон, имеющих такой слой ([Bowling and Vaughn, 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B38); [Roussel and Clair, 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B188); [Ibragimova et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116)). Наконец, самый внутренний тонкий осажденный слой определяется как S3 или Gn-слой ([Hearle, 1963](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B109); [Rihouey et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B183)). Организация различных слоев клеточных стенок и основные этапы утолщения волокон проиллюстрированы на [рисунке 5](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F5) (Протокол АСМ из литературы; [Goudenhooft et al., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B102)). Кроме того, Gn-слой обычно едва виден в конце утолщения, достигнутого FM ([рис. 5](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F5)); тем не менее, этот Gn-слой может оставаться в случаях экзогенных аварий, таких как засуха или полегание во время роста растений ([Горшкова и др., 2010b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B98)). Таким образом, этот последний слой определяется как переходный слой. Фактически, новейший Gn-слой постепенно превращается в зрелый G-слой над утолщением клеточной стенки, постепенно увеличивая толщину G-слоя ([Горшкова и др., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B93)). Gn - и G-слои отличаются по внешнему виду, а именно, Gn-слой демонстрирует разрыхленную структуру, тогда как G-слой демонстрирует гораздо более компактную и однородную конфигурацию ([Горшкова и др., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B96)), что приводит к большему модулю наноиндентирования G-слоя ([Goudenhooft et al., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B102)). Различия, которые могут быть распространены на другие слои клеточных стенок, объясняются их составом, а также расположением микрофибрилл внутри слоев.

**РИСУНОК 5**



**Рисунок 5.** **(А)** Схема, иллюстрирующая различные стадии утолщения волокна, начиная с клетки, имеющей только первичную клеточную стенку (PW) и заканчивая волокном, имеющим толстый G-слой, небольшой просвет и, возможно, оставшийся тонкий Gn-слой. **(Б)** АСМ-изображение промежуточной стадии утолщения клеточной стенки, показывающее G-слой и самый внутренний новейший Gn-слой. **(C)** АСМ-изображение конечной стадии утолщения клеточной стенки, показывающее толстый G-слой и самый внутренний остаточный Gn-слой.

### Состав и организация клеточных стенок

Состав и организация компонентов клеточных стенок льна являются предметом многочисленных дискуссий, поскольку они различаются между авторами ([McDougall, 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B139); [Morvan et al., 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B152); [Горшкова и др., 2010b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B98)). Эти характеристики представляют большой интерес, поскольку они могут быть коррелированы с механическими характеристиками волокон льна ([Lefeuvre et al., 2014a](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B135)). [В таблице 2](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#T2) предпринята попытка дать общий обзор архитектуры клеточных стенок, учитывая, что на эту последнюю влияют несколько параметров (таких как выбранный сорт льна, условия роста, культурные практики и т. Д.) ([Milthorpe, 1945](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B148); [Alix et al., 2009](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B4)) и разногласия между источниками. Кроме того, термин “гемицеллюлозы”, используемый в [таблице 2](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#T2), иногда заменяется в литературе “нейтральными полисахаридами”, чтобы повторить “пектиновые” полисахариды, которые являются пектинами ([Rihouey et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B183)). Можно заметить, что приблизительный состав Gn-слоя недостаточно подробно описан в литературе. Однако ожидается, что состав Gn-слоя будет очень похож на G-слой, так как этот последний должен быть ремоделированием Gn-слоя ([Горшкова и др., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B93)). G - и Gn-слои, благодаря высокому содержанию целлюлозы, обладают большим сродством к толуидиновому синему ([рис.2](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F2)), что облегчает микроскопическую идентификацию волокон. Упомянутое ремоделирование состоит из модификации или обрезки RG I, имеющего длинные галактановые цепи, специфической β-(1;4)-галактозидазой ([Roach et al., 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B185)). Укорочение цепей галактана RG I обеспечивает более сильное латеральное взаимодействие целлюлозных микрофибрилл, что приводит к превращению гетерогенного разрыхленного Gn-слоя, обогащенного длинными цепями галактана, в гомогенный и зрелый G-слой, состоящий из укороченных и захваченных цепей галактана ([рис.6](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F6)) ([Горшкова и др., 2018](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B93)).

**ТАБЛИЦА 2**



**Таблица 2.** Характеристики и приблизительный состав различных слоев клеточных стенок волокон льна.

**РИСУНОК 6**



**Рисунок 6.** Схема, иллюстрирующая утолщение клеточной стенки по отношению к ремоделированию Gn-слоя. Микрофибриллы целлюлозы первоначально разделены длинными галактановыми цепями, присутствующими в зарождающемся RG I [5]. Затем длинные цепи галактана обрезаются, что приводит к G-слою с компактными целлюлозными микрофибриллами. Схема, вдохновленная [Goudenhooft et al. (2018)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B102).

### Стройность стебля льна: невероятно тонкая структура в растительном царстве

“Стройность” определяется как отношение высоты колонны к ее наименьшему радиусу вращения ([Niklas, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B162)), определение, которое может быть применено не только к инженерным конструкциям, но и к растениям. Чаще всего для растений стройность определяется как отношение между максимальной высотой и базальным диаметром стебля ([Romberger et al., 1993](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B187); [Niklas, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B165)). Основываясь на литературе, стебли льна не имеют идентифицированных конкурентов с точки зрения гибкости по сравнению с растениями, имеющими тот же диапазон диаметра (а именно, травянистыми растениями, также называемыми недревесными растениями). Фактически, принимая среднюю общую высоту 1 м и слегка завышенный средний базальный диаметр 0,003 м ([van Dam and Gorshkova, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B203); [Gibaud et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B89)), лен обладает большей гибкостью, чем травянистые стебли, например, по сравнению с 190 другими недревесными видами, изученнымиNiklas [(1993b)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B164) ([рис. 7](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F7)). Сравнение должно быть тщательно интерпретировано, поскольку лен является растением, культивируемым в оптимальном контексте, тогда как большинство других растений являются дикими. Более того, несмотря на то, что лен является травянистым растением, он, по-видимому, представляет собой соотношение масштабирования, более похожее на древесные растения (включая деревья), а не на недревесные ([рис. 7](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F7)). Таким образом, фактор стройности подчеркивает геометрические аспекты растения (а именно, его длину и диаметр), что делает лен невероятно стройной структурой среди биологического мира. Эту интересную характеристику льна можно отнести к внутренней организации и свойствам его составляющих тканей, но сортовая селекционная работа, скорее всего, является основной причиной, которая привела к невероятно стройным растениям льна. Фактически, хотя сортовой отбор продовольственных культур был сосредоточен на разведении карликовых сортов для снижения их уязвимости к полеганию ([Crook and Ennos, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B59); [Oladokun and Ennos, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B168)), сортовая селекция льна никогда не стремилась уменьшить высоту растений. Действительно, напротив, достаточно высокие растения желательны для обеспечения более высокого выхода, поскольку волокна извлекаются из стебля.

**РИСУНОК 7**



**Рисунок 7.** Межвидовое масштабирование высоты растений (*H*) в зависимости от базального диаметра растений (*D*) льна в сравнении с формулами масштабирования и максимальной дисперсией недревесных растений (190 видов) и древесных растений (420 видов) по данным, предложенным [Никласом (1993b)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B164).

Основываясь на ранее представленных лексике и стадиях развития стеблей и волокон льна, следующий раздел в основном посвящен обзору литературы о работе сортовой селекции технических культур и, в частности, льна.

## Эволюция технических культур и сортовой селекции

Селекция культур, в настоящей работе также называемая “сортовой селекцией”, является работой, имеющей большое значение для достижения выращивания растений в промышленных целях. Сортовой отбор-это процесс или работа, посредством которой селекционеры намереваются изменить регулярные характеристики одомашненного растения, чтобы продвинуть его с одним или несколькими желательными свойствами ([Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)). В нескольких словах, он состоит из селекции существующих сортов, обладающих желаемыми свойствами, чтобы обеспечить новый выбранный сорт (также называемый “сортом”), который будет демонстрировать преимущества обоих родителей ([рис. 8](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F8)). Таким образом, этот отбор является искусственным процессом, который не происходит естественным образом. Для льна, являющегося самоопыляющимся растением, скрещивание производится вручную из цветов селекционерами. Для получения генетически фиксированного сорта и его правильного размножения требуется более 10 лет ([Bert, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B29)). Подробный принцип сортового отбора и его влияние на генетику растений не будут обсуждаться в настоящем обзоре, который скорее направлен на объяснение критериев отбора и их влияния на характеристики растений.

**РИСУНОК 8**



**Рис. 8.** Схема, иллюстрирующая основные этапы сортового отбора льна-долгунца от родителей P1 и P2 до многочисленных дочерних поколений fi для получения нового селекционного сорта. Схема, вдохновленная [Бертом (2013)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B29) и [Эвертом и Эйхорном (2013)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74).

### Новые сорта основных технических культур и критерии отбора

Среди промышленных растений такие злаки, как рис (*Oryza sativa*), пшеница (*Triticum aestivum*), рожь (*Secale cereale*), ячмень (*Hordeum vulgare*) или кукуруза (*Zea mays*), были одомашнены, а затем отобраны на протяжении многих лет. Основными целями их отбора являются, например, более высокая урожайность зерна, более крупные зерна, более толстые соломинки или семена, которые легче отделяются от плевел. Кроме того, волокнистые культуры также являются объектами сортового отбора. Одним из основных примеров волокнистой культуры, выбранной для ее волокон, является конопля (*Cannabis* sativa L.) ([Ranalli, 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B178)). В случае конопли использование этой волокнистой культуры в качестве сырья для производства веревки, ткани или бумаги восходит к 6000 годам назад ([Schultes, 1970](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B190)). Его сортовая селекция началась около 200 лет назад, и в настоящее время зарегистрировано менее 50 европейских сортов волокна ([Ranalli, 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B178)). Так же, как и для продовольственных культур, одной из основных целей сортового отбора конопли является повышение урожайности растений, главным образом с точки зрения содержания волокон в растении, а также в семенах и древесной сердцевине ([van der Werf et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B204)). В отличие от льна, конопля обладает способностью производить вторичные волокна ([Bourmaud et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B36)). Количество вторичных волокон должно быть ограничено, так как эти короткие и сильно одревесневшие волокна приводят к рассеянию характеристик и нежелательны для большинства применений ([van der Werf et al., 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B205); [Placet et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B174)). Таким образом, селекционеры должны отдавать предпочтение сортам с низким содержанием вторичного волокна. И последнее, но не менее важное: при выборе сорта необходимо учитывать дополнительный параметр, специфичный для конопли, а именно содержание ТГК в растении. Это психоактивное вещество должно контролироваться, чтобы представлять собой ниже допустимого предела 0,2% ТГК ([Grassi and Ranalli, 1999](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B104); [Callaway, 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B40)).

Следовательно, с начала сельского хозяйства сельскохозяйственные культуры были одомашнены людьми, главным образом для производства продуктов питания, а также сырья. На протяжении многих лет фермеры сохраняли семена растений с выгодными характеристиками для одомашнивания растений, проявляющих наиболее привлекательные свойства. Совсем недавно, начавшись около 200 лет назад, селекционеры скрещивали растения и отбирали новые сорта для получения улучшенных растений; этот процесс называется сортовой селекцией и может быть назван “селективной селекцией” ([Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)). Критерии отбора немного одинаковы от технической культуры к другой, хотя некоторые культуры имеют дополнительные требуемые критерии отбора, такие как конопля, которая также имеет юридические ограничения. Однако в настоящее время ожидается, что более поздний тип селекции выйдет за рамки селективной селекции и преодолеет плато, за которым селективная селекция больше не способна увеличивать урожайность ([Peng et al., 2009](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B172); [Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)); он называется “биотехнологией растений” и включает генную инженерию, такую каккак технология рекомбинантной ДНК ([Wielgus et al., 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B209); [Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)). Этот дополнительный тип селекции рассматривается за рамками данной работы и в настоящее время обсуждаться не будет.

### Фокус на новых сортах льна и связанных с ними критериях отбора

В категории технических культур лен также является основным растением, современные сорта которого являются результатом сортового отбора. Селекционеры выбрали для двух основных целей, а именно для его семян и волокон, в соответствии с ожидаемым применением селекционеры приняли другой подход, что привело к появлению двух различных групп сортов ([Heller et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B111)). Кроме того, также известно, что некоторые сорта были выбраны для обеспечения баланса между урожаем семян и волокон ([Foster et al., 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B83)). Настоящий обзор селекции льна сосредоточен исключительно на разработке сортов волокна.

С тех пор, как было развито сельское хозяйство, то есть около 10 000 лет назад, люди одомашнили и интуитивно выбрали штаммы льна, которые дали наиболее красивые растения, обеспечивающие волокна хорошего качества ([Evert and Eichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74); [Quillien, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B177)). Семена этих растений с привлекательными свойствами хранили и сеяли на следующий год, ожидая, что желательные черты появятся снова. Совсем недавно, как и другие технические культуры, люди намеренно скрещивали и отбирали растения льна для получения улучшенных сортов. Литература предполагает, что современные сорта льна-волокна произошли от более старых сортов, разработанных в Восточной Европе ([Helbaek, 1959](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B110); [Allaby et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B5)). Более точно, возможно, что разведение льна началось в Литве в 1922 году, после более чем 4000 лет выращивания в этой стране ([Razukas et al., 2009](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B182)). В настоящее время в 2018 году, после столетия сортовой селекции, эта работа выполняется лишь несколькими селекционерами; например, в настоящее время в Общем каталоге Франции зарегистрировано и коммерчески используется менее 50 сортов льна-волокнистого, исключая любой ГМО.

В 2017 году было зарегистрировано семь новых сортов, что свидетельствует о динамизме работы сортовой селекции льна. Кроме того, более старые сорта все еще зарегистрированы в 2018 году, такие как Marylin или Alizée, хотя более поздние были зарегистрированы и удалены в то же время; многочисленные удаления подтверждают проблему и инвестиции селекционеров льна в выбор сортов с фактическими улучшенными качествами. По экономическим причинам с начала селекции льна и даже больше в современном мире, столкнувшемся с разработкой композитов на основе льна ([Yan et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B212)), основной целью селекционеров текстильного льна является отбор высокоурожайных сортов льна для удовлетворения промышленного спроса ([Jankauskiene, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B122)). Численным примером невероятного увеличения выхода волокна может быть следующий: во Франции в 1930-1935 годах средний выход волокна составлял около 0,30–0,65 т/га ([Chevalier, 1944](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B47)), тогда как в 2015 году был получен средний выход волокна 2,02 т/га с самым высоким значением 3,92т/га для недавнего сорта Aramis на экспериментальных полях ([ARVALIS - Institut du végétal, 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B14)). Недавняя статья ([Goudenhooft et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B101)) иллюстрирует общее увеличение урожайности соломы и волокна с начала сортового отбора, в случае Франции. Точнее, увеличение волокон примерно на 35 кг/га было получено каждый год в период с 2003 по 2013 год, что соответствует примерно +2,3% урожая волокна каждый год ([Bert, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B29)). Конечно, увеличение выхода волокна связано с работой сортовой селекции, но также и с механизацией, которая появилась параллельно, начиная с 1960-х годов, а также с более высокой скоростью G (около 92%; [Bourmaud et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)) и ростом научных исследований, посвященных льну, обеспечивающих более точное знание роста растений ([Sultana, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B198); [O'connor and Gusta, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B167); [Montaigne, 1997](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B150)). Кроме того, урожайность собранной соломы с годами незначительно увеличивается, несмотря на механизацию, что подтверждает ключевую роль сортового отбора в повышении выхода волокна.

Кроме того, устойчивость к болезням также является критерием отбора для селекционеров льна, поскольку болезни могут быть разрушительными для культур и, таким образом, ограничивающими факторами в производстве льна. Например, устойчивость к грибковому патогену fusarium wilt (*Fusarium oxysporum*) является приоритетом сортовой селекции льна ([Spielmeyer et al., 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B195)). Кроме того, мучнистая роса (*Oidium lini*) также является основным заболеванием льна ([Rashid and Duguid, 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B179)), а также различные расы ржавчины льна ([Rashid, 1991](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B180)) или ожога льна (*Phytium megalacanthum*) ([Wiersema, 1955](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B210)), а устойчивость к ним является желательной характеристикой для новых сортов и проблемами для селекционеров.

Наконец, еще один критерий является приоритетом для селекционеров льна, а именно устойчивость к полеганию. Явление полегания льна проиллюстрировано на [рисунке 9](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F9). Это нежелательное событие также является основным критерием отбора риса или пшеницы ([Crook and Ennos, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B59); [Oladokun and Ennos, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B168)). Полегание обычно происходит после дождей и ветра ([Vera et al., 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B206)). Для продовольственных культур основным решением, предлагаемым для предотвращения полегания, является выбор карликовых сортов, т. Е. Более коротких стеблей ([Berry et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B26), [2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B28)). Это действительно подходящее решение для тех культур, зерна которых расположены в колосьях, а стебель играет только вспомогательную роль. Для льна, наоборот, интересные волокна расположены внутри стебля, что делает сокращение его длины гораздо менее разумным по экономическим причинам; таким образом, требуются более подходящие решения, чтобы избежать полегания без штрафа за выход волокна. Понимание этого явления, бросающего вызов биомеханике растений льна, является предметом следующего раздела.

**РИСУНОК 9**



**Рисунок 9.** Посаженные растения льна в поле в конце стадии F.

### Полегание льна: исследования в направлении лучшей устойчивости к полеганию

Явление полегания имеет решающее значение, поскольку оно может значительно повлиять на процесс уборки льна вместе с урожаем волокна ([Vera et al., 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B206)). Поскольку растения переплетены и близки к земле ([рис.9](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F9)), использование сельскохозяйственных машин намного сложнее, а процесс сбора урожая замедляется. Кроме того, полегание ограничивает растения в условиях высокой влажности при укладке на почву; это влияет на процесс сбора урожая, увеличивая массу растений, покрытых грязью, но также способствует развитию грибковых заболеваний, таких как Pasmo, вызванные *Septoria linicola* ([Muir and Westcott, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B159)). Однако лишь немногие исследования сосредоточены на понимании полегания льна, что делает это явление довольно сложным для сдерживания.

Для продовольственных культур в литературе упоминаются два основных типа полегания, а именно полегание стеблей и полегание корней, и они происходят через взаимодействие между ветром, дождем, почвой и растением ([Neenan and Spencer-Smith, 1975](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B160); [Crook and Ennos, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B59); [Berry et al., 2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B22)). Корневое полегание происходит из-за отказа корневого крепления и предпочтительно подвергается полеганию по сравнению со стеблевым, например, рисом ([Oladokun and Ennos, 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B168)). Однако в пределах одной и той же области полегание корней также может сопровождаться полеганием стеблей ([Berry et al., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B27)). Что касается эмпирических знаний льноводов, корневое полегание встречается редко, и поэтому данный обзор механизмов полегания фокусируется в основном на стеблевом полегании и структурных элементах, имеющих отношение к уязвимости полегания. В этих случаях полегание приводит к изгибу стебля ([Brazier, 1927](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B39)), когда прочность стебля в застрявшей части недостаточно высока, чтобы выдержать изгибающий момент, вызванный рычагом стебля (вызванный действием ветра,в сочетании или без дождя) ([Berry et al.,2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B27)). Для ячменя полегание может происходить в любой точке вдоль стебля, но предпочтительно в середине высоты ([Berry et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B26)). Это объясняется высокой гибкостью ячменя, связанной с быстрым снижением прочности вдоль стебля к более высоким позициям ([Berry et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B26)). С другой стороны, на примере пшеницы полегание происходит близко к поверхности почвы, в самой базальной части стебля ([Berry et al., 2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B22)); этот тип полегания также происходит для льна, по словам льноводов. Для предотвращения полегания пшеницы благоприятны более короткие сорта, а также сильные стеблевые растения в прикорневой части. Таким образом, количество вещества, расположенного в первом междоузлии, является решающим фактором; таким образом, скорость прорастания, дата посева, остаточный азот почвы с уменьшенным его поступлением и использование регуляторов роста растений (PGRs) полезны для стеблей ([Berry et al., 2003a](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B23),[b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B24),[c](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B25)). Эти параметры также ранее упоминались как выгодные для льна, подчеркивая соответствующую параллель между этими двумя культурами.

Если ассимилировать их с идеальной колонной, то глобальное изгибание растения можно приблизить, рассматривая формулу колонки Эйлера ([Niklas, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B162)). Несмотря на то, что растения на самом деле никогда не являются идеальными столбцами, формула столбца Эйлера дает представление о соотношениях между переменными (будучи гораздо более сложной в реальных биологических перспективах); это разумное приближение для стеблей растений, которые свободны в верхней части и закреплены у основания корнями. Формула колонки Эйлера для идеальной колонки, закрепленной у основания и свободной в верхней части, выражается:

Pcrit=π2EI4H2Pcrit=π2EI4H2

где *Pcrit*-критическая нагрузка на изгиб, *E*-кажущийся модуль упругости, *I* - второй момент инерции (являющийся I=πD464I=πD464 для круглого сечения) и *H* высота колонны ([Niklas, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B162)). Это уравнение показывает, что увеличение длины стебля или уменьшение диаметра стебля (*I* пропорционально *D4*), т. Е. Увеличение коэффициента гибкости, приводит к снижению критической нагрузки на изгиб и, следовательно, увеличивает риск изгиба. Влияние свойств стебля также представлено (отчетливо) кажущимся модулем упругости *E*Наконец, прочная структура способна выдерживать большую нагрузку, чем тонкая, состоящая из того же материала, т. Е. Высокий коэффициент гибкости будет означать повышенный риск изгиба, устанавливая потенциальный предел стоящих растительных структур ([McMahon, 1973](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B141)).

Дополнительным критическим параметром для рассмотрения является критическая высота изгиба. Этот последний параметр, полученный из формулы столбца Эйлера, определяется как максимальная высота, которую растение может достичь, оставаясь стабильным, учитывая его диаметр и свойства материала ([Greenhill, 1881](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B105)). Это задается уравнением Гринхилла (также известным как формула Эйлера–Гринхилла) ([Greenhill, 1881](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B105); [Niklas, 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B166)), выраженным для вертикального столба, такого как стебель,:

Hcrit=K(ED2ρ)1/3Hcrit=K(ED2ρ)1/3

где *Hcrit*-критическая высота изгиба, *K*-константа пропорциональности, *E*-кажущийся модуль упругости стебля, *D*-диаметр у основания, а ρ-насыпная плотность материала ([Greenhill, 1881](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B105)). Это подчеркивает, что для заданных свойств материала уменьшение диаметра стебля уменьшает максимальную высоту, которую стебель может достичь до разрушения. Кроме того, критическая высота изгиба зависит от других параметров, определяющих пропорционально постоянную *K* этими параметрами являются распределение диаметров (т. е. сужение) и распределение массы вдоль стержня, а также градиенты механических свойств вдоль стержня ([Holbrook and Putz, 1989](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B114); [Jaouen et al., 2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B123)). Наконец, можно определить коэффициент безопасности; это отношение между критической высотой изгиба и фактической высотой растения ([Niklas, 1993b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B164), [1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B165)).

Экспонированные формулы подтверждают ключевую важность гибкости льна как фактора для понимания нестабильности растений, такой как полегание. Это также объясняет решение укорочения длины стебля, принятое для продовольственных культур с повышенной урожайностью зерна. Кроме того, эти формулы подчеркивают важность свойств материала. Например, легкие материалы (т. Е. Имеющие низкую насыпную плотность ρ) предпочтительнее тяжелых. Кроме того, кажущийся модуль упругости *E* подтверждено, что они играют большую роль в сопротивлении изгибу, поскольку тонкие растения должны развивать более жесткие стебли, чтобы предотвратить нестабильность. В заключение следует отметить, что для снижения уязвимости растений к изгибу требуется более высокая удельная жесткость (E/ρ) ([Niklas, 1993a](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B163)). Тем не менее, точные значения жесткости, специфичные для плотности, а также константа пропорциональности, трудно предсказать; конечно, они различаются между видами растений ([Niklas, 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B166)), но они также различаются в зависимости от развития и роста стебля ([Holbrook and Putz, 1989](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B114)).

В качестве дополнения к механической характеристике стеблей анатомический анализ представляет интерес для понимания полегания. [Ford et al. (1979)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B81) предположили, что твердые стебли некоторых сортов пшеницы, т. Е. заполненные сердцевиной, имеют большую кажущуюся жесткость, что повышает устойчивость к полеганию, чем сорта с полыми стеблями. Этот результат был продемонстрирован позже также [Leblicq et al. (2015)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B133) посредством механического анализа поведения при изгибе стеблей пшеницы; эти авторы продемонстрировали, что сопротивление изгибу стеблей сельскохозяйственных культур значительно увеличивается при наличии клеточного ядра меньшей плотности, чем внешняя часть стебля. Для риса также ткани низкой плотности, сравнимые с пеной, видимой во внутренней части стебля, благоприятны для устойчивости стебля к полеганию ([Gardiner et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B86)). В исследовании, проведенном в 1982 году, [Menoux et al. (1982)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B145) исследованы морфологические характеристики стеблей льна, а также культурные условия, влияющие на устойчивость к полеганию, на основе сравнения нескольких сортов. Авторы показали, что растения льна чувствительны к полеганию на стадии быстрого роста, от 15 см до F, но с наиболее критическим временем на F ([Menoux et al., 1982](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B145)). Эти авторы также продемонстрировали, что устойчивость к полеганию связана со скоростью удлинения на ранней стадии роста. Действительно, устойчивость к полеганию повышается у растений с медленным удлинением, т. Е. С короткой длиной междоузлия в базальных 18 см и низким отношением длины волокна к диаметру. Таким образом, все параметры, индуцирующие медленную скорость удлинения в начале роста растений, говорят в пользу устойчивости к полеганию. Таким образом, как известно, азот способствует росту растений и увеличивает урожайность ([Easson and Long, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B69); [Sultana, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B198)), довольно низкое содержание азота в почве, при условии обеспечения хорошего компромисса с выходом волокна, подходит для снижения риска полегания ([Dimmock et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B63)). Использование PGR также является широко распространенным решением, используемым фермерами для снижения риска полегания ([Hoffmann, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B113)); тем не менее, эта практика не согласуется с эволюцией в сторону более экологически чистого сельского хозяйства. Кроме того, достаточно низкая плотность посева подходит для снижения риска полегания, если не ставит под угрозу выход волокна ([Easson and Long, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B69)), особенно за счет увеличения диаметра связанного стебля, обеспечивающего лучшую стабильность стеблей. Что касается связи между свойствами стебля, содержанием волокна и устойчивостью к полеганию, [Дорст (1953)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B66) утверждает, что селекционеры могли бы найти благоприятное сочетание устойчивости к полеганию (или высокой прочности стебля) и содержания волокна, если бы эти два параметра рассматривались как независимые. В 2015 году исследование [Bourmaud et al. (2015)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B35) подчеркивает роль волокон в поддержке растения. В том же году была обнаружена корреляция между жесткостью стебля и жесткостью его волокон ([Gibaud et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B89)). Однако мало что известно о механизмах полегания льна, но разработка стратегий предотвращения этого явления требует понимания факторов, влияющих на уязвимость растений к полеганию.

Наконец, исходя из литературы, ожидается, что явление полегания льна будет связано с самим развитием растений, помимо метеорологических параметров, которые также влияют на эту картину. Фактически, полегание будет в значительной степени связано как с удлинением, так и с утолщением клеток, в частности волокон, и с вторичным ростом растения, а именно с ксилемной частью. Изменения в волокне, а также свойства ядра ксилемы будут представлять интерес как с анатомической, так и с механической точки зрения. Действительно, эти процессы определяли бы механическую жесткость стеблей, определяя отношение длины к диаметру волокон льна, а также их скорость заполнения и жесткость, а также определяя плотность и толщину ткани ксилемы. Следовательно, помимо выхода волокна, содержание ксилемы новых отобранных сортов также будет свойством растений, которое следует учитывать для более точной селекционной работы. Кроме того, одновременно с содержанием волокна в стебле механические свойства волокна могут быть релевантным параметром для селекционеров, чтобы улучшить устойчивость к полеганию; этот параметр тем более интересен, что его оптимизация была бы уместна для использования волокон льна в композитной области. Кроме того, исследования многочисленных видов растений сообщают об адаптивной реакции роста на внешние стимулы ([Jaffe, 1973](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B118); [Grace and Russell, 1977](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B103); [Biddington, 1986](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B30)); последние являются возможным подходом к пониманию гибкости, стабильности и общей биомеханики льна.

## Влияние культурных условий и окружающей среды на свойства стеблей и волокон льна

В настоящем разделе рассматривается влияние как культурных, так и экологических условий на растения с акцентом на случай льна. Это подразумевает несколько понятий, которые приводятся с соответствующими иллюстрациями на [рисунке 10](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F10) для лучшего понимания результирующих реакций растений.

**РИСУНОК 10**



**Рисунок 10.** Основные понятия, рассмотренные в этом разделе, с соответствующими примерами иллюстрации для льна. **А)** плотность посева. **(B)** Полог сельскохозяйственных культур. **(C)** Реакция на механический стимул (растения в поле видны на левом рисунке, тогда как они выращиваются в теплице на правом рисунке). **(D)** Гравитропный ответ. Письменное информированное согласие было получено от двух лиц на публикацию этого изображения.

### Норма высева и навес культуры

Количество соседних деревьев и их близость являются важными параметрами для отдельного дерева, растущего в лесу; конкуренция объясняет изменения в росте высоты и диаметра отдельных деревьев ([Biging and Dobbertin, 1995](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B31); [von Oheimb et al., 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B207)). Аналогично, развитие растений очень зависит от нормы высева, основного параметра, определяющего плотность растений в поле для технических культур. Действительно, условия выращивания, такие как интенсивность света, доступность воды и питательных веществ, а также механические проблемы сильно зависят от того, растет ли растение изолированно или в пологе ([Moulia et al., 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B157)). Например, высокая плотность посева льна, скорее всего, из-за конкуренции между видами растений, может уменьшить количество нежелательных сорняков на полях ([Stevenson and Wright, 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B196)); это интересный результат в направлении сокращения использования гербицидов. Таким образом, сокращение интервалов линий за счет увеличения плотности урожая было бы полезным таким образом. В настоящее время для зерновых культур и льна используется аналогичная технология посева в линию с помощью тех же типов сеялок, контролируя интервалы линий ([Summerscales et al., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B199)). Межстрочный интервал обычно составляет от 10 до 15 см, обычно 12,5 см для льна ([рис. 10А](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F10)), с расстоянием между двумя последовательными семенами около 0,5 см (определяется скоростью сверлильной машины), что приводит к примерно 0,3 см между двумя последовательными стеблями ([Couture et al., 2004a](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B56),[b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B57); [ARVALIS - Institut du végétal, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B13)).

Первые исследования в 80-х годах исследовали влияние нормы высева на результирующий рост растений льна ([Фаулер, 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B84); [Губбельс и Кенащук, 1989](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B106)). При обычной норме посева 1800 семян/м2диаметр растения средней высоты и урожайность соломы обычно составляют около 2,3 мм и 7 кг/га соответственно (Bourmaud et al.; 2015; Goudenhooft et al.; 2017). [Фаулер (1984)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B84) показал, что норма высева оказывает большое влияние на высоту растения (а именно, увеличение плотности посева уменьшает конечную высоту стебля). [Губбельс и Кенащук (1989)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B106) подтвержденный этот результат, если используется достаточно высокая норма высева (ниже 400 семян/м2, получается обратное явление, но такая норма высева в любом случае не подходит для промышленного выращивания). Влияние нормы высева, влияя на высоту стебля, логически влияет и на конечную длину трепаного волокна, т. Е. Эта самая высокая плотность посева привела к самой короткой длине трепаного волокна ([Bourmaud et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)). Кроме того, увеличение нормы высева уменьшает результирующий диаметр стебля; тем не менее, выход соломы и выход волокна улучшаются, так как увеличение растений на квадратный метр оказывает большее влияние на урожайность, чем уменьшение высоты растения ([Easson and Long, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B69); [Bourmaud et al.,2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)). Однако, несмотря на снижение высоты растения, высокие нормы высева отрицательно влияют на устойчивость растения к полеганию, а также на механические свойства волокон льна при наибольших нормах высева ([Easson and Long, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B69); [Bourmaud et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)). Кроме того, увеличение плотности посева уменьшает количество капсул и, следовательно, семян на растение ([Casa et al., 1999](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B42)). Таким образом, плотность посева, обеспечивающая компромисс между урожайностью (главным образом, выход волокна), свойствами волокна и устойчивостью к полеганию, является предпочтительной для выращивания льна, а именно,поощряется и широко используется норма высева около 1800 семян/м2, что приводит к примерно 1650-1750 растениям/м2 благодаря высокой G ставки ([Easson and Long, 1992](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B69); [Bourmaud et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B34)). Это приводит к относительно однородному и плотному пологу ([рис. 10B](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F10)). С другой стороны, конкуренция, испытываемая растением, более сложна, чем только зависимость от плотности посева. Плотность посева, пространственная структура посева и дата G действительно являются взаимодействующими факторами ([Fowler, 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B84)). Фактически, для обычной плотности посева время появления одного отдельного растения, связанного с соседними, имеет значительное значение для роста растений; первые появившиеся растения являются более крупными конкурентами и будут самыми высокими на всем протяжении их развития. Кроме того, они будут еще выше, тогда как поздние растения будут еще меньше, чем в случае растений, появившихся в один и тот же день ([Fowler, 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B84)). Кроме того, особая организация растений, такая как различное межстрочное расстояние, различное расположение вдоль линии бурения или перпендикулярно ранее упомянутому, или, как показано на примере различных рано появившихся и недавно появившихся растений, особые паттерны ([Fowler, 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B84)), будут влиять на конкуренцию растений и так далее.развитие растений. Для льна лучшим способом регулирования однородности появления растений является контроль глубины посева одновременных древостоев; а именно, глубина посева 2 см предварительно оптимизирована для однородного появления ([O'connor and Gusta, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B167); [Couture et al., 2004b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B57)). В меньшей степени подготовка семенного ложа, такая как прокатка почвы, особенно для более легких почв ([Couture et al., 2004b](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B57)) или использование средней консервативной обработки почвы для предотвращения эрозии почвы ([Lafond et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B129); [Couture et al., 2004a](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B56)), может быть дополнением к использованиюобычная глубина посева 2 см.

В случае относительно плотного и однородного полога, такого как лес или поле льна, взаимодействия между ветром и растениями (более конкретно, весь полог) представляют большой интерес, особенно в отношении полегания, вызванного ветром ([Berry et al., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B27)). Учитывая обычную норму посева, используемую для льна, и рекомендации по посеву, упомянутые выше, льняное поле может быть ассимилировано до плотной и однородной непрерывной структуры навеса. В следующем разделе кратко рассматриваются взаимодействия между ветром и навесами сельскохозяйственных культур [исключая разреженные поля, т. Е. Расстояние между растениями находится в диапазоне высоты растений или более ([Raupach et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B181)), что не относится к льну], чтобы исследовать влияние вызванных ветром движений наполегание льна.

### Вызванные ветром движения навесов сельскохозяйственных культур

На первый взгляд ветер виден как волны над верхним слоем поля сельскохозяйственных культур ([рис.11](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F11)), как и в случае льна или пшеницы; это волнообразное движение растений было впервые названо *хонами* [Иноуэ (1955)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B117) в исследовании рисовых полей. Несмотря на то, что воздействие ветра на растения является предметом многих исследований по широкому спектру видов растений ([Crook and Ennos, 1994](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B59); [Berry et al., 2003c](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B25), [2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B26)), мало что известно о конкретном случае льна. Тем не менее, считается, что взаимодействие между ветром и навесами сельскохозяйственных культур справедливо и для полога льна.

**РИСУНОК 11**



**Рисунок 11.** Растения льна, движущиеся на ветру в волнообразном движении. Волна видна, когда она наклоняется над растениями, когда она проходит.

Основываясь на литературе, стебли растений представляют собой очень легкие и гибкие структуры, которые обычно моделируются как изолированные элементарные колеблющиеся стержни ([Finnigan, 1979](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B79), [2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B78)). Эти растения, ассимилированные в виде стержней, имеют естественную резонансную частоту, на которой они колеблются ([Farquhar et al., 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B76)). Наконец, движение растения определяется несколькими параметрами растения, а именно его собственной резонансной частотой, изгибной жесткостью и модальной массой, эталонным демпфированием и формой модального смещения ([de Langre, 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B61)). Однако внутри полога растения не индивидуализированы, но их свойства и взаимодействия можно рассматривать как характеристики полога; следовательно, полог может быть смоделирован как дискретный набор колеблющихся идентичных стержней ([Farquhar et al., 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B76); [Doaré et al., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B64); [de Langre,2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B61)). Короче говоря, движение полога описывается колебаниями набора стеблей вдоль вертикального ряда. Дополнительным образом среднее расстояние между растениями является параметром, который следует учитывать при моделировании связи между растениями ([Py et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B176)) таким образом, были оценены эффекты упругих контактов между соседними культурами вдоль ряда; было обнаружено, что столкновения увеличивают резонансную частоту отдельных растений, обеспечивая дополнительную поддержку стеблям ([Doaré et al., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B64)). Движения культур в пологе, вызванные ветром, затем описываются в литературе в отношении характеристик ветра. В отсутствие растений горизонтальное распределение средней скорости ветра логарифмично, увеличивается с высотой и существует в виде так называемого потока пограничного слоя ([Finnigan, 2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B78); [de Langre, 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B61)). И наоборот, в навесе ветер, который наклоняется над растениями, когда он проходит, возникает как поток внутри внутреннего пограничного слоя, также называемого слоем навеса; затем он связан с потоком внешнего пограничного слоя над навесом. Однако слой навеса демонстрирует большие различия в характеристиках турбулентности по сравнению с пограничным слоем из-за перегиба в профиле средней скорости ветра, причем этот перегиб становится еще больше при порывистых событиях ([Finnigan, 2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B78); [de Langre, 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B61)). Различия между двумя потоками создают зону турбулентности вблизи вершины навеса; эта зона называется плоским слоем смешения, и турбулентность ассимилируется с неустойчивостями Кельвина–Гельмгольца ([Raupach et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B181)). Тем не менее, необходимо исследовать влияние на потоки присутствия точки привязки на растениях, составляющих такой полог. Турбулентность, возникающая в слое смешения, тем не менее, не случайна, с основным вкладом турбулентных движений, приходящих от когерентных вихрей масштаба высоты полога ([Raupach et al., 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B181)). Действительно, растения колеблются на своей общей собственной частоте с различной малой фазой между соседними растениями, когда они слегка защищены от порыва ветра, что приводит к впечатлению волн хонами, движущихся по полю ([Finnigan, 1979](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B79)). Когда частота порывов достигает собственной частоты растений, резонансное взаимодействие приводит к более выраженному колыханию и более сильному *хонами*, что может привести к повреждению урожая, такому как полегание ([Finnigan, 1979](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B79)).

Этот библиографический синтез позволяет выделить несколько элементов мысли, связанных с развитием и стабильностью льна. Продемонстрирована связь между жесткостью стебля, индуцированным движением и устойчивостью к полеганию. Таким образом, измерение жесткости стебля может быть хорошим показателем устойчивости к полеганию, поскольку оно непосредственно влияет на резонансную частоту. Кроме того, из-за геометрии сеялок расстояния между стеблями очень различны в зависимости от рассматриваемой оси. Таким образом, ход посева может быть адаптирован в соответствии с основным направлением ветра, как, например, в случае приморских культур. Стандартизация плотности урожая позволит снизить вероятность достижения резонансной частоты ствола во время суровых погодных явлений. Наконец, интересно, что наличие гибкой зоны между вершиной растения и точкой привязки во время роста стебля льна может изменить турбулентность, вызванную ветром в верхней части полога, и почему бы не создать переходный режим, более благоприятный для стабильности растения. Поэтому наличие точки привязки на собственной частоте и движение растений были бы интересными параметрами для исследования. Кроме того, вызванное ветром движение не обязательно оказывает негативное влияние на урожайность. Это действительно может влиять на рост растений и распределение биомассы, явления, которые будут обсуждаться в следующем разделе.

### Тропизмы и реакции растений

Живые растения обладают способностью реагировать на широкий спектр изменений в окружающей среде, и они могут регулировать свои модели роста в соответствии со стимулами. Реакция роста, включающая активное движение из-за стимула, называется тропизмом, происходящим от греческого слова *trepein,* означающего “менять направление” ([Moulia, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B153)); тропизм может быть либо положительным (реакция на стимул), либо отрицательным (реакция от стимула) ([Evert andEichorn, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B74)). Основные тропизмы растений и их последствия для характеристик растений подробно описаны ниже.

#### Тиг-и сейсмотропизм

Движение растения, вызванное механическим стимулом, часто определяется двумя различными тропизмами, а именно: тиг-тропизмом (от греческого слова *thigma*, означающего “прикосновение”) и сейсмот-тропизмом (от греческого слова *seismos*, означающего “дрожание”) ([Hart, 1990](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B108)). Действительно, механически индуцированный стресс может быть результатом либо прямого контакта, такого как прохождение животных или искусственное трение растения, либо нетактильного стресса, такого как воздействие ветра или искусственная вентиляция ([Biddington, 1986](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B30)). В первом случае реакция растений называется тиг-морфогенезом ([Jaffe, 1973](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B118)) и в последнем случае его часто называют сейсмоморфогенезом ([Mitchell, 1975](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B149)); тем не менее, термин тиг-морфогенез также можно найти для описания реакции растений на ветер ([Moulia, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B153); [Gardiner et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B86)). Однако эта классическая классификация по контактному или нетактильному происхождению механического напряжения довольно запутанна, поскольку она также может переплетать оба тропизма (например, контакт между колеблющимися соседними растениями может быть вызван ветром, как ранее упоминалось в разделе “Норма высева и навес культуры”). таким образом, реакция роста, индуцированная механическим стимулом, была бы названа механосенсором или механоперцепцией ([Coutand, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B53); [Hamant, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B107); [Moulia et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B155)). Такие ответы являются предметом многих работ, но мало что известно об особом случае льна. Вообще говоря, механические стимулы оказывают большое влияние на размер и форму травянистых растений и деревьев, а также на механические свойства их конститутивных тканей. Первым примером является широко распространенное снижение высоты растений, часто сопровождающееся большим радиальным ростом растений, подверженных механическому стрессу во многих навесах как травянистых, так и древесных растений ([рис. 10С](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F10)) ([Mitchell, 1975](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B149); [Biddington, 1986](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B30); [Niklas, 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B161); [Moulia and Combes, 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B154)). Это снижение высоты растения согласуется со снижением риска изгиба стебля и эффективным профилем навеса для ветра, т. Е. Растения разрабатывают стратегию минимизации воздействия на безопасность ([Hamant, 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B107); [Badel et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B15)). Однако укорочение, вызванное механическим возмущением, не обязательно является принятой стратегией, так как, например, растения пшеницы не проявляют значительных изменений высоты стебля под влиянием ветра ([Crook and Ennos, 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B58)). Аналогично, увеличение диаметра растений, хотя и очень распространенное, не является фундаментальным правилом; действительно, некоторые травянистые растения не имеют значительных изменений диаметра стебля, несмотря на постоянные механические стимулы ([Goodman and Ennos, 1996](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B90); [Smith and Ennos, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B192); [Paul-Victor and Rowe, 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B170)), тогда какиногда можно наблюдать уменьшение диаметра деревьев, подверженных воздействию ветра ([Cordero, 1999](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B50)). Таким образом, реакция растений на механический стимул может привести к изменениям скорости развития в зависимости от вида, плотности урожая, типа механической нагрузки, стадии роста, формы роста (первичной или вторичной), истории жизни растений и т.д., Что иллюстрирует сложность прогнозирования реакции растений([Smith and Ennos, 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B192); [Paul-Victor and Rowe, 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B170); [Gardiner et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B86)). Что касается анатомии растений, изменения в геометрии и конфигурации конститутивной ткани также могут быть вызваны механическими стимулами. Изменения геометрии ткани могут включать модификацию формы и толщины клеток, тогда как изменения конфигурации ткани состоят из модификации МФА целлюлозы, расположения слоев клеточных стенок, а также перераспределения биомассы в поперечном сечении. Как упоминалось ранее, во всем морфологическом масштабе растения нет фундаментального правила для описания реакции растения на механическое возмущение в масштабе клетки. Тем не менее, [Gardiner et al. (2016)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B86) зарегистрированы основные изменения растений, вызванные ветровой нагрузкой в разных масштабах, для недревесных и древесных растений соответственно. Основываясь на этом последнем обзоре, [в таблице 3](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#T3) перечислены основные изменения, которые могут быть наиболее применимы к льну. С точки зрения изменений механических свойств растений, подвергнутых механическому возмущению, [Jaffe and Forbes (1993)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B119) зарегистрированы два типа реакций: повышение упругой упругости и усиление изгибной жесткости. Эти два противоположных типа биомеханических реакций позволяют растениям достичь лучшей устойчивости к механическим повреждениям; действительно, повышение эластичности [как это имеет место для бобовых растений *Phaseolus vulgaris* ([Jaffe et al., 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B121)) или *Arabidopsis thaliana* ([Paul-Victor and Rowe, 2011](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B170))] позволяет растениямоставаться в пределах их эластичности при больших нагрузках, чем нестимулированные, при одновременном повышении изгибной жесткости [как стебли томата *Lycopersicon esculentum* ([Coutand et al., 2000](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B55)) или сосны Pinus taeda ([Telewski and Jaffe, 1986](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B200))] позволяет избежать превышения предела деформации.

**ТАБЛИЦА 3**



**Таблица 3.** Возможная акклиматизация растений льна в результате механического стресса.

Морфологические, анатомические и механические изменения, вызванные механическими возмущениями, управляются треугольником компромисса, т. Е. Структура и функции растений являются естественным компромиссом между механической прочностью, необходимой для противостояния возмущению, с проводящей эффективностью и устойчивостью к эмболии ([Badel et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B15)). Таким образом, сортовой отбор, направленный на оптимизацию механических свойств льна, может привести к неоптимальным характеристикам в одной из двух других точек треугольника ([Lachenbruch and Mcculloh, 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B127); [Badel et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B15)). Интересно, что, когда растения подвергаются механическому стимулу, они становятся сильнее к механическому разрушению последующими механическими возмущениями и демонстрируют адаптивное преимущество, становясь менее восприимчивыми к травмам, чем контролируемые растения ([Jaffe and Telewski, 1984](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B120)). Если растения способны адаптироваться к естественным механическим возмущениям, они также делают это по отношению к искусственным домогательствам. Наконец, если мало известно о влиянии механического стимула на лен, было бы интересно исследовать, может ли он влиять на устойчивость льна к полеганию, а также на механические свойства волокон льна с точки зрения оптимизации их применения в композиционных материалах.

#### Гравитропизм

Другим тропизмом, хорошо описанным в литературе, является гравитропизм, реакция растений на гравитацию. На самом деле, гравитропизм и тиг-морфогенез сложно распутать; механосенсинг (лучше изученный в гравитропных реакциях) участвует в обоих тропизмах, и их соответствующее участие, например, когда органы испытывают изгиб, трудно определить ([Coutand, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B53); [Gardiner et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B86)). Гравитропизм очень важен для сельского хозяйства, поскольку он обеспечивает возвращение некоторых культур после полегания ([Chen et al., 1999](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B46)). В случае полегания стебля, вызывающего гравитропный стимул, гравитропным ответом растений является искривление стебля; в конце гравитропной реакции стебель обычно прямой ([Coutand, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B53)) ([рис.10D](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#F10)).

Гравитропизм объясняется способностью растений воспринимать наклон на первом этапе ([Chauvet et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B45)). Эта способность растений, называемая далее грависенсингом, особенно изучается в случае различных травянистых покрытосеменных растений ([Chauvet et al., 2016](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B45)), а также древесных ([Gerttula et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B88)). Поскольку гравизенсинг является очень сложным механизмом, изученным в нескольких подробных статьях ([Muday, 2001](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B158); [Coutand et al., 2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B54); [Bastien et al., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B19); [Gerttula et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B88)) но в настоящей работе даны только краткие общие пояснения. В нескольких словах, гравизенсинг происходит путем восприятия наклона через седиментацию в направлении силы тяжести специализированных заполненных крахмалом амилопластов, называемых статолитами ([Sack, 1997](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B189)). В стеблях последние встречаются в специализированных грависенсорных клетках, называемых статоцитами ([Sack, 1997](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B189)), расположенных во внутреннем слое клеток эндодермы коры головного мозга ([Fukaki et al., 1998](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B85); [Hoson et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B115); [Gerttula et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B88)), а также во вторичных клетках флоэмы стеблейпроявлением более обширного вторичного роста ([Gerttula et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B88)). Осаждение статолитов индуцирует биохимический сигнал, модифицирующий движения ионов кальция, который затем запускает полярный транспорт и распределение ауксина ([Hoson et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B115); [Coutand, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B53)). Ауксин является основным гормоном, участвующим в тропизме растений ([Morita, 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B151)), но этилен ([Andersson-Gunnerås et al., 2003](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B10)) и гиббереллиновая кислота ([Mauriat and Moritz, 2009](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B138)), скорее всего, также участвуют в грависенсорном сигнале древесных покрытосеменных растений; однако взаимодействие между этими гормонами все еще требует дальнейшего понимания. Изменения в транспорте и распределении ауксина в конечном итоге приводят к искривлению стебля вверх. Тем не менее, связанные с ауксином изменения различаются, если рассматривать травянистые или древесные покрытосеменные растения, более конкретно между стеблями, претерпевающими первичный рост или вторичный рост. Фактически, изменения, связанные с распределением ауксина, приводят к двум различным типам гравитропных двигателей, вызывающих изгиб стебля.

В первом случае, если стебель подвергается первичному росту, гравитропным двигателем является дифференциальный рост удлинения ([Cosgrove, 1997](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B51)). Согласно гипотезе “Холодный-Гоу” ([Gone, 1974](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B208)) ауксин транспортируется латерально к нижней стороне стебля. Он создает градиент ауксина между верхней и нижней сторонами стебля, вызывая увеличение роста удлинения на нижней стороне. Этот градиент приводит к “выталкиванию” растительного органа вверх, то есть изгибу стебля в вертикальное положение. У удлиненных стеблей это изгибание вверх является реакцией вдоль всего растущего органа; оно начинается с вершины, которая затем становится прямой, сначала изгибаясь, а выпрямление постепенно перемещается вниз вдоль удлиненного стебля ([Bastien et al., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B19)). Наконец, оставшаяся кривизна видна у основания удлиненной зоны роста ([Bastien et al., 2013](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B19)). На самом деле грависенсинг сопровождается ощущением локальной кривизны, так называемой проприоцепцией, которая позволяет контролировать аутотропный ответ выпрямления и контроль позы ([Moulia et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B156)).

Во втором случае, если стебель подвергается вторичному росту, т. Е. В областях стебля, где удлинение завершено, но где радиальный рост происходит из-за активного камбия, искривление стебля происходит за счет асимметричной генерации специализированной ксилемной ткани, называемой реакционной древесиной ([Alméras and Fournier, 2009](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B7)). У древесных покрытосеменных реакционная древесина более конкретно называется натяжной древесиной, тогда как ксилема, образованная напротив реакционной древесины, называется противоположной древесиной ([Clair et al., 2005](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B49); [Coutand et al., 2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B54)). Еще раз ауксин обозначен в происхождении дифференциального камбиального роста древесных растений ([Kennedy and Farrar, 1965](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B125); [Forest et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B82)). Действительно, ауксин распределяется по направлению к камбию и центру стебля на верхней стороне стебля и вызывает образование древесины напряжения; и наоборот, ауксин транспортируется от камбия к периферии стебля на нижней стороне стебля и вызывает противоположное образование древесины ([Gerttula et al., 2015](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B88)). Несмотря на то, что подтверждено, что натяжная древесина способна генерировать высокие напряжения при растяжении, перемещающие растение вверх ([Fisher and Stevenson, 1981](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B80); [Fang et al., 2008](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B75); [Mellerowicz and Gorshkova, 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B144)), механизм, связывающий генерацию стресса с гравитропизмом, является предметом многих разногласий между авторами. Фактически, сходство между противоположной древесиной и нормальной древесиной, а также по составу и организации напряженной древесины явно принято. Кроме того, этот последний тип древесины характеризуется специфическим G-слоем, имеющим высокое содержание целлюлозы, с высококристаллическими микрофибриллами целлюлозы, проявляющими MFA, близкое к 0°, в матрице свободного лигнина, состоящей из нецеллюлозных полисахаридов и гликозилированных белков ([Lafarguette et al., 2004](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B128); [Mellerowicz and Gorshkova, 2012](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B144); [Chang et al., 2014](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B44)). Кроме того, было продемонстрировано, что растягивающее напряжение в растянутой древесине возникает в результате натяжения целлюлозных микрофибрилл G-слоя ([Clair et al., 2006](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B48)). Происхождение напряжений в целлюлозных микрофибриллах, тем не менее, не известно с уверенностью, и различные гипотезы были рассмотрены [Alméras and Clair (2016)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B6).

Однако, даже если генерация напряженной древесины по существу является характеристикой древесных растений, недавние исследования подчеркнули ее присутствие в травянистых стеблях *Arabidopsis thaliana* ([Wyatt et al., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B211)), люцерны (*Medicago* sativa L.) ([Patten et al., 2007](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B169)) и льна ([Ibragimova et al.,2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116)). Эти результаты интересно подтверждают способность некоторых травянистых покрытосеменных растений генерировать натяжные ткани, каким-то образом аналогичные натяжной древесине древесных покрытосеменных растений. Изучение гравитропизма льна представляет большой интерес, поскольку это растение естественным образом проявляет волокна с G-слоем при нормальном росте растений, а именно первичные волокна льна. Кроме того, ксилема льна, проявляющая G-слой, может быть продуцирована как гравитропный ответ на верхней стороне стебля ([Ibragimova et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116)). Это исследование [Ibragimova et al. (2017)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116) демонстрирует, что оставшаяся кривизна возникает в части стебля, которая уже прекратила удлинение волокна (намного ниже точки защелки). Однако утолщение волокна, все еще обрабатываемое на этом уровне, зависит от гравитропного отклика. Поскольку ни удлинение клеток, ни дифференцировка камбия не участвуют в реакции волокна, [Ибрагимова и др. (2017)](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116) предполагают, что часть этой гравитропной реакции фактически происходит внутри самой клеточной стенки волокна. Действительно, при сравнении волокон контрольных растений и волокон с противоположной стороны стебля значительное увеличение диаметра волокна получается на вытягивающей стороне (стороне, где происходит реакция древесины в ксилемной части); кроме того, доля площади просвета от площади волокна значительно увеличивается в волокнахподвергнуты гравитропизму с обеих сторон стебля с гораздо большим увеличением на стороне вытягивания. И последнее, но не менее важное: форма волокон по их длине сильно модифицирована, поскольку волокна проявляют “колбасообразную” форму с отложением каллозы, полисахарида, обычно присутствующего в поврежденных клеточных стенках ([Снегирева и др., 2010](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B194)), в зонах истончения волокон. Наконец, на МФА также влияет гравитропная реакция, влияющая на характеристики G-слоя ([Ibragimova et al., 2017](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full#B116)). Таким образом, даже если мало известно о влиянии гравитропизма на механические свойства волокон и стеблей льна, изменения утолщения и морфологии волокон, скорее всего, повлияют на механические свойства волокон и их однородность. Несмотря на то, что растения льна способны восстанавливаться после полегания через гравитропную реакцию, полегание стебля, происходящее во время раннего процесса утолщения, поставит под угрозу механические свойства волокон, влияя на этот процесс развития. Это делает полегание еще более нежелательным явлением как с точки зрения фермера (за счет снижения выхода волокна), так и со стороны производителя композита (за счет влияния на свойства волокна). Если полегание появляется ближе к FM, волокна уже хорошо утолщены; в этом случае негативное прямое влияние на свойства волокон будет ограничено, но все равно будет связано с большей восприимчивостью к болезням и проблемам с уборкой урожая. В этой последней ситуации гравитропный ответ, вероятно, будет в основном зависеть от ксилемной натяжной древесины, еще раз демонстрируя существенную роль этой ткани в характеристиках льна.

## Заключение

Лен является одним из старейших растений, культивируемых человечеством, в основном из-за волокон, содержащихся в его стебле. Волокна льна всегда предназначались для текстильного производства, включая одежду и обивку мебели. Кроме того, за последние десятилетия появилось более современное применение, а именно использование волокон льна для композитного армирования. Стадии роста этого растения достаточно хорошо описаны в литературе, вероятно, благодаря промышленному потенциалу волокон льна. Процессы развития волокон, от инициации до утолщения, являются предметом нескольких исследований, главным образом из-за необычных свойств волокон льна, морфологически говоря, но также и из-за замечательного G-слоя, составляющего большую часть клеточной стенки. Лен, будучи однолетним травянистым растением, обеспечивающим волокна, демонстрирующие толстый G-слой, подобный напряженной древесине, а также значительное количество ксилемы, собирает очень многообещающие характеристики для понимания механизмов реакции растений на широкий спектр культурных условий и внешних раздражителей. Тем не менее, остается трудно найти общие средние данные о составе льняного волокна как в онтогенезе растений, так и при FM. Это частично объясняется многочисленными существующими сортами льна и невоспроизводимыми метеорологическими условиями между регионами и годами, вызывающими большую изменчивость состава, а также многими протоколами, которым следуют авторы. Кроме того, если метеорологические условия трудно поддаются контролю, влияние сорта на состав и характеристики волокна представляет больший интерес, поскольку оно опирается на освоенный опыт сортовой селекции. Последнее успешно отобрало сорта льна, демонстрирующие высокую урожайность волокна, хорошую устойчивость к болезням и достойную устойчивость к полеганию, обеспечивая при этом, чтобы характеристики растений (высота и диаметр) оставались адаптированными к существующей сельскохозяйственной технике и трепальным машинам. Таким образом, можно обоснованно ожидать эффективной селекционной работы по разработке новых сортов льна, предназначенных для технического применения. Этот инновационный подход будет сочетаться с исследованиями, изучающими адаптацию растений льна и механизмы армирования в естественных или экспериментальных условиях, включая дополнительный интерес к вкладу ксилемы в механизмы льна. В большей степени такие исследования также дали бы пищу для размышлений об адаптации льна к текущим изменениям климата, включая глобальное потепление, с целью сохранения выращивания этой выдающейся технической культуры.

## Номенклатура

*D*-диаметр стебля (м); *E*-кажущийся модуль упругости (Н/м2); *GDDn*-кумулятивная степень роста-день в день *n* (°C); *H*-высота колонны (м); *Hcrit*-критическая высота изгиба (м); *I*-второй момент инерции (m4); *K*-константа пропорциональности; *Pcrit*-критическая нагрузка на изгиб (N); ρ-насыпная плотность материала (N m-3); *Tbase*-температура основания льна 5°C (°C); *Tmax, i*-максимальная суточная температура(при *i* равно 1 в день посева) (°C); *Tmin,I*, Минимальная суточная температура в день *i* (при *i* равно 1 в день посева) (°C).

## Доступность данных

Для этого исследования не было создано наборов данных.

## Вклад авторов

AB и CB задумали тему обзора. CG организовал и написал рукопись. AB и CB рассмотрели рукопись. Все авторы одобрили рукопись.

**Заявление о конфликте интересов**

Авторы заявляют, что исследование проводилось в отсутствие каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

**Благодарности**

Авторы хотели бы поблагодарить Жан-Поля Труве (Terre de Lin), а также Пьера Д'Арраса (Scutching Center Van Robaeys Frères) за плодотворные дискуссии. Авторы также сердечно благодарят Николь Брунель-Мишак (INRA Clermont-Ferrand) за подготовку образцов и предоставление изображений поперечных сечений стебля льна и Дэвида Синискалько (IRDL) за его техническую поддержку в измерениях АСМ. Авторы выражают благодарность OSEO и Министерству высшего образования и исследований Франции за финансовую поддержку. Наконец, авторы любезно благодарят Хлою Жоли (IRDL), которая отредактировала английский стиль и грамматику.

**Сокращения**

АСМ, атомно-силовая микроскопия; F, цветение; Fi, число нитей I поколения; FM, зрелость волокон; G, прорастание; G-слой, студенистый слой; Gn-слой, новосажденный студенистый слой; L, просвет; MFA, угол микрофибрилляции; ML, средние пластинки; Pi,родительский номер I; PW-первичная клеточная стенка; RG I-зарождающийся рамногалактуронан; S-старение; S1-первый слой вторичной стенки; S2-второй слой вторичной стенки; S3-третий слой вторичной стенки; SF-образование семян; SM-зрелость семян; SW-вторичная стенка; ТГК, дельта-9-тетрагидроканнабинол; ВС, вегетативная стадия.

**Список литературы**

Агеева М. В., Петровска Б., Кифт Х., Сальников В. В., Снегирева А. В., Ван Дам Дж. Интрузивный рост волокон флоэмы льна имеет интеркалярный тип. *Planta* 222, 565–574. doi: 10.1007/s00425-005-1536-2

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16215710) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s00425-005-1536-2) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Intrusive+growth+of+flax+phloem+fibers+is+of+intercalary+type%2E&journal=Planta&author=Ageeva+M.+V.&author=Petrovsk%C3%A1+B.&author=Kieft+H.&author=Sal%E2%80%99nikov+V.+V.&author=Snegireva+A.+V.&author=Van+Dam+J.+E.+G.&publication_year=2005&volume=222&pages=565-574)

Åkesson, D., Skrifvars, M., Seppälä, J., and Turunen, M. (2011). Термореактивная смола на основе молочной кислоты в качестве матрицы для волокон льна. *J. Appl. Polym. Sci.* 119, 3004-3009. doi: 10.1002/app.33030

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1002/app.33030)

Aldaba, V. C. (1927). Структура и развитие клеточной стенки у растений I. Лубяные волокна Boehmeria и Linum. *Am. J. Bot.* 14, 16-24. doi: 10.2307/2435518

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2307/2435518) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+structure+and+development+of+the+cell+wall+in+plants+I%2E+Bast+fibers+of+Boehmeria+and+Linum%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Aldaba+V.+C.&publication_year=1927&volume=14&pages=16-24)

Alix, S., Goimard, J., Morvan, C., Baley, C., Schols, H. A., Visser, R. G. F., et al. (2009). “Влияние пектиновой структуры на механические свойства льняных волокон: сравнение между льняно-зимним сортом (Oliver) и волокнисто-весенним сортом льна”, в *Pectins and Pectinases*, eds H. A. Schols, R. G. F. Visser и A. G. J. Voragen (Wageningen: Wageningen Academic Publishers), 85-96. doi: 10.3920/978-90-8686-677-9

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3920/978-90-8686-677-9)

Allaby, R. G., Peterson, G. W., Merriwether, D. A., and Fu, Y. B. (2005). Доказательства истории одомашнивания льна (*Linum usitatissimum* L.) из генетического разнообразия локуса sad2. *Теор. Приложение. Genet.*112, 58-65. doi: 10.1007/s00122-005-0103-3

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16215731) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s00122-005-0103-3) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Evidence+of+the+domestication+history+of+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+from+genetic+diversity+of+the+sad2+locus%2E&journal=Theor%2E++Appl%2E++Genet%2E&author=Allaby+R.+G.&author=Peterson+G.+W.&author=Merriwether+D.+A.&author=and+Fu+Y.+B.&publication_year=2005&volume=112&pages=58-65)

Alméras, T., and Clair, B. (2016). Критический обзор механизмов генерации стресса созревания в деревьях. *J. R. Soc. Интерфейс* 13, 20160550. doi: 10.1098/rsif.2016.0550

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=27605169) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0550) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Critical+review+on+the+mechanisms+of+maturation+stress+generation+in+trees%2E&journal=J%2E+R%2E+Soc%2E+Interface&author=Alm%C3%A9ras+T.&author=and+Clair+B.&publication_year=2016&volume=13&issue=20160550)

Alméras, T., and Fournier, M. (2009). Биомеханический дизайн и долгосрочная стабильность деревьев: морфологические и древесные признаки, участвующие в балансе между увеличением веса и гравитропной реакцией. *J. Теор. Биол.*256, 370-381. doi: 10.1016/j.jtbi.2008.10.011

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=19013473) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.10.011) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Biomechanical+design+and+long-term+stability+of+trees%3A+morphological+and+wood+traits+involved+in+the+balance+between+weight+increase+and+the+gravitropic+reaction%2E&journal=J%2E+Theor%2E+Biol%2E&author=Alm%C3%A9ras+T.&author=and+Fournier+M.&publication_year=2009&volume=256&pages=370-381)

Andème-Onzighi, C., Girault, R., His, I., Morvan, C., and Driouich, A. (2000). Иммуноцитохимическая характеристика рано развивающихся клеточных стенок льняного волокна. *Протоплазма* 213, 235-245. doi: 10.1007/BF01282161

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/BF01282161) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Immunocytochemical+characterization+of+early-developing+flax+fiber+cell+walls%2E&journal=Protoplasma&author=And%C3%A8me-Onzighi+C.&author=Girault+R.&author=His+I.&author=Morvan+C.&author=and+Driouich+A.&publication_year=2000&volume=213&pages=235-245)

Anderson, D. B. (1927). Микрохимическое исследование структуры и развития волокон льна. *Am. J. Bot* 14, 187-211. doi: 10.1002/j.1537-2197.1927.tb04836.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1927.tb04836.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+microchemical+study+of+the+structure+and+development+of+flax+fibers%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot&author=Anderson+D.++B.&publication_year=1927&volume=14&pages=187-211)

Andersson-Gunnerås, S., Hellgren, J. M., Björklund, S., Regan, S., Moritz, T., and Sundberg, B. (2003). Асимметричная экспрессия ACC-оксидазы тополя контролирует выработку этилена во время гравитационной индукции натяжения древесины. *Plant J.* 34, 339-349. doi: 10.1046/j.1365-313X.2003.01727.x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=12713540) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01727.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Asymmetric+expression+of+a+poplar+ACC+oxidase+controls+ethylene+production+during+gravitational+induction+of+tension+wood%2E&journal=Plant+J%2E&author=Andersson-Gunner%C3%A5s+S.&author=Hellgren+J.+M.&author=Bj%C3%B6rklund+S.&author=Regan+S.&author=Moritz+T.&author=and+Sundberg+B.&publication_year=2003&volume=34&pages=339-349)

Arber, A. (2012). *Естественная философия формы растений.* Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781139177290

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/CBO9781139177290) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+Natural+Philosophy+of+Plant+Form%2E&author=Arber+A.&publication_year=2012)

Arnould, O., Siniscalco, D., Bourmaud, A., Le Duigou, A., and Baley, C. (2017). Лучшее понимание наномеханических свойств клеточных стенок льняного волокна. *Ind. CROPSPP.* 97, 224-228. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.12.020

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.020) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Better+insight+into+the+nano-mechanical+properties+of+flax+fibre+cell+walls%2E&journal=Ind%2E+CropsP+rod%2E&author=Arnould+O.&author=Siniscalco+D.&author=Bourmaud+A.&author=Le+Duigou+A.&author=and+Baley+C.&publication_year=2017&volume=97&pages=224-228)

ARVALIS - Institut du végétal. (2014). *Choisir et décider lin fibre.* Paris: ARVALIS - Institut du végétal.

ARVALIS - Institut du végétal. (2016). *Lin fibre - Résultats et préconisations.* Paris: ARVALIS - Institut du végétal.

Badel, E., Ewers, F. W., Cochard, H., and Telewski, F. W. (2015). Акклиматизация механических и гидравлических функций деревьев: влияние тиг-морфогенетического процесса. *Спереди. Plant Sci.* 6:266. doi: 10.3389/fpls.2015.00266

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=25954292) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00266) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Acclimation+of+mechanical+and+hydraulic+functions+in+trees%3A+impact+of+the+thigmomorphogenetic+process%2E&journal=Front%2E++Plant+Sci%2E&author=Badel+E.&author=Ewers+F.++W.&author=Cochard+H.&author=and+Telewski+F.++W.&publication_year=2015)

Baley, C., and Bourmaud, A. (2014). Средние свойства растяжения французских элементарных волокон льна. *Матер. Lett.* 122, 159-161. doi: 10.1016/j.matlet.2014.02.030

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.02.030) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Average+tensile+properties+of+French+elementary+flax+fibers%2E&journal=Mater%2E++Lett%2E&author=Baley+C.&author=and+Bourmaud+A.&publication_year=2014&volume=122&pages=159-161)

Baley, C., Goudenhooft, C., Gibaud, M., and Bourmaud, A. (2018). Стебли льна: от специфической архитектуры к поучительной модели для биоинспирированных композитных структур. *Биоинспир. Biomim.* 13, 26007. doi: 10.1088/1748-3190/aaa6b7

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=29319533) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa6b7) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax+stems%3A+from+a+specific+architecture+to+an+instructive+model+for+bioinspired+composite+structures%2E&journal=Bioinspir%2E++Biomim%2E&author=Baley+C.&author=Goudenhooft+C.&author=Gibaud+M.&author=and+Bourmaud+A.&publication_year=2018&volume=13&issue=26007)

Barnett, J. R., and Bonham, V. A. (2004). Угол микрофибрилл целлюлозы в клеточной стенке древесных волокон. *Biol. Rev*. 79, 461-472. doi: 10.1017/S146479 3103006377

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/S1464793103006377) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cellulose+microfibril+angle+in+the+cell+wall+of+wood+fibres%2E&journal=Biol%2E++Rev%2E&author=Barnett+J.++R.&author=and+Bonham+V.++A.&publication_year=2004&volume=79&pages=461-472)

Бастьен Р., Бор Т., Мулиа Б., Дуади С. (2013). Унифицирующая модель гравитропизма побегов раскрывает проприоцепцию как центральную особенность контроля позы у растений. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 755-760. doi: 10.1073/pnas.1214301109

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=23236182) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1073/pnas.1214301109) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Unifying+model+of+shoot+gravitropism+reveals+proprioception+as+a+central+feature+of+posture+control+in+plants%2E&journal=Proc%2E+Natl%2E+Acad%2E+Sci%2E+U%2ES%2EA%2E&author=Bastien+R.&author=Bohr+T.&author=Moulia+B.&author=and+Douady+S.&publication_year=2013&volume=110&pages=755-760)

Bensadoun, F., Verpoest, I., Baets, J., Müssig, J., Graupner, N., Davies, P., et al. (2017). Испытание пропитанного пучка волокон для натуральных волокон, используемых в композитах. *J. Reinf. Пласт. Compos* 36, 942-957. doi: 10.1177/0731684417695461

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1177/0731684417695461) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Impregnated+fibre+bundle+test+for+natural+fibres+used+in+composites%2E&journal=J%2E++Reinf%2E++Plast%2E++Compos&author=Bensadoun+F.&author=Verpoest+I.&author=Baets+J.&author=M%C3%BCssig+J.&author=Graupner+N.&author=Davies+P.&publication_year=2017&volume=36&pages=942-957)

Bergfjord, C., and Holst, B. (2010). Процедура идентификации текстильных лубяных волокон с помощью микроскопии: лен, крапива/рами, конопля и джут. *Ультрамикроскопия* 110, 1192-1197. doi: 10.1016/j.ultramic.2010.04.014

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=20462699) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2010.04.014) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+procedure+for+identifying+textile+bast+fibres+using+microscopy%3A+flax%2C+nettle%2Framie%2C+hemp+and+jute%2E&journal=Ultramicroscopy&author=Bergfjord+C.&author=and+Holst+B.&publication_year=2010&volume=110&pages=1192-1197)

Berry, P. M., Griffin, J. M., Sylvester-Bradley, R., Scott, R. K., Spink, J. H., Baker, C. J., et al. (2000). Контроль формы растений с помощью земледелия для минимизации полегания пшеницы. *Полевая культура Res*. 67, 59-81. doi: 10.1016/S0378-4290(00)00084-8

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/S0378-4290%2800%2900084-8) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Controlling+plant+form+through+husbandry+to+minimise+lodging+in+wheat%2E&journal=Field+Crop+Res%2E&author=Berry+P.++M.&author=Griffin+J.++M.&author=Sylvester-Bradley+R.&author=Scott+R.++K.&author=Spink+J.++H.&author=Baker+C.++J.&publication_year=2000&volume=67&pages=59-81)

Berry, P. M., Spink, J. H., Gay, A. P., and Craigon, J. (2003a). A comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivars. *J. Agric. Sci.* 141, 191–202. doi: 10.1017/S002185960300354X

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1017/S002185960300354X) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+comparison+of+root+and+stem+lodging+risks+among+winter+wheat+cultivars%2E&journal=J%2E+Agric%2E+Sci%2E&author=Berry+P.+M.&author=Spink+J.+H.&author=Gay+A.+P.&author=and+Craigon+J.&publication_year=2003a&volume=141&pages=191-202)

Berry, P. M., Spink, J. H., Sterling, M., and Pickett, A. A. (2003b). Методы быстрого измерения устойчивости к полеганию сортов пшеницы. *J. Агрон. Crop Sci.* 189, 390-401. doi: 10.1046/j.0931-2250.2003.00062.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1046/j.0931-2250.2003.00062.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Methods+for+rapidly+measuring+the+lodging+resistance+of+wheat+cultivars%2E&journal=J%2E+Agron%2E+Crop+Sci%2E&author=Berry+P.+M.&author=Spink+J.+H.&author=Sterling+M.&author=and+Pickett+A.+A.&publication_year=2003b&volume=189&pages=390-401)

Berry, P. M., Sterling, M., Baker, C. J., Spink, J. и Sparkes, D. L. (2003c). Калиброванная модель полегания пшеницы по сравнению с полевыми измерениями. *Agric. Для. Метеорол.*119, 167-180. doi: 10.1016/S0168-1923(03)00139-4

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S0168-1923%2803%2900139-4) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+calibrated+model+of+wheat+lodging+compared+with+field+measurements%2E&journal=Agric%2E++For%2E+Meteorol%2E&author=Berry+P.+M.&author=Sterling+M.&author=Baker+C.+J.&author=Spink+J.&author=and+Sparkes+D.+L.&publication_year=2003c&volume=119&pages=167-180)

Berry, P. M., Sterling, M., and Mooney, S. J. (2006). Разработка модели полегания ячменя. *J. Агрон. Crop Sci.* 192, 151-158.doi: 10.1111/j.1439-037X. 2006.00194.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2006.00194.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Development+of+a+model+of+lodging+for+barley%2E&journal=J%2E++Agron%2E++Crop+Sci%2E&author=Berry+P.++M.&author=Sterling+M.&author=and+Mooney+S.++J.&publication_year=2006&volume=192&pages=151-158)

Berry, P. M., Sterling, M., Spink, J. H., Baker, C. J., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S. J., et al. (2004). Понимание и снижение полегания в злаках. *Adv. Агрон.*84, 217-271. doi: 10.1016/S0065-2113(04)84005-7

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=28025787) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S0065-2113%2804%2984005-7) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Understanding+and+rreducing+lodging+in+cereals%2E&journal=Adv%2E+Agron%2E&author=Berry+P.+M.&author=Sterling+M.&author=Spink+J.+H.&author=Baker+C.+J.&author=Sylvester-Bradley+R.&author=Mooney+S.+J.&publication_year=2004&volume=84&pages=217-271)

Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., and Berry, S. (2007). Дизайн идеотипа для устойчивой к полеганию пшеницы. *Euphytica* 154, 165-179. doi: 10.1007/s10681-006-9284-3

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s10681-006-9284-3) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Ideotype+design+for+lodging-resistant+wheat%2E&journal=Euphytica&author=Berry+P.+M.&author=Sylvester-Bradley+R.&author=and+Berry+S.&publication_year=2007&volume=154&pages=165-179)

Bert, F. (2013). *Lin fiber - Culture et Transformation.*Доступно по адресу: <http://www.unitheque.com/Livre/arvalis/Lin_fibre___Culture_et_transformation-65140.html>

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Lin+fibre+-+Culture+et+Transformation%2E&author=Bert+F.&publication_year=2013)

Biddington, N. L. (1986). Влияние механически индуцированного стресса на растения - обзор. *Регуляция роста растений.*4, 103-123. doi: 10.1007/BF00025193

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/BF00025193) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+effects+of+mechanically-induced+stress+in+plants+-+a+review%2E&journal=Plant+Growth+Regul%2E&author=Biddington+N.+L.&publication_year=1986&volume=4&pages=103-123)

Biging, G. S., and Dobbertin, M. (1995). Оценка показателей конкуренции в моделях кроны отдельных деревьев. *For. Sci.* 41, 360-377. doi: 10.1093/forestscience/41.2.360

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=15907076) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/forestscience/41.2.360) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Evaluation+of+competition+Indices+in+individual+tree+crowth+models%2E&journal=For%2E++Sci%2E&author=Biging+G.++S.&author=and+Dobbertin+M.&publication_year=1995&volume=41&pages=360-377)

Bledzki, A. K., and Gassa, J. (1999). Композиты, армированные волокнами на основе целлюлозы. *Prog. Polym. Sci.* 24, 221-274. doi: 10.1016/S0079-6700(98)00018-5

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S0079-6700%2898%2900018-5) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Composites+reinforced+with+cellulose+based+fibers%2E&journal=Prog%2E++Polym%2E+Sci%2E&author=Bledzki+A.++K.&author=and+Gassa+J.&publication_year=1999&volume=24&pages=221-274)

Bos, H. L., and Donald, A. M. (1999). В ESEM исследование деформации элементарного льняного волокна. *J. Mater. Sci.* 34, 3029-3034. doi: 10.1023/A:1004650126890

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1023/A%3A1004650126890) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=In+ESEM+study+of+the+deformation+of+elementary+flax+fibre%2E&journal=J%2E++Mater%2E++Sci%2E&author=Bos+H.++L.&author=and+Donald+A.++M.&publication_year=1999&volume=34&pages=3029-3034)

Bourmaud, A., Gibaud, M., and Baley, C. (2016). Влияние нормы высева на стабильность стебля льна и механические свойства элементарных волокон. *Ind. Crops Prod.* 80, 17-25. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.10.053

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.053) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Impact+of+the+seeding+rate+on+flax+stem+stability+and+the+mechanical+properties+of+elementary+fibres%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=Bourmaud+A.&author=Gibaud+M.&author=and+Baley+C.&publication_year=2016&volume=80&pages=17-25)

Bourmaud, A., Gibaud, M., Lefeuvre, A., Morvan, C., and Baley, C. (2015). Влияние морфологических особенностей стебля на устойчивость льна-долгунца к полеганию. *Ind. Crops Prod.* 66, 27-37. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.11.047

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.047) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Influence+of+the+morphology+characters+of+the+stem+on+the+lodging+resistance+of+Marylin+flax%2E&journal=Ind%2E+Crops+Prod%2E&author=Bourmaud+A.&author=Gibaud+M.&author=Lefeuvre+A.&author=Morvan+C.&author=and+Baley+C.&publication_year=2015&volume=66&pages=27-37)

Bourmaud, A., Malvestio, J., Lenoir, N., Siniscalco, D., Habrant, A., King, A., et al. (2017). Изучение механических характеристик и архитектуры вторичных волокон конопли. *Ind. Crops Prod.* 108, 1-5. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.06.010

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.010) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Exploring+the+mechanical+performance+and+in-planta+architecture+of+secondary+hemp+fibres%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=Bourmaud+A.&author=Malvestio+J.&author=Lenoir+N.&author=Siniscalco+D.&author=Habrant+A.&author=King+A.&publication_year=2017&volume=108&pages=1-5)

Bourmaud, A., Morvan, C., Bouali, A., Placet, V., Perré, P., and Baley, C. (2013). Взаимосвязи между углом микроволокон, механическими свойствами и биохимическим составом волокон льна. *Ind. Crops Prod.* 44, 343-351. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.11.031

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.031) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Relationships+between+micro-fibrillar+angle%2C+mechanical+properties+and+biochemical+composition+of+flax+fibers%2E&journal=Ind%2E+Crops+Prod%2E&author=Bourmaud+A.&author=Morvan+C.&author=Bouali+A.&author=Placet+V.&author=Perr%C3%A9+P.&author=and+Baley+C.&publication_year=2013&volume=44&pages=343-351)

Bowling, A. J., and Vaughn, K. C. (2008). Иммуноцитохимическая характеристика напряженной древесины: желатиновые волокна содержат больше, чем просто целлюлозу. *Am. J. Bot.* 95, 655-663. doi: 10.3732/ajb.2007368

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21632390) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3732/ajb.2007368) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Immunocytochemical+characterization+of+tension+wood%3A+gelatinous+fibers+contain+more+than+just+cellulose%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Bowling+A.++J.&author=and+Vaughn+K.++C.&publication_year=2008&volume=95&pages=655-663)

Brazier, L. G. (1927). На изгиб тонких цилиндрических оболочек и других “тонких” участков. *Proc. R. Soc. Лондон. Сер. Содержание. Pap. Математика. Физ. Характер* 116, 104-114. doi: 10.1098/rspa.1927.0125

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0125) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=On+the+flexure+of+thin+cylindrical+shells+and+other+%22thin%22+sections%2E&journal=Proc%2E+R%2E+Soc%2E+London%2E+Ser%2E+A+Contain%2E+Pap%2E+Math%2E+Phys%2E+Character&author=Brazier+L.+G.&publication_year=1927&volume=116&pages=104-114)

Callaway, J. C. (2008). Более надежная оценка уровней ТГК конопли необходима и возможна. *J. Ind. Hemp.* 13, 117-144. doi: 10.1080/15377880802391142

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1080/15377880802391142) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+more+reliable+evaluation+of+hemp+THC+levels+is+necessary+and+possible%2E&journal=J%2E++Ind%2E++Hemp%2E&author=Callaway+J.++C.&publication_year=2008&volume=13&pages=117-144)

Carpita, N. C., and Gibeaut, D. M. (1993). Структурные модели первичных клеточных стенок цветковых растений: согласованность молекулярной структуры с физическими свойствами стенок во время роста. *Plant J.* 3, 1-30. doi: 10.1111/j.1365-313X.1993.tb00007. x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=8401598) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.1993.tb00007.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Structural+models+of+primary+cell+walls+in+flowering+plants%3A+consistency+of+molecular+structure+with+the+physical+properties+of+the+walls+during+growth%2E&journal=Plant+J%2E&author=Carpita+N.+C.&author=and+Gibeaut+D.+M.&publication_year=1993&volume=3&pages=1-30)

Casa, R., Russell, G., Lo Cascio, B., and Rossini, F. (1999). Влияние окружающей среды на урожайность льна (*Linum usitatissimum* L.) и рост льна при различной плотности древостоя. *Eur. J. Agron.*11, 267-278. doi: 10.1016/S1161-0301(99)00037-4

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S1161-0301%2899%2900037-4) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Environmental+effects+on+linseed+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+yield+and+growth+of+flax+at+different+stand+densities%2E&journal=Eur%2E++J%2E++Agron%2E&author=Casa+R.&author=Russell+G.&author=Lo+Cascio+B.&author=and+Rossini+F.&publication_year=1999&volume=11&pages=267-278)

Catling, D., and Grayson, J. (1982). *Идентификация растительных волокон.* Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-011-8070-2

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-94-011-8070-2) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Identification+of+Vegetable+Fibres%2E&author=Catling+D.&author=and+Grayson+J.&publication_year=1982)

Chang, S. S., Salmén, L., Olsson, A. M., and Clair, B. (2014). Отложение и организация полимеров клеточных стенок во время созревания древесины тополя методом FTIR микроспектроскопии. *Planta* 239, 243-254. doi: 10.1007/s00425-013-1980-3

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=24162362) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s00425-013-1980-3) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Deposition+and+organisation+of+cell+wall+polymers+during+maturation+of+poplar+tension+wood+by+FTIR+microspectroscopy%2E&journal=Planta&author=Chang+S.+S.&author=Salm%C3%A9n+L.&author=Olsson+A.+M.&author=and+Clair+B.&publication_year=2014&volume=239&pages=243-254)

Chauvet, H., Pouliquen, O., Forterre, Y., Legué, V. и Moulia, B. (2016). Наклон, а не сила ощущается растениями во время гравитропизма побегов. *Sci. Rep.* 6:35431. doi: 10.1038/srep35431

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=27739470) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1038/srep35431) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Inclination+not+force+is+sensed+by+plants+during+shoot+gravitropism%2E&journal=Sci%2E+Rep%2E&author=Chauvet+H.&author=Pouliquen+O.&author=Forterre+Y.&author=Legu%C3%A9+V.&author=and+Moulia+B.&publication_year=2016)

Chen, R., Rosen, E., and Masson, P. H. (1999). Гравитропизм у высших растений. *Физиол растений.* 120, 343–350. doi: 10.1104/pp.120. 2.343

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1104/pp.120.2.343) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Gravitropism+in+higher+plants%2E&journal=Plant+Physiol%2E&author=Chen+R.&author=Rosen+E.&author=and+Masson+P.+H.&publication_year=1999&volume=120&pages=343-350)

Шевалье А. (1944). Histoire de deux plantes cultivées d’importance primordiale. Le Lin et le Chanvre. *Rev.Bot. Приложение. D Agric. Толстая кишка* 24, 51-71. doi: 10.3406/jatba.1944.6107

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3406/jatba.1944.6107) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Histoire+de+deux+plantes+cultiv%E9es+d%27importance+primordiale%2E+Le+Lin+et+le+Chanvre%2E&journal=Rev%2E+Bot%2E+Appl%2E+D+Agric%2E+Colon&author=Chevalier+A.&publication_year=1944&volume=24&pages=51-71)

Clair, B., Alméras, T., and Sugiyama, J. (2006). Напряжение сжатия в противоположной древесине покрытосеменных растений: наблюдения у каштана, мани и тополя. *Ann. For. Sci.* 63, 507-510. doi: 10.1051/forest:2006032

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1051/forest%3A2006032) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Compression+stress+in+opposite+wood+of+angiosperms%3A+observations+in+chestnut%2C+mani+and+poplar%2E&journal=Ann%2E++For%2E+Sci%2E&author=Clair+B.&author=Alm%C3%A9ras+T.&author=and+Sugiyama+J.&publication_year=2006&volume=63&pages=507-510)

Clair, B., Gril, J., Baba, K., Thibaut, B., and Sugiyama, J. (2005). Меры предосторожности при структурном анализе желатинового слоя в напряженной древесине. *IAWA J.* 26, 189-195. doi: 10.1163/22941932-90000110

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1163/22941932-90000110) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Precautions+for+the+structural+analysis+of+the+gelatinous+layer+in+tension+wood%2E&journal=IAWA+J%2E&author=Clair+B.&author=Gril+J.&author=Baba+K.&author=Thibaut+B.&author=and+Sugiyama+J.&publication_year=2005&volume=26&pages=189-195)

Cordero, R. A. (1999). Экофизиология саженцев Cecropia schreberiana в двух ветровых режимах в стланиковом облачном лесу: рост, газообмен, архитектура и биомеханика ствола. *Физиол дерева.*19, 153-163. doi: 10.1093/treephys/19.3.153

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=12651578) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/treephys/19.3.153) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Ecophysiology+of+Cecropia+schreberiana+saplings+in+two+wind+regimes+in+an+elfin+cloud+forest%3A+growth%2C+gas+exchange%2C+architecture+and+stem+biomechanics%2E&journal=Tree+Physiol%2E&author=Cordero+R.+A.&publication_year=1999&volume=19&pages=153-163)

Cosgrove, D. J. (1997). Клеточные механизмы, лежащие в основе асимметрии роста при стволовом гравитропизме. *Planta* 203, S130–S135. doi: 10.1007/PL00008101

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=11540321) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/PL00008101) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cellular+mechanisms+underlying+growth+asymmetry+during+stem+gravitropism%2E&journal=Planta&author=Cosgrove+D.+J.&publication_year=1997&volume=203&pages=S130-S135)

Cosgrove, D. J., and Jarvis, M. C. (2012). Сравнительная структура и биомеханика первичных и вторичных клеточных стенок растений. *Спереди. Plant Sci.* 3:204. doi: 10.3389/fpls.2012.00204

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=22936943) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00204) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Comparative+structure+and+biomechanics+of+plant+primary+and+secondary+cell+walls%2E&journal=Front%2E+Plant+Sci%2E&author=Cosgrove+D.++J.&author=and+Jarvis+M.++C.&publication_year=2012)

Coutand, C. (2010). Механосенсор и тиг-морфогенез, физиологическая и биомеханическая точка зрения. *Plant Sci.* 179, 168-182. doi: 10.1016/j.plantsci.2010.05.001

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.05.001) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Mechanosensing+and+thigmomorphogenesis%2C+a+physiological+and+biomechanical+point+of+view%2E&journal=Plant+Sci%2E&author=Coutand+C.&publication_year=2010&volume=179&pages=168-182)

Coutand, C., Fournier, M., and Moulia, B. (2007). Гравитропный ответ стволов тополя: ключевые роли регуляции предварительно напряженной древесины и относительная кинетика камбиального роста по сравнению с созреванием древесины. *Физиол растений.*144, 1166-1180. doi: 10.1104/pp. 106.088153

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=17468227) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1104/pp.106.088153) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+gravitropic+response+of+poplar+trunks%3A+key+roles+of+prestressed+wood+regulation+and+the+relative+kinetics+of+cambial+growth+versus+wood+maturation%2E&journal=Plant+Physiol%2E&author=Coutand+C.&author=Fournier+M.&author=and+Moulia+B.&publication_year=2007&volume=144&pages=1166-1180)

Coutand, C., Julien, J. L., Moulia, B., Mauget, J. C. и Guitard, D. (2000). Биомеханическое исследование влияния контролируемого изгиба на удлинение стебля томата: глобальный механический анализ. *J. Exp. Bot.* 51, 1813-1824. doi: 10.1093/jexbot/51.352.1813

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/jexbot/51.352.1813) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Biomechanical+study+of+the+effect+of+a+controlled+bending+on+tomato+stem+elongation%3A+global+mechanical+analysis%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Coutand+C.&author=Julien+J.++L.&author=Moulia+B.&author=Mauget+J.++C.&author=and+Guitard+D.&publication_year=2000&volume=51&pages=1813-1824)

Couture, S. J., DiTommaso, A., Asbil, W. L. и Watson, A. K. (2004a). Оценка производительности льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) при минимальной и нулевой обработке почвы в Восточной Канаде. *J. Агрон. Crop Sci.* 190, 191-196. doi: 10.1111/j.1439-037X.2004.00092. x

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00092.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Evaluation+of+fibre+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+performance+under+minimal+and+zero+tillage+in+Eastern+Canada%2E&journal=J%2E+Agron%2E+Crop+Sci%2E&author=Couture+S.+J.&author=DiTommaso+A.&author=Asbil+W.+L.&author=and+Watson+A.+K.&publication_year=2004a&volume=190&pages=191-196)

Couture, S. J., DiTommaso, A., Asbil, W. L., and Watson, A. K. (2004b). Influence of seeding depth and seedbed preparation on establishment, growth and yield of fibre flax (*Linum usitatissimum* L.) in Eastern Canada. *J. Agron. Crop Sci.* 190, 184–190. doi: 10.1111/j.1439-037X.2004.00091.x

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00091.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Influence+of+seeding+depth+and+seedbed+preparation+on+establishment%2C+growth+and+yield+of+fibre+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+in+Eastern+Canada%2E&journal=J%2E+Agron%2E++Crop+Sci%2E&author=Couture+S.+J.&author=DiTommaso+A.&author=Asbil+W.+L.&author=and+Watson+A.+K.&publication_year=2004b&volume=190&pages=184-190)

Crook, M., and Ennos, R. (1996). Mechanical differences between free-standing and supported wheat plants. *Triticum aestivum* L. *Ann. Bot.* 77, 197–202. doi: 10.1006/anbo.1996.0023

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0023) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Mechanical+differences+between+free-standing+and+supported+wheat+plants%2E+Triticum+aestivum+L%2E&journal=Ann%2E+Bot%2E&author=Crook+M.&author=and+Ennos+R.&publication_year=1996&volume=77&pages=197-202)

Crook, M. J., and Ennos, A. R. (1994). Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars. *J. Agric. Sci.* 123, 167–174. doi: 10.1017/S0021859600068428

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1017/S0021859600068428) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Stem+and+root+characteristics+associated+with+lodging+resistance+in+four+winter+wheat+cultivars%2E&journal=J%2E+Agric%2E+Sci%2E&author=Crook+M.++J.&author=and+Ennos+A.++R.&publication_year=1994&volume=123&pages=167-174)

de Bruyne, N. A. (1939). Plastic progress - Some further developments in the manufacture and use of synthetic materials for aircraft construction. *Flight Aircr. Eng.* 12, 77–79.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plastic+progress+-+Some+further+developments+in+the+manufacture+and+use+of+synthetic+materials+for+aircraft+construction%2E&journal=Flight+Aircr%2E+Eng%2E&author=de+Bruyne+N.+A.&publication_year=1939&volume=12&pages=77-79)

de Langre, E. (2008). Effects of wind on plants. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40, 141–168. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102135

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102135) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effects+of+wind+on+plants%2E&journal=Annu%2E+Rev%2E+Fluid+Mech%2E&author=de+Langre+E.&publication_year=2008&volume=40&pages=141-168)

Dickson, A. R., Even, D., Warnes, J. M., and Fernyhough, A. (2014). Влияние переработки на механические свойства полипропилена, армированного древесной массой, льном или стекловолокном. *Композиты. Часть A Appl. Sci. Manuf.*61, 258-267. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.03.010

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.010) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+effect+of+reprocessing+on+the+mechanical+properties+of+polypropylene+reinforced+with+wood+pulp%2C+flax+or+glass+fibre%2E&journal=Compos%2E+Part+A+Appl%2E+Sci%2E+Manuf%2E&author=Dickson+A.+R.&author=Even+D.&author=Warnes+J.+M.&author=and+Fernyhough+A.&publication_year=2014&volume=61&pages=258-267)

Dimmock, J. P. R. E., Bennet, S. J., Wright, D., Edwards-Jones, G., and Harris, I. M. (2005). Агрономическая оценка и эффективность сортов льна для промышленного производства волокон. *J. Agric. Sci.* 143, 299-309. doi: 10.1017/S0021859605005277

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/S0021859605005277) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Agronomic+evaluation+and+performance+of+flax+varieties+for+industrial+fibre+production%2E&journal=J%2E++Agric%2E++Sci%2E&author=Dimmock+J.++P.++R.++E.&author=Bennet+S.++J.&author=Wright+D.&author=Edwards-Jones+G.&author=and+Harris+I.++M.&publication_year=2005&volume=143&pages=299-309)

Doaré, O., Moulia, B., and de Langre, E. (2004). Влияние взаимодействия растений на вызванное ветром движение урожая. *J. Biomech. Eng* 126, 146-151. doi: 10.1115/1.1688773

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=15179844) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1115/1.1688773) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+plant+interaction+on+wind-induced+crop+motion%2E&journal=J%2E+Biomech%2E+Eng&author=Doar%C3%A9+O.&author=Moulia+B.&author=and+de+Langre+E.&publication_year=2004&volume=126&pages=146-151)

Domenges, B., and Charlet, K. (2010). Прямое понимание структуры льняного волокна с помощью сфокусированной ионно-лучевой микроскопии. *Microsc. Микроанализ.*16, 175-182. doi: 10.1017/S1431927609991292

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=20100381) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/S1431927609991292) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Direct+insights+on+flax+fiber+structure+by+focused+ion+beam+microscopy%2E&journal=Microsc%2E++Microanal%2E&author=Domenges+B.&author=and+Charlet+K.&publication_year=2010&volume=16&pages=175-182)

Dorst, J. C. (1953). Связана ли нынешняя тенденция выбора устойчивости льна к полеганию с опасностью потери качества? *Euphytica* 2, 96-100. doi: 10.1007/BF00038907

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/BF00038907) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Does+the+present+trend+to+select+for+resistance+to+lodging+in+flax+involve+dangers+of+a+loss+in+quality%B4&journal=Euphytica&author=Dorst+J.++C.&publication_year=1953&volume=2&pages=96-100)

Doumbia, A. S., Castro, M., Jouannet, D., Kervoëlen, A., Falher, T., Caret, L., et al. (2015). Лен/полипропиленовые композиты для облегченных структур: многомасштабный анализ параметров процесса и волокна. *Матер. Des.* 87, 331-341. doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.139

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.139) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax%2Fpolypropylene+composites+for+lightened+structures%3A+multiscale+analysis+of+process+and+fibre+parameters%2E&journal=Mater%2E+Des%2E&author=Doumbia+A.+S.&author=Castro+M.&author=Jouannet+D.&author=Kervo%C3%ABlen+A.&author=Falher+T.&author=Cauret+L.&publication_year=2015&volume=87&pages=331-341)

Du, G.-H., Liu, F.-H. и Rowland, G. (2015). Развитие волокнистых клеток и выход волокна льна (*Linum usitatissimum* L.) зависят от сезонной температуры. *Can. J. Plant Sci.* 95, 1215-1220. doi: 10.4141/cjps-2014-185

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.4141/cjps-2014-185) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Fiber+cell+development+and+fiber+yield+of+flax+%28+Linum+usitatissimum+L%2E%29+affected+by+the+seasonal+temperature+pattern%2E&journal=Can%2E++J%2E++Plant+Sci%2E&author=Du+G.-H.&author=Liu+F.-H.&author=and+Rowland+G.&publication_year=2015&volume=95&pages=1215-1220)

Easson, D. L., and Long, F. N. J. (1992). Влияние времени посева, нормы высева семян и уровня азота на выход и качество волокна льна (*Linum usitatissimum* L.). *Irish J. Agric. Food Res*.31, 163-172.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+effect+of+time+of+sowing%2C+seed+rate+and+nitrogen+level+on+the+fibre+yield+and+quality+of+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29%2E&journal=Irish+J%2E+Agric%2E+Food+Res%2E&author=Easson+D.+L.&author=and+Long+F.+N.+J.&publication_year=1992&volume=31&pages=163-172)

Edwards, H. G. M., Farwell, D. W., and Webster, D. (1997). FT рамановская микроскопия необработанных натуральных растительных волокон. *Спектрохим. Acta A Mol. Биомол. Spectrosc.* 1425, 2383-2392. doi: 10.1016/S1386-1425(97)00178-9

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=9477578) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S1386-1425%2897%2900178-9) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=FT+Raman+microscopy+of+untreated+natural+plant+fibres%2E&journal=Spectrochim%2E+Acta+A+Mol%2E+Biomol%2E++Spectrosc%2E&author=Edwards+H.+G.+M.&author=Farwell+D.+W.&author=and+Webster+D.&publication_year=1997&volume=1425&pages=2383-2392)

Esau, K. (1942). Сосудистая дифференцировка в вегетативном побеге Linum. I. Прокамбий. *Am. J. Bot.* 29, 738-747. doi: 10.2307/2437727

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2307/2437727) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Vascular+differentiation+in+the+vegetative+shoot+of+Linum%2E+I%2E++The+procambium%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Esau+K.&publication_year=1942&volume=29&pages=738-747)

Esau, K. (1943). Сосудистая дифференцировка в вегетативном побеге Linum. III. Происхождение лубяных волокон. *Am. J. Bot.* 30, 579-586. doi: 10.2307/2437468

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2307/2437468) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Vascular+differentiation+in+the+vegetative+shoot+of+Linum%2E+III%2E++The+origin+of+the+bast+fibers%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Esau+K.&publication_year=1943&volume=30&pages=579-586)

Evert, R. F. (2006). *Анатомия растений Исава*, 3-е изд. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Esau%27s+Plant+Anatomy&author=Evert+R.+F.&publication_year=2006)

Evert, R. F., and Eichorn, S. E. (2013). *Биология растений Ворона*, 8-е изд. Нью-Йорк, Нью-Йорк: W. H. Freeman & Company. doi: 10.1007/978-1-319-15626-8

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-1-319-15626-8) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Raven+Biology+of+Plants&author=Evert+R.+F.&author=and+Eichorn+S.+E.&publication_year=2013)

Fang, C. H., Clair, B., Gril, J., and Liu, S. Q. (2008). Ростовые стрессы сильно контролируются количеством G-слоя в древесине тополя. *IAWA J.* 29, 237-246. doi: 10.1163/22941932-90000183

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1163/22941932-90000183) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Growth+stresses+are+highly+controlled+by+the+amount+of+G-layer+in+poplar+tension+wood%2E&journal=IAWA+J%2E&author=Fang+C.+H.&author=Clair+B.&author=Gril+J.&author=and+Liu+S.+Q.&publication_year=2008&volume=29&pages=237-246)

Farquhar, T., Zhou, J., and Haslach, H. W. (2003). “Возможный механизм восприятия вентиляции навеса сельскохозяйственных культур”, в *датчиках и зондировании в биологии и инженерии*, eds F. G. Barth, J. A. C. Humphrey и T. W. Secomb (Вена: Springer), 213-219. doi: 10.1007/978-3-7091-6025-1\_15

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6025-1_15) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22A+possible+mechanism+for+sensing+crop+canopy+ventilation%2C%22+in&journal=Sensors+and+Sensing+in+Biology+and+Engineering&author=Farquhar+T.&author=Zhou+J.&author=and+Haslach+H.+W.&publication_year=2003&pages=213-219)

Fernandez-Tendero, E., Day, A., Legros, S., Habrant, A., Hawkins, S. и Chabbert, B. (2017). Изменения в производстве вторичного волокна конопли, связанные с изменчивостью технического волокна, выявленные с помощью световой микроскопии и инфракрасной спектроскопии фурье-преобразования с ослабленным полным отражением. *PLoS One* 12:e0179794. doi: 10.1371/journal.pone.0179794

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=28640922) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179794) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Changes+in+hemp+secondary+fiber+production+related+to+technical+fiber+variability+revealed+by+light+microscopy+and+attenuated+total+reflectance+Fourier+transform+infrared+spectroscopy%2E&journal=PLoS+One&author=Fernandez-Tendero+E.&author=Day+A.&author=Legros+S.&author=Habrant+A.&author=Hawkins+S.&author=and+Chabbert+B.&publication_year=2017)

Finnigan, J. (2000). Турбулентность в навесах растений. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 519-571. doi: 10.1146/annurev.fluid.32.1.519

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.519) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Turbulence+in+plant+canopies%2E&journal=Annu%2E+Rev%2E+Fluid+Mech%2E&author=Finnigan+J.&publication_year=2000&volume=32&pages=519-571)

Finnigan, J. J. (1979). Турбулентность в колышущейся пшенице: I. Средняя статистика и хонами. *Метеорол пограничного слоя.*16, 181-211. doi: 10.1007/BF03335366

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/BF03335366) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Turbulence+in+waving+wheat%3A+I%2E+Mean+statistics+and+honami%2E&journal=Boundary+Layer+Meteorol%2E&author=Finnigan+J.+J.&publication_year=1979&volume=16&pages=181-211)

Fisher, J. B., and Stevenson, J. W. (1981). Возникновение реакционной древесины в ветвях двудольных и ее роль в архитектуре деревьев. *Бот. Gaz.* 142, 82–95. doi: 10.1086/337199

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1086/337199) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Occurrence+of+reaction+wood+in+branches+of+dicotyledons+and+its+role+in+tree+architecture%2E&journal=Bot%2E+Gaz%2E&author=Fisher+J.+B.&author=and+Stevenson+J.+W.&publication_year=1981&volume=142&pages=82-95)

Ford, M. A., Blackwell, R. D., Parker, M. L. и Austin, R. B. (1979). Ассоциации между прочностью ствола, накоплением растворимых углеводов и другими признаками пшеницы. *Ann. Bot.* 44, 731-738. doi: 10.1093/annbot/44.6.731

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/annbot/44.6.731) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Associations+between+stem+solidity%2C+soluble+carbohydrate+accumulation+and+other+characters+in+wheat%2E&journal=Ann%2E++Bot%2E&author=Ford+M.++A.&author=Blackwell+R.++D.&author=Parker+M.++L.&author=and+Austin+R.++B.&publication_year=1979&volume=44&pages=731-738)

Forest, L., Padilla, F., Martínez, S., Demongeot, J., and San Martín, J. (2006). Modelling of auxin transport affected by gravity and differential radial growth. *J. Theor. Biol.* 241, 241–251. doi: 10.1016/j.jtbi.2005.11.029

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16403534) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2005.11.029) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Modelling+of+auxin+transport+affected+by+gravity+and+differential+radial+growth%2E&journal=J%2E+Theor%2E+Biol%2E&author=Forest+L.&author=Padilla+F.&author=Mart%C3%ADnez+S.&author=Demongeot+J.&author=and+San+Mart%C3%ADn+J.&publication_year=2006&volume=241&pages=241-251)

Foster, R., Pooni, H. S., and Mackay, I. J. (1998). Quantitative analysis of *Linum usitatissimum* crosses for dual-purpose traits. *J. Agric. Sci.* 131, 285–292. doi: 10.1017/S0021859698005917

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1017/S0021859698005917) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Quantitative+analysis+of+Linum+usitatissimum+crosses+for+dual-purpose+traits%2E&journal=J%2E+Agric%2E+Sci%2E&author=Foster+R.&author=Pooni+H.+S.&author=and+Mackay+I.+J.&publication_year=1998&volume=131&pages=285-292)

Fowler, N. L. (1984). The role of germination date, spatial arrangement, and neighbourhood effects in competitive interactions in Linum. *J. Ecol.* 72, 307–318. doi: 10.2307/2260023

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.2307/2260023) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+role+of+germination+date%2C+spatial+arrangement%2C+and+neighbourhood+effects+in+competitive+interactions+in+Linum%2E&journal=J%2E+Ecol%2E&author=Fowler+N.+L.&publication_year=1984&volume=72&pages=307-318)

Fukaki, H., Wysocka-Diller, J., Kato, T., Fujisawa, H., Benfey, P. N., and Tasaka, M. (1998). Genetic evidence that the endodermis is essential for shoot gravitropism in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 14, 425–430. doi: 10.1046/j.1365-313X.1998.00137.x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=9670559) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1998.00137.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Genetic+evidence+that+the+endodermis+is+essential+for+shoot+gravitropism+in+Arabidopsis+thaliana%2E&journal=Plant+J%2E&author=Fukaki+H.&author=Wysocka-Diller+J.&author=Kato+T.&author=Fujisawa+H.&author=Benfey+P.++N.&author=and+Tasaka+M.&publication_year=1998&volume=14&pages=425-430)

Gardiner, B., Berry, P., and Moulia, B. (2016). Обзор: воздействие ветра на рост, механику и повреждение растений. *Plant Sci.* 245, 94-118. doi: 10.1016/j.plantsci.2016.01.006

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=26940495) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Review%3A+wind+impacts+on+plant+growth%2C+mechanics+and+damage%2E&journal=Plant+Sci%2E&author=Gardiner+B.&author=Berry+P.&author=and+Moulia+B.&publication_year=2016&volume=245&pages=94-118)

Gartner, B. (1995). *Стебли растений: физиология и функциональная морфология.*Cambridge, MA: Academic Press. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+Stems%3A+Physiology+and+Functional+Morphology%2E&author=Gartner+B.&publication_year=1995)

Gerttula, S., Zinkgraf, M., Muday, G. K., Lewis, D. R., Ibatullin, F. M., Brumer, H., et al. (2015). Транскрипционная и гормональная регуляция гравитропизма древесных стеблей populus. *Растительная клетка* 27, 2800-2813. doi: 10.1105/tpc.15.00531

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=26410302) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1105/tpc.15.00531) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Transcriptional+and+hormonal+regulation+of+gravitropism+of+woody+stems+in+populus%2E&journal=Plant+Cell&author=Gerttula+S.&author=Zinkgraf+M.&author=Muday+G.++K.&author=Lewis+D.++R.&author=Ibatullin+F.++M.&author=Brumer+H.&publication_year=2015&volume=27&pages=2800-2813)

Gibaud, M., Bourmaud, A., and Baley, C. (2015). Понимание устойчивости к полеганию зеленых стеблей льна; Важность морфологии и жесткости волокон. *Biosyst. Eng.* 137, 9-21. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.06.005

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.005) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Understanding+the+lodging+stability+of+green+flax+stems%3B+The+importance+of+morphology+and+fibre+stiffness%2E&journal=Biosyst%2E+Eng%2E&author=Gibaud+M.&author=Bourmaud+A.&author=and+Baley+C.&publication_year=2015&volume=137&pages=9-21)

Goodman, A. M., and Ennos, A. R. (1996). Сравнительное изучение реакции корней и побегов подсолнечника и кукурузы на механическую стимуляцию. *J. Exp. Bot.* 47, 1499-1507. doi: 10.1093/jxb/47.10.1499

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/jxb/47.10.1499) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+comparative+study+of+the+response+of+the+roots+and+shoots+of+sunflower+and+maize+to+mechanical+stimulation%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Goodman+A.+M.&author=and+Ennos+A.+R.&publication_year=1996&volume=47&pages=1499-1507)

Горшков О., Мокшина Н., Ибрагимова Н., Агеева М., Гоголева Н., Горшкова Т. (2017). Волокна флоэмы как двигатели гравитропного поведения растений льна: уровень транскриптома. *Funct. Биол.*45, 203-214. doi: 10.1071/FP16348

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1071/FP16348) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Phloem+fibres+as+motors+of+gravitropic+behaviour+of+flax+plants%3A+level+of+transcriptome%2E&journal=Funct%2E+Plant+Biol%2E&author=Gorshkov+O.&author=Mokshina+N.&author=Ibragimova+N.&author=Ageeva+M.&author=Gogoleva+N.&author=and+Gorshkova+T.&publication_year=2017&volume=45&pages=203-214)

Горшкова Т., Бруч Н., Шабберт Б., Дейхолос М., Хаяси Т., Лев-Ядун С. и др. (2012). Формирование растительных волокон: современное состояние, недавний и ожидаемый прогресс и открытые вопросы. *Crit. Rev. Plant Sci.* 31, 201-228. doi: 10.1080/07352689.2011.616096

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1080/07352689.2011.616096) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+fiber+formation%3A+State+of+the+art%2C+recent+and+expected+progress%2C+and+open+questions%2E&journal=Crit%2E+Rev%2E+Plant+Sci%2E&author=Gorshkova+T.&author=Brutch+N.&author=Chabbert+B.&author=Deyholos+M.&author=Hayashi+T.&author=Lev-Yadun+S.&publication_year=2012&volume=31&pages=201-228)

Горшкова Т., Чернова Т., Мокшина Н., Агеева М., Микшина П. (2018). Растительные “мышцы”: волокна с третичной клеточной стенкой. *Новый фитол.*218, 66-72. doi: 10.1111/nph.14997

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=29364532) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/nph.14997) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+%22muscles%22%3A+fibers+with+a+tertiary+cell+wall%2E&journal=New+Phytol%2E&author=Gorshkova+T.&author=Chernova+T.&author=Mokshina+N.&author=Ageeva+M.&author=and+Mikshina+P.&publication_year=2018&volume=218&pages=66-72)

Горшкова Т., Морван С. (2006). Вторичная сборка клеточных стенок в волокнах флоэмы льна: роль галактанов. *Planta* 223, 149-158. doi: 10.1007/s00425-005-0118-7

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16362330) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s00425-005-0118-7) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Secondary+cell-wall+assembly+in+flax+phloem+fibres%3A+Role+of+galactans%2E&journal=Planta&author=Gorshkova+T.&author=and+Morvan+C.&publication_year=2006&volume=223&pages=149-158)

Горшкова Т. А., Агеева М. В., Сальников В. В., Павленчева Н. В., Снегирева А. В., Чернова Т. Е. и др. (2003а). aaaaaa aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa *Linum usitatissimum* (Linaceae). *Bot. J.* 88, 1-11.

Горшкова Т. А., Химикосова С. Б., Сальников В. В., Павленчева Н. В., Гурьянов О. П., Штолле-Смитс Т. и др. (2004). Появление клеточно-специфического галактана совпадает с переходом лубяного волокна в льне. *Ind. Crops Prod.* 19, 217-224. doi: 10.1016/j.indcrop.2003.10.002

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.002) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Occurrence+of+cell-specific+galactan+is+coinciding+with+bast+fiber+developmental+transition+in+flax%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=Gorshkova+T.+A.&author=Chemikosova+S.+B.&author=Sal%E2%80%99nikov+V.+V.&author=Pavlencheva+N.+V.&author=Gur%E2%80%99janov+O.+P.&author=Stolle-Smits+T.&publication_year=2004&volume=19&pages=217-224)

Горшкова Т. А., Гурьянов О. П., Микшина П., Ибрагимова Н., Мокшина Н., Сальников В. и др. (2010а). Специфический тип вторичной клеточной стенки, образованной растительными волокнами. *Russ. J. Plant Physiol.*57, 328-341. doi: 10.1134/s1021443710030040

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1134/s1021443710030040) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Specific+type+of+secondary+cell+wall+formed+by+plant+fibers%2E&journal=Russ%2E++J%2E++Plant+Physiol%2E&author=Gorshkova+T.++A.&author=Gurjanov+O.++P.&author=Mikshina+P.&author=Ibragimova+N.&author=Mokshina+N.&author=Salnikov+V.&publication_year=2010a&volume=57&pages=328-341)

Горшкова Т. А., Микшина П. В., Гурьянов О. П., Химикосова С. Б. (2010b). Формирование надмолекулярной структуры клеточной стенки растений. *Биохимия* 75, 159-172. doi: 10.1134/S0006297910020069

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1134/S0006297910020069) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Formation+of+plant+cell+wall+supramolecular+structure%2E&journal=Biochemistry&author=Gorshkova+T.+A.&author=Mikshina+P.+V.&author=Gurjanov+O.+P.&author=and+Chemikosova+S.+B.&publication_year=2010b&volume=75&pages=159-172)

Горшкова Т. А., Сальников В. В., Химикосова С. Б., Агеева М. В., Павленчева Н. В., Van Dam J. E. G. (2003b). Точка привязки: точка перехода в развитии лубяного волокна Linum usitatissimum. *Ind. Crops Prod.* 18, 213-221. doi: 10.1016/S0926-6690(03) 00043-8

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/S0926-6690%2803%2900043-8) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+snap+point%3A+a+transition+point+in+Linum+usitatissimum+bast+fiber+development%2E&journal=Ind%2E+Crops+Prod%2E&author=Gorshkova+T.++A.&author=Sal%E2%80%99nikov+V.++V.&author=Chemikosova+S.++B.&author=Ageeva+M.++V.&author=Pavlencheva+N.++V.&author=and+Van+Dam+J.++E.++G.&publication_year=2003b&volume=18&pages=213-221)

Горшкова Т. А., Уайатт С. Е., Сальников В. В., Гибо Д. М., Ибрагимов М. Р., Лозовая В. В. и др. (1996). Полисахариды клеточных стенок развивающихся растений льна. *Физиол растений.*110, 721-729. doi: 10.1104/pp.110. 3.721

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1104/pp.110.3.721) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cell-wall+polysaccharides+of+developing+flax+plants%2E&journal=Plant+Physiol%2E&author=Gorshkova+T.+A.&author=Wyatt+S.+E.&author=Salnikov+V.+V.&author=Gibeaut+D.+M.&author=Ibragimov+M.+R.&author=Lozovaya+V.+V.&publication_year=1996&volume=110&pages=721-729)

Goudenhooft, C., Bourmaud, A., and Baley, C. (2017). Сортовой отбор льна с течением времени: эволюция архитектуры растений, связанная с влиянием на механические свойства волокон. *Ind. Crops Prod.* 97, 56-64. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.11.062

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.062) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Varietal+selection+of+flax+over+time%3A+evolution+of+plant+architecture+related+to+influence+on+the+mechanical+properties+of+fibers%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=Goudenhooft+C.&author=Bourmaud+A.&author=and+Baley+C.&publication_year=2017&volume=97&pages=56-64)

Goudenhooft, C., Siniscalco, D., Arnould, O., Bourmaud, A., Sire, O., Gorshkova, T., et al. (2018). Исследование механических свойств клеточных стенок льна во время развития растений: связь между производительностью и структурой клеточных стенок. *Волокна* 6:6. doi: 10.3390/fib6010006

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3390/fib6010006) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Investigation+of+the+mechanical+properties+of+flax+cell+walls+during+plant+development%3A+the+relation+between+performance+and+cell+wall+structure%2E&journal=Fibers&author=Goudenhooft+C.&author=Siniscalco+D.&author=Arnould+O.&author=Bourmaud+A.&author=Sire+O.&author=Gorshkova+T.&publication_year=2018)

Grace, J., and Russell, G. (1977). Влияние ветра на травы. *J. Exp. Bot.* 28, 268-278. doi: 10.1016/0378-7788(77)90014-7

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/0378-7788%2877%2990014-7) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+effect+of+wind+on+grasses%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Grace+J.&author=and+Russell+G.&publication_year=1977&volume=28&pages=268-278)

Грасси Г. и Раналли П. (1999). “Обнаружение и мониторинг содержания ТГК в растениях: инновационные и традиционные методы”, in *Advances in Hemp Research*, ed. P. Ranalli (Binghamton, NY: The Haworth Press), 43-60.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Detecting+and+monitoring+plant+THC+content%3A+innovative+and+conventional+methods%2C%22+in&journal=Advances+in+Hemp+Research&author=Grassi+G.&author=and+Ranalli+P.&publication_year=1999&pages=43-60)

Гринхилл А. Г. (1881). Определение наибольшей высоты, соответствующей стабильности, которую может иметь вертикальный столб или мачта, и наибольшей высоты, на которую может вырасти дерево заданных пропорций. *Proc. Кэмб. Филолос. Soc.* 4, 65-73.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Determination+of+the+greatest+height+consistent+with+stability+that+a+vertical+pole+or+mast+can+be+made%2C+and+the+greatest+height+to+which+a+tree+of+given+proportions+can+grow%2E&journal=Proc%2E+Camb%2E+Philolos%2E+Soc%2E&author=Greenhill+A.+G.&publication_year=1881&volume=4&pages=65-73)

Губбельс Г. Х., Кенащук Е. О. (1989). Влияние нормы высева на характеристики растений и семян новых сортов льна. *Can. J. Plant Sci.* 69, 791-795. doi: 10.4141/cjps89-094

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.4141/cjps89-094) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+seeding+rate+on+plant+and+seed+characteristics+of+new+flax+cultivars%2E&journal=Can%2E+J%2E+Plant+Sci%2E&author=Gubbels+G.+H.&author=and+Kenaschuk+E.+O.&publication_year=1989&volume=69&pages=791-795)

Hamant, O. (2013). Широко распространенное механосенсорное управление структурой, лежащей в основе архитектуры растений. *Curr. Opin. Биол.* 16, 654–660. doi: 10.1016/j.pbi.2013.06. 006

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=23830994) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.006) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Widespread+mechanosensing+controls+the+structure+behind+the+architecture+in+plants%2E&journal=Curr%2E+Opin%2E+Plant+Biol%2E&author=Hamant+O.&publication_year=2013&volume=16&pages=654-660)

Hart, J. W. (1990). *Тропизмы растений и другие движения роста.*Берлин: Springer Science & Business Media.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+Tropisms+and+other+Growth+Movements%2E&author=Hart+J.+W.&publication_year=1990)

Hearle, J. W. S. (1963). Тонкой структурой волокон и кристаллических полимеров. III. Интерпретация механических свойств волокон. *J. Appl. Polym. Sci.* 7, 1207-1223. doi: 10.1002/app.1963.070070403

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1002/app.1963.070070403) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+fine+structure+of+fibers+and+crystalline+polymers%2E++III%2E+Interpretation+of+the+mechanical+properties+of+fibers%2E&journal=J%2E+Appl%2E+Polym%2E+Sci%2E&author=Hearle+J.+W.+S.&publication_year=1963&volume=7&pages=1207-1223)

Helbaek, H. (1959). Одомашнивание пищевых растений в старом свете. *Science* 130, 365-372.doi: 10.1126/science.130. 3372.365

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=17773393) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1126/science.130.3372.365) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Domestication+of+food+plants+in+the+old+world%2E&journal=Science&author=Helbaek+H.&publication_year=1959&volume=130&pages=365-372)

Heller, K., Sheng, Q. C., Guan, F., Alexopoulou, E., Hua, L. S., Wu, G. W., et al. (2015). Сравнительное исследование между Европой и Китаем в области растениеводства двух видов льна: льняного семени и льна-волокнистого. *Ind. Crops Prod.* 68, 24-31. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.07.010

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.010) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+comparative+study+between+Europe+and+China+in+crop+management+of+two+types+of+flax%3A+linseed+and+fibre+flax%2E&journal=Ind%2E+Crops+Prod%2E&author=Heller+K.&author=Sheng+Q.+C.&author=Guan+F.&author=Alexopoulou+E.&author=Hua+L.+S.&author=Wu+G.++W.&publication_year=2015&volume=68&pages=24-31)

His, I., Andème-Onzighi, C., Morvan, C., and Driouich, A. (2001). Микроскопические исследования зрелых волокон льна, встроенных в LR white: иммуноголдная локализация полисахаридов матрикса клеточной стенки. *J. Гистохим. Цитохем.* 49, 1-11. doi: 10.1177/002215540104901206

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=11724900) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1177/002215540104901206) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Microscopic+studies+on+mature+flax+fibers+embedded+in+LR+white%3A+immunogold+localization+of+cell+wall+matrix+polysaccharides%2E&journal=J%2E+Histochem%2E+Cytochem%2E&author=His+I.&author=And%C3%A8me-Onzighi+C.&author=Morvan+C.&author=and+Driouich+A.&publication_year=2001&volume=49&pages=1-11)

Hoffmann, G. (1992). “Использование регуляторов роста растений в пахотных культурах: обзор и перспективы”, *прогресс в регулировании роста растений. Современная наука о растениях и биотехнология в сельском хозяйстве*, eds C. M. Karssen, L. C. van Loon и D. Vreugdenhil (Dordrecht: Springer), 798-808. doi: 10.1007/978-94-011-2458-4\_98

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2458-4_98) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Use+of+plant+growth+regulators+in+arable+crops%3A+survey+and+outlook&journal=Progress+in+Plant+Growth+Regulation%2E++Current+Plant+Science+and+Biotechnology+in+Agriculture&author=Hoffmann+G.&publication_year=1992&pages=798-808)

Holbrook, N. M., and Putz, F. E. (1989). Влияние соседей на форму дерева: влияние боковой тени и предотвращение раскачивания на аллометрию *Liquidambar Styraciflua* (сладкая камедь). *Am. J. Bot.* 76, 1740-1749. doi: 10.1002/j.1537-2197.1989.tb15164.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1989.tb15164.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Influence+of+neighbors+on+tree+form%3A+effects+of+lateral+shade+and+prevention+of+sway+on+the+allometry+of+Liquidambar+Styraciflua+%28sweet+gum%29%2E&journal=Am%2E++J%2E++Bot%2E&author=Holbrook+N.+M.&author=and+Putz+F.+E.&publication_year=1989&volume=76&pages=1740-1749)

Hoson, T., Saito, Y., Soga, K., and Wakabayashi, K. (2005). Восприятие сигналов, трансдукция и реакция на гравитационное сопротивление. Другой гравиответ в растениях. *Adv. Space Res*. 36, 1196-1202. doi: 10.1016/j.asr.2005.04.095

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.095) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Signal+perception%2C+transduction%2C+and+response+in+gravity+resistance%2E++Another+graviresponse+in+plants%2E&journal=Adv%2E+Space+Res%2E&author=Hoson+T.&author=Saito+Y.&author=Soga+K.&author=and+Wakabayashi+K.&publication_year=2005&volume=36&pages=1196-1202)

Ибрагимова Н. Н., Агеева М. В., Горшкова Т. А. (2017). Развитие гравитропного ответа: необычное поведение G-волокон флоэмы льна. *Protoplasma* 254, 749-762. doi: 10.1007/s00709-016-0985-8

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=27263083) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/s00709-016-0985-8) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Development+of+gravitropic+response%3A+unusual+behavior+of+flax+phloem+G-fibers%2E&journal=Protoplasma&author=Ibragimova+N.+N.&author=Ageeva+M.+V.&author=and+Gorshkova+T.+A.&publication_year=2017&volume=254&pages=749-762)

Inoue, E. (1955). Studies of the phenomena of waving plants (‘honami’) caused by wind. *J. Agric. Meteorol.* 11, 87–90. doi: 10.2480/agrmet.11.87

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.2480/agrmet.11.87) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Studies+of+the+phenomena+of+waving+plants+%28%27honami%27%29+caused+by+wind%2E&journal=J%2E+Agric%2E+Meteorol%2E&author=Inoue+E.&publication_year=1955&volume=11&pages=87-90)

Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis: the response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta* 114, 143–157. doi: 10.1007/BF00387472

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=24458719) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/BF00387472) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thigmomorphogenesis%3A+the+response+of+plant+growth+and+development+to+mechanical+stimulation%2E&journal=Planta&author=Jaffe+M.++J.&publication_year=1973&volume=114&pages=143-157)

Jaffe, M. J., and Forbes, S. (1993). Thigmomorphogenesis: the effect of mechanical pertubation on plants. *Plant Growth Regul.* 12, 313–324. doi: 10.1007/BF00027213

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/BF00027213) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thigmomorphogenesis%3A+the+effect+of+mechanical+pertubation+on+plants%2E&journal=Plant+Growth+Regul%2E&author=Jaffe+M.++J.&author=and+Forbes+S.&publication_year=1993&volume=12&pages=313-324)

Jaffe, M. J., and Telewski, F. W. (1984). “Thigmomorphogenesis: callose and ethylene in the harding of mechanically stressed plants”, in *Phytochemical Adaptations to Stress*, eds B. N. Timmermann, C. Steelink and F. A. Loewus (Boston, MA: Springer), 79-95. doi: 10.1007/978-1-4684-1206-2\_4

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1206-2_4) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Thigmomorphogenesis%3A+callose+and+ethylene+in+the+hardening+of+mechanically+stressed+plants%2C%22+in&journal=Phytochemical+Adaptations+to+Stress&author=Jaffe+M.+J.&author=and+Telewski+F.+W.&publication_year=1984&pages=79-95)

Jaffe, M. J., Telewski, F. W., and Cooke, P. W. (1984). Тиг-морфогенез: о механических свойствах механически возмущенных бобовых растений. *Физиол. Plant.* 62, 73-78. doi: 10.1111/j.1399-3054.1984.tb05925.x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=11540788) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb05925.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thigmomorphogenesis%3A+on+the+mechanical+properties+of+mechanically+perturbed+bean+plants%2E&journal=Physiol%2E++Plant%2E&author=Jaffe+M.+J.&author=Telewski+F.+W.&author=and+Cooke+P.+W.&publication_year=1984&volume=62&pages=73-78)

Jankauskiene, Z. (2014). Результаты 90-летней селекции льна в Литве. *Proc. Латв. Акад. наук, разд. B Nat. Точное приложение. Sci.* 68, 184-192. doi: 10.2478/prolas-2014-0022

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2478/prolas-2014-0022) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Results+of+90+years+of+flax+breeding+in+Lithuania%2E&journal=Proc%2E++Latv%2E++Acad%2E++Sci%2E++Sect%2E++B+Nat%2E++Exact+Appl%2E++Sci%2E&author=Jankauskiene+Z.&publication_year=2014&volume=68&pages=184-192)

Jaouen, G., Alméras, T., Coutand, C., and Fournier, M. (2007). Как определить риск прогиба саженцев с помощью всего нескольких измерений. *Am. J. Bot.* 94, 1583-1593.doi: 10.3732/ajb.94. 10.1583

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21636357) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3732/ajb.94.10.1583) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=How+to+determine+sapling+buckling+risk+with+only+few+measurements%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Jaouen+G.&author=Alm%C3%A9ras+T.&author=Coutand+C.&author=and+Fournier+M.&publication_year=2007&volume=94&pages=1583-1593)

Joffe, R., Andersons, J., and Wallström, L. (2005). Межфазная прочность на сдвиг льняного волокна/термореактивные полимеры, оцененные по результатам испытаний на фрагментацию волокон. *J. Mater. Sci.* 40, 2721-2722. doi: 10.1007/s10853-005-2115-4

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s10853-005-2115-4) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Interfacial+shear+strength+of+flax+fiber%2Fthermoset+polymers+estimated+by+fiber+fragmentation+tests%2E&journal=J%2E++Mater%2E+Sci%2E&author=Joffe+R.&author=Andersons+J.&author=and+Wallstr%C3%B6m+L.&publication_year=2005&volume=40&pages=2721-2722)

Kennedy, R. W., and Farrar, J. L. (1965). Индукция натяжения древесины антиауксином 2,3,5-трийодбензойной кислотой. *Природа* 208:406. doi: 10.1038/208406a0

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1038/208406a0) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Induction+of+tension+wood+with+the+antiauxin+2%2C3%2C5-tri-iodobenzoic+acid%2E&journal=Nature&author=Kennedy+R.+W.&author=and+Farrar+J.+L.&publication_year=1965)

Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., and Trada, M. (2011). Обзор свойств растяжения полимерных композитов, армированных натуральными волокнами. *Композиты. Часть B Eng.* 42, 856-873. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.010

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+review+on+the+tensile+properties+of+natural+fiber+reinforced+polymer+composites%2E&journal=Compos%2E++Part+B+Eng%2E&author=Ku+H.&author=Wang+H.&author=Pattarachaiyakoop+N.&author=and+Trada+M.&publication_year=2011&volume=42&pages=856-873)

Lachenbruch, B., and Mcculloh, K. A. (2014). Черты, свойства и производительность: как древесные растения сочетают гидравлические и механические функции в клетке, ткани или целом растении. *Новый фитол.*204, 747-764. doi: 10.1111/nph.13035

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=25250668) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/nph.13035) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Traits%2C+properties%2C+and+performance%3A+How+woody+plants+combine+hydraulic+and+mechanical+functions+in+a+cell%2C+tissue%2C+or+whole+plant%2E&journal=New+Phytol%2E&author=Lachenbruch+B.&author=and+Mcculloh+K.++A.&publication_year=2014&volume=204&pages=747-764)

Lafarguette, F., Leplé, J. C., Déjardin, A., Laurans, F., Costa, G., Lesage-Descauses, M. C., et al. (2004). Гены тополя, кодирующие фасциклиноподобные белки арабиногалактана, высоко экспрессируются в напряженной древесине. *Новый фитол.*164, 107-121. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01175.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01175.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Poplar+genes+encoding+fasciclin-like+arabinogalactan+proteins+are+highly+expressed+in+tension+wood%2E&journal=New+Phytol%2E&author=Lafarguette+F.&author=Lepl%C3%A9+J.++C.&author=D%C3%A9jardin+A.&author=Laurans+F.&author=Costa+G.&author=Lesage-Descauses+M.+C.&publication_year=2004&volume=164&pages=107-121)

Lafond, G. P., Boyetchko, S. M., Brandt, S. A., Clayton, G. W., and Entz, M. H. (1996). Влияние изменения методов обработки почвы на растениеводство. *Can. J. Plant Sci.* 76, 641-649. doi: 10.4141/cjps96-114

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.4141/cjps96-114) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Influence+of+changing+tillage+practices+on+crop+production%2E&journal=Can%2E++J%2E+Plant+Sci%2E&author=Lafond+G.+P.&author=Boyetchko+S.+M.&author=Brandt+S.+A.&author=Clayton+G.+W.&author=and+Entz+M.+H.&publication_year=1996&volume=76&pages=641-649)

Lancashire, P. D., Bleiholder, H., Boom, T., Van Den Langelüddeke, P., Stauss, R., Weber, E., et al. (1991). Единый десятичный код для стадий роста сельскохозяйственных культур и сорняков. *Ann. Приложение. Биол.* 119, 561–601. doi: 10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+uniform+decimal+code+for+growth+stages+of+crops+and+weeds%2E&journal=Ann%2E++Appl%2E++Biol%2E&author=Lancashire+P.++D.&author=Bleiholder+H.&author=Boom+T.&author=Van+Den+Langel%C3%BCddeke+P.&author=Stauss+R.&author=Weber+E.&publication_year=1991&volume=119&pages=561-601)

Le Duigou, A., Bourmaud, A., Gourier, C., and Baley, C. (2016). Многомасштабные сдвиговые свойства биокомпозитов полиамида 11, армированных льняным волокном. *Композиты. Часть А* 85, 123-129. doi: 10.1016/j.compositesa.2016.03.014

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.014) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Multi-scale+shear+properties+of+flax+fibre+reinforced+polyamide+11+biocomposites%2E&journal=Compos%2E++Part+A&author=Le+Duigou+A.&author=Bourmaud+A.&author=Gourier+C.&author=and+Baley+C.&publication_year=2016&volume=85&pages=123-129)

Le Duigou, A., Pillin, I., Bourmaud, A., Davies, P., and Baley, C. (2008). Влияние рециркуляции на механическое поведение биокомпостируемых льняных/поли(L-лактидных) композитов. *Композиты. Part A* 39, 1471-1478.doi: 10.1016/j.compositesa.2008. 05. 008

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.05.008) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+recycling+on+mechanical+behaviour+of+biocompostable+flax%2Fpoly%28L-lactide%29+composites%2E&journal=Compos%2E++Part+A&author=Le+Duigou+A.&author=Pillin+I.&author=Bourmaud+A.&author=Davies+P.&author=and+Baley+C.&publication_year=2008&volume=39&pages=1471-1478)

Leblicq, T., Vanmaercke, S., Ramon, H. и Saeys, W. (2015). Механический анализ изгибного поведения стеблей растений. *Biosyst. Eng.* 129, 87-99. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.09. 016

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.016) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Mechanical+analysis+of+the+bending+behaviour+of+plant+stems%2E&journal=Biosyst%2E+Eng%2E&author=Leblicq+T.&author=Vanmaercke+S.&author=Ramon+H.&author=and+Saeys+W.&publication_year=2015&volume=129&pages=87-99)

Lefeuvre, A., Bourmaud, A., and Baley, C. (2015). Оптимизация механических характеристик композитов UD len/epoxy путем выбора волокон вдоль стебля. *Композиты. Часть A Appl. Sci. Manuf.*77, 204-208. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.07.009

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.009) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Optimization+of+the+mechanical+performance+of+UD+flax%2Fepoxy+composites+by+selection+of+fibres+along+the+stem%2E&journal=Compos%2E++Part+A+Appl%2E++Sci%2E++Manuf%2E&author=Lefeuvre+A.&author=Bourmaud+A.&author=and+Baley+C.&publication_year=2015&volume=77&pages=204-208)

Lefeuvre, A., Bourmaud, A., Morvan, C., and Baley, C. (2014a). Элементарные свойства льняного волокна при растяжении: корреляция между поведением при напряжении–деформации и составом волокна. *Ind. Crops Prod.* 52, 762-769. doi: 10.1016/j.indcrop.2013.11.043

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.043) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Elementary+flax+fibre+tensile+properties%3A+correlation+between+stress-strain+behaviour+and+fibre+composition%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=Lefeuvre+A.&author=Bourmaud+A.&author=Morvan+C.&author=and+Baley+C.&publication_year=2014a&volume=52&pages=762-769)

Lefeuvre, A., Bourmaud, A., Morvan, C., and Baley, C. (2014b). Tensile properties of elementary fibres of flax and glass: analysis of reproducibility and scattering. *Mater. Lett.* 130, 289–291. doi: 10.1016/j.matlet.2014.05.115

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.115) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Tensile+properties+of+elementary+fibres+of+flax+and+glass%3A+analysis+of+reproducibility+and+scattering%2E&journal=Mater%2E+Lett%2E&author=Lefeuvre+A.&author=Bourmaud+A.&author=Morvan+C.&author=and+Baley+C.&publication_year=2014b&volume=130&pages=289-291)

Mahboob, Z., El Sawi, I., Zdero, R., Fawaz, Z., and Bougherara, H. (2017). Tensile and compressive damaged response in Flax fibre reinforced epoxy composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 92, 118–133. doi: 10.1016/j.compositesa.2016.11.007

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.007) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Tensile+and+compressive+damaged+response+in+Flax+fibre+reinforced+epoxy+composites%2E&journal=Compos%2E++Part+A+Appl%2E++Sci%2E++Manuf%2E&author=Mahboob+Z.&author=El+Sawi+I.&author=Zdero+R.&author=Fawaz+Z.&author=and+Bougherara+H.&publication_year=2017&volume=92&pages=118-133)

Mauriat, M., and Moritz, T. (2009). Analyses of GA20ox- and GID1-over-expressing aspen suggest that gibberellins play two distinct roles in wood formation. *Plant J.* 58, 989–1003. doi: 10.1111/j.1365-313X.2009.03836.x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=19228336) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2009.03836.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Analyses+of+GA20ox-+and+GID1-over-expressing+aspen+suggest+that+gibberellins+play+two+distinct+roles+in+wood+formation%2E&journal=Plant+J%2E&author=Mauriat+M.&author=and+Moritz+T.&publication_year=2009&volume=58&pages=989-1003)

McDougall, G. J. (1993). Isolation and partial characterisation of the non-cellulosic polysaccharides of flax fibre. *Carbohydr. Res.* 241, 227–236. doi: 10.1016/0008-6215(93)80109-R

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/0008-6215%2893%2980109-R) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Isolation+and+partial+characterisation+of+the+non-cellulosic+polysaccharides+of+flax+fibre%2E&journal=Carbohydr%2E+Res%2E&author=McDougall+G.++J.&publication_year=1993&volume=241&pages=227-236)

McDougall, G. J., Morrison, I. M., Stewart, D., Weyers, J. D. B., and Hillman, J. R. (1993). Plant fibres: botany, chemistry and processing for industrial use. *J. Sci. Food Agric.* 62, 1–20. doi: 10.1002/jsfa.2740620102

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1002/jsfa.2740620102) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+fibres%3A+botany%2C+chemistry+and+processing+for+industrial+use%2E&journal=J%2E+Sci%2E+Food+Agric%2E&author=McDougall+G.+J.&author=Morrison+I.+M.&author=Stewart+D.&author=Weyers+J.+D.+B.&author=and+Hillman+J.+R.&publication_year=1993&volume=62&pages=1-20)

McMahon, T. (1973). Size and shape in biology. Elastic criteria impose limits on biological proportions, and consequently on metabolic rates. *Science* 179, 1201–1204. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Size+and+shape+in+biology%2E+Elastic+criteria+impose+limits+on+biological+proportions%2C+and+consequently+on+metabolic+rates%2E&journal=Science&author=McMahon+T.&publication_year=1973&volume=179&pages=1201-1204)

Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouck, I., and Soldati, A. (1998). Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). *J. Int. Hemp Assoc* 5, 68–74.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Decimal+code+for+growth+stages+of+hemp+%28Cannabis+sativa+L%2E%29%2E&journal=J%2E+Int%2E+Hemp+Assoc&author=Mediavilla+V.&author=Jonquera+M.&author=Schmid-Slembrouck+I.&author=and+Soldati+A.&publication_year=1998&volume=5&pages=68-74)

Meicenheimer, R. D. (1992). Cellular basis for growth and tissue differentiation patterns in *Linum usitatissimum* (Linaceae) stems: the stem unit. *Am. J. Bot.* 79, 914–920. doi: 10.2307/2445002

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.2307/2445002) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Cellular+basis+for+growth+and+tissue+differentiation+patterns+in+Linum+usitatissimum+%28Linaceae%29+stems%3A+the+stem+unit%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Meicenheimer+R.++D.&publication_year=1992&volume=79&pages=914-920)

Mellerowicz, E. J., and Gorshkova, T. A. (2012). Tensional stress generation in gelatinous fibres: a review and possible mechanism based on cell-wall structure and composition. *J. Exp. Bot.* 63, 551–565. doi: 10.1093/jxb/err339

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=22090441) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/jxb/err339) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Tensional+stress+generation+in+gelatinous+fibres%3A+a+review+and+possible+mechanism+based+on+cell-wall+structure+and+composition%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Mellerowicz+E.+J.&author=and+Gorshkova+T.+A.&publication_year=2012&volume=63&pages=551-565)

Menoux, Y., Katz, E., Eyssautier, A., Parcevaux, D., Robinet, L., Durand, B., et al. (1982). Résistance à la verse du lin textile: influence du milieu et critères de sélection proposés. *Agronomie* 2, 173–180. doi: 10.1051/agro:19820210

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1051/agro%3A19820210) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=R%E9sistance+%E0+la+verse+du+lin+textile%3A+influence+du+milieu+et+crit%E8res+de+s%E9lection+propos%E9s%2E&journal=Agronomie&author=Menoux+Y.&author=Katz+E.&author=Eyssautier+A.&author=Parcevaux+D.&author=Robinet+L.&author=Durand+B.&publication_year=1982&volume=2&pages=173-180)

Merotte, J., Le Duigou, A., Bourmaud, A., Behlouli, K., and Baley, C. (2016). Mechanical and acoustic behaviour of porosity controlled randomly dispersed flax/PP biocomposite. *Polym. Test* 51, 174–180. doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.03.002

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.002) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Mechanical+and+acoustic+behaviour+of+porosity+controlled+randomly+dispersed+flax%2FPP+biocomposite%2E&journal=Polym%2E++Test&author=Merotte+J.&author=Le+Duigou+A.&author=Bourmaud+A.&author=Behlouli+K.&author=and+Baley+C.&publication_year=2016&volume=51&pages=174-180)

Mikshina, P., Chernova, T., Chemikosova, S., Ibragimova, N., Mokshina, N., and Gorshkova, T. (2013). “Cellulosic fibers: role of matrix polysaccharides in structure and function,” in *Cellulose - Fundamental Aspects*, eds T. van de Ven and L. Godbout (London: InTechOpen), 91–112. doi: 10.5772/51941

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.5772/51941) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Cellulosic+fibers%3A+role+of+matrix+polysaccharides+in+structure+and+function%2C%22+in&journal=Cellulose+-+Fundamental+Aspects&author=Mikshina+P.&author=Chernova+T.&author=Chemikosova+S.&author=Ibragimova+N.&author=Mokshina+N.&author=and+Gorshkova+T.&publication_year=2013&pages=91-112)

Milthorpe, F. L. (1945). Fibre development of flax in relation to water supply and light intensity. *Ann. Bot.* 9, 31–53. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a088575

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088575) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Fibre+development+of+flax+in+relation+to+water+supply+and+light+intensity%2E&journal=Ann%2E+Bot%2E&author=Milthorpe+F.++L.&publication_year=1945&volume=9&pages=31-53)

Mitchell, C. (1975). Seismomorphogenic regulation of plant growth. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 100, 161–165.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Seismomorphogenic+regulation+of+plant+growth%2E&journal=J%2E+Am%2E++Soc%2E+Hortic%2E+Sci%2E&author=Mitchell+C.&publication_year=1975&volume=100&pages=161-165)

Montaigne, J. M. (1997). *Изображения du lin Textile: 8000 ans +2000 ans.* Доступно по адресу: <https://books.google.fr/books?id=lOhJAAAAYAAJ>.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Images+du+lin+Textile%3A+8000+ans+%2B2000+ans%2E&author=Montaigne+J.++M.&publication_year=1997)

Morita, M. T. (2010). Направленное гравитационное зондирование при гравитропизме. *Annu. Rev.Plant Biol.*61, 705-720. doi: 10.1146/annurev.arplant.043008.092042

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=19152486) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.092042) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Directional+gravity+sensing+in+gravitropism%2E&journal=Annu%2E+Rev%2E++Plant+Biol%2E&author=Morita+M.+T.&publication_year=2010&volume=61&pages=705-720)

Morvan, C., Andème-Onzighi, C., Girault, R., Himmelsbach, D. S., Driouich, A., and Akin, D. E. (2003). Строительство волокон льна: более одного кирпича в стенах. *Физиол растений. Biochem.* 41, 935-944. doi: 10.1016/j.plaphy.2003.07.001

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2003.07.001) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Building+flax+fibres%3A+more+than+one+brick+in+the+walls%2E&journal=Plant+Physiol%2E+Biochem%2E&author=Morvan+C.&author=And%C3%A8me-Onzighi+C.&author=Girault+R.&author=Himmelsbach+D.+S.&author=Driouich+A.&author=and+Akin+D.+E.&publication_year=2003&volume=41&pages=935-944)

Moulia, B. (2013). Биомеханика и механобиология растений-конвергентные пути к процветанию междисциплинарных исследований. *J. Exp. Bot.* 64, 4617-4633. doi: 10.1093/jxb/ert320

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=24193603) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/jxb/ert320) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+biomechanics+and+mechanobiology+are+convergent+paths+to+flourishing+interdisciplinary+research%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Moulia+B.&publication_year=2013&volume=64&pages=4617-4633)

Moulia, B., and Combes, D. (2004). Тиг-морфогенетическая акклиматизация растений к умеренным ветрам сильно влияет на структуру высоты у люцерны полевой (*Medicago sativa* l.), неопределенной травы. *Сост. Биохимия. Физиол. Часть A Mol. Интеграция. Физиол.* 137:8.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thigmomorphogenetic+acclimation+of+plants+to+moderate+winds+greatly+affects+height+structure+in+field-gown+alfalfa+%28Medicago+sativa+l%2E%29%2C+an+indeterminate+herb%2E&journal=Comp%2E+Biochem%2E+Physiol%2E+Part+A+Mol%2E+Integr%2E+Physiol%2E&author=Moulia+B.&author=and+Combes+D.&publication_year=2004)

Moulia, B., Coutand, C., and Julien, J.-L. (2015). Механочувствительный контроль роста растений: выдерживание нагрузки, зондирование, трансдукция и реагирование. *Спереди. Plant Sci.* 6:52. doi: 10.3389/fpls.2015.00052

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=25755656) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00052) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Mechanosensitive+control+of+plant+growth%3A+bearing+the+load%2C+sensing%2C+transducing%2C+and+responding%2E&journal=Front%2E++Plant+Sci%2E&author=Moulia+B.&author=Coutand+C.&author=and+Julien+J.-L.&publication_year=2015)

Moulia, B., Coutand, C., and Lenne, C. (2006). Контроль осанки и механическая акклиматизация скелета у наземных растений: последствия для механического моделирования архитектуры растений. *Am. J. Bot.* 93, 1477-1489. doi: 10.3732/ajb.93. 10.1477

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21642095) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1477) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Posture+control+and+skeletal+mechanical+acclimation+in+terrestrial+plants%3A+implications+for+mechanical+modeling+of+plant+architecture%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Moulia+B.&author=Coutand+C.&author=and+Lenne+C.&publication_year=2006&volume=93&pages=1477-1489)

Moulia, B., Der Loughian, C., Bastien, R., Martin, O., Rodríguez, M., Gourcilleau, D., et al. (2011). “Интегративная механобиология роста и архитектурного развития в изменяющихся механических средах”, in *Mechanical Integration of Plant Cells and Plants*, ed. P. Wojtaszek (Berlin: Springer), 269-302. doi: 10.1007/978-3-642-19091-9\_11

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19091-9_11) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Integrative+mechanobiology+of+growth+and+architectural+development+in+changing+mechanical+environments%2C%22+in&journal=Mechanical+Integration+of+Plant+Cells+and+Plants&author=Moulia+B.&author=Der+Loughian+C.&author=Bastien+R.&author=Martin+O.&author=Rodr%C3%ADguez+M.&author=Gourcilleau+D.&publication_year=2011&pages=269-302)

Muday, G. K. (2001). Ауксины и тропизмы. *J. Регуляция роста растений.*20, 226-243. doi: 10.1007/s003440010027

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s003440010027) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Auxins+and+tropisms%2E&journal=J%2E+Plant+Growth+Regul%2E&author=Muday+G.++K.&publication_year=2001&volume=20&pages=226-243)

Muir, A. D., and Westcott, N. D. (2003). *Лен: род Linum.*, ред. N. D. Boca Raton CRC Press. doi: 10.1201/9780203437506

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1201/9780203437506) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax%3A+the+Genus+Linum%2E&author=Muir+A.+D.&author=and+Westcott+N.+D.&publication_year=2003)

Neenan, M., and Spencer-Smith, J. L. (1975). Анализ проблемы полегания с особым упором на пшеницу и ячмень. *J. Agric. Sci.* 85, 495-507. doi: 10.1017/S0021859600062377

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/S0021859600062377) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=An+analysis+of+the+problem+of+lodging+with+particular+reference+to+wheat+and+barley%2E&journal=J%2E+Agric%2E+Sci%2E&author=Neenan+M.&author=and+Spencer-Smith+J.+L.&publication_year=1975&volume=85&pages=495-507)

Niklas, K. (1996). Различия между листьями Acer saccharum с открытых и защищенных от ветра участков. *Ann. Bot.* 78, 61-66. doi: 10.1006/anbo.1996.0096

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0096) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Differences+between+Acer+saccharum+leaves+from+open+and+wind-protected+sites%2E&journal=Ann%2E+Bot%2E&author=Niklas+K.&publication_year=1996&volume=78&pages=61-66)

Niklas, K. J. (1992). *Биомеханика растений: инженерный подход к форме и функциям растений.*Чикаго, Иллинойс: Издательство Чикагского университета.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+Biomechanics%3A+an+Engineering+Approach+to+Plant+form+and+Function%2E&author=Niklas+K.+J.&publication_year=1992)

Niklas, K. J. (1993a). Влияние механических свойств, специфичных для плотности ткани, на масштабирование высоты растений. *Ann. Bot.* 72, 173-179. doi: 10.1006/anbo.1993.1096

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1096) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Influence+of+tissue+density-specific+mechanical+properties+on+the+scaling+of+plant+height%2E&journal=Ann%2E++Bot%2E&author=Niklas+K.++J.&publication_year=1993a&volume=72&pages=173-179)

Niklas, K. J. (1993b). Масштабирование высоты растений: сравнение между основными кладами растений и анатомическими сортами. *Ann. Bot.* 72, 165-172. doi: 10.1006/anbo.1993.1095

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1095) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+scaling+of+plant+height%3A+a+comparison+among+major+plant+clades+and+anatomical+grades%2E&journal=Ann%2E++Bot%2E&author=Niklas+K.++J.&publication_year=1993b&volume=72&pages=165-172)

Niklas, K. J. (1994). Межвидовые аллометрии критической высоты изгиба и фактической высоты растения. *Am. J. Bot.* 81, 1275-1279. doi: 10.2307/2445403

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2307/2445403) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Interspecific+allometries+of+critical+buckling+height+and+actual+plant+height%2E&journal=Am%2E+J%2E+Bot%2E&author=Niklas+K.+J.&publication_year=1994&volume=81&pages=1275-1279)

Niklas, K. J. (1998). Влияние силы тяжести и ветра на эволюцию наземных растений. *Rev.Palaeobot. Палинол.*102, 1-14. doi: 10.1016/S0034-6667(98)00011-6

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=11541943) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1016/S0034-6667%2898%2900011-6) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+influence+of+gravity+and+wind+on+land+plant+evolution%2E&journal=Rev%2E+Palaeobot%2E+Palynol%2E&author=Niklas+K.+J.&publication_year=1998&volume=102&pages=1-14)

O’connor, B. J., and Gusta, L. V. (1994). Effect of low temperature and seeding depth on the germination and emergence of seven flax (*Linum usitatissimum* L.) cultivars. *Can. J. plant Sci.* 74, 247–253. doi: 10.4141/cjps94-050

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.4141/cjps94-050) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+low+temperature+and+seeding+depth+on+the+germination+and+emergence+of+seven+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+cultivars%2E&journal=Can%2E++J%2E++plant+Sci%2E&author=O%E2%80%99connor+B.++J.&author=and+Gusta+L.++V.&publication_year=1994&volume=74&pages=247-253)

Oladokun, M. A. O., and Ennos, A. R. (2006). Structural development and stability of rice *Oryza sativa* L. var. Nerica 1. *J. Exp. Bot.* 57, 3123–3130. doi: 10.1093/jxb/erl074

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16926238) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/jxb/erl074) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Structural+development+and+stability+of+rice+Oryza+sativa+L%2E+var%2E+Nerica+1%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Oladokun+M.+A.+O.&author=and+Ennos+A.+R.&publication_year=2006&volume=57&pages=3123-3130)

Patten, A. M., Jourdes, M., Brown, E. E., Laborie, M.-P., Davin, L. B., and Lewis, N. G. (2007). Reaction tissue formation and stem tensile modulus properties in wild-type and p-coumarate-3-hydroxylase downregulated lines of alfalfa. *Medicago sativa* (Fabaceae). *Am. J. Bot.* 94, 912–925. doi: 10.3732/ajb.94.6.912

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21636460) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.3732/ajb.94.6.912) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Reaction+tissue+formation+and+stem+tensile+modulus+properties+in+wild-type+and+p-coumarate-3-hydroxylase+downregulated+lines+of+alfalfa%2E++Medicago+sativa+%28Fabaceae%29%2E&journal=Am%2E++J%2E++Bot%2E&author=Patten+A.+M.&author=Jourdes+M.&author=Brown+E.+E.&author=Laborie+M.-P.&author=Davin+L.+B.&author=and+Lewis+N.+G.&publication_year=2007&volume=94&pages=912-925)

Paul-Victor, C., and Rowe, N. (2011). Effect of mechanical perturbation on the biomechanics, primary growth and secondary tissue development of inflorescence stems of *Arabidopsis thaliana*. *Ann. Bot.* 107, 209–218. doi: 10.1093/aob/mcq227

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21118840) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/aob/mcq227) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+mechanical+perturbation+on+the+biomechanics%2C+primary+growth+and+secondary+tissue+development+of+inflorescence+stems+of+Arabidopsis+thaliana%2E&journal=Ann%2E++Bot%2E&author=Paul-Victor+C.&author=and+Rowe+N.&publication_year=2011&volume=107&pages=209-218)

Paul-Victor, C., Vacche, S. D., Sordo, F., Fink, S., Speck, T., Michaud, V., et al. (2017). Effect of mechanical damage and wound healing on the viscoelastic properties of stems of flax cultivars (*Linum usitatissimum* L. cv. Eden and cv. Drakkar). *PLoS One* 12:e0185958. doi: 10.1371/journal.pone.0185958

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=28982196) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185958) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Effect+of+mechanical+damage+and+wound+healing+on+the+viscoelastic+properties+of+stems+of+flax+cultivars+%28+Linum+usitatissimum+L%2E+cv%2E+Eden+and+cv%2E+Drakkar+%29%2E&journal=PLoS+One&author=Paul-Victor+C.&author=Vacche+S.+D.&author=Sordo+F.&author=Fink+S.&author=Speck+T.&author=Michaud+V.&publication_year=2017)

Peng, S., Tang, Q., and Zou, Y. (2009). Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod. Sci.* 12, 3–8. doi: 10.1626/pps.12.3

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=16290216) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1626/pps.12.3) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Current+status+and+challenges+of+rice+production+in+China%2E&journal=Plant+Prod%2E+Sci%2E&author=Peng+S.&author=Tang+Q.&author=and+Zou+Y.&publication_year=2009&volume=12&pages=3-8)

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., and Le, T. M. (2016). Обзор последних разработок в области композитов из натуральных волокон и их механических характеристик. *Композиты. Часть A Appl. Sci. Manuf.*83, 98-112. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+review+of+recent+developments+in+natural+fibre+composites+and+their+mechanical+performance%2E&journal=Compos%2E+Part+A+Appl%2E+Sci%2E+Manuf%2E&author=Pickering+K.++L.&author=Efendy+M.++G.++A.&author=and+Le+T.++M.&publication_year=2016&volume=83&pages=98-112)

Placet, V., Méteau, J., Froehly, L., Salut, R. и Boubakar, M. L. (2014). Исследование внутренней структуры волокон конопли с использованием оптической когерентной томографии и поперечной резки сфокусированным ионным пучком. *J. Mater. Sci.* 49, 8317-8327. doi: 10.1007/s10853-014-8540-5

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s10853-014-8540-5) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Investigation+of+the+internal+structure+of+hemp+fibres+using+optical+coherence+tomography+and+Focused+Ion+Beam+transverse+cutting%2E&journal=J%2E++Mater%2E++Sci%2E&author=Placet+V.&author=M%C3%A9teau+J.&author=Froehly+L.&author=Salut+R.&author=and+Boubakar+M.+L.&publication_year=2014&volume=49&pages=8317-8327)

Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A., and Solomon, A. M. (1992). Специальная статья: глобальная модель биома, основанная на физиологии и доминировании растений, свойствах почвы и климата. *J. Biogeogr.* 19, 117-134. doi: 10.2307/2845499

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.2307/2845499) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Special+Paper%3A+A+global+biome+model+based+on+plant+physiology+and+dominance%2C+soil+properties+and+climate%2E&journal=J%2E+Biogeogr%2E&author=Prentice+I.+C.&author=Cramer+W.&author=Harrison+S.+P.&author=Leemans+R.&author=Monserud+R.+A.&author=and+Solomon+A.+M.&publication_year=1992&volume=19&pages=117-134)

Py, C., De Langre, E. и Moulia, B. (2006). Механизм блокировки частоты во взаимодействии между ветром и навесами культур. *J. Fluid Mech.* 568:425. doi: 10.1017/S0022112006002667

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1017/S0022112006002667) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+frequency+lock-in+mechanism+in+the+interaction+between+wind+and+crop+canopies%2E&journal=J%2E+Fluid+Mech%2E&author=Py+C.&author=De+Langre+E.&author=and+Moulia+B.&publication_year=2006)

Quillien, L. (2014). “Лен и лен в первом тысячелетии до нашей эры: происхождение, ремесленная промышленность и использование замечательного текстиля”, в *доисторическом, древнем ближневосточном и эгейском текстиле и одежде*, eds M. Harlow, C. Michel и M.-L. Nosch (Oxford: Oxbow Books), 271-296.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Flax+and+Linen+in+the+First+Millennium+Babylonia+BC%3A+the+origins%2C+craft+industry+and+uses+of+a+remarkable+textile%2C%22+in&journal=Prehistoric%2C+Ancient+Near+Eastern+%26+Aegean+Textiles+and+Dress&author=Quillien+L.&publication_year=2014&pages=271-296)

Ranalli, P. (2004). Текущее состояние и будущие сценарии селекции конопли. *Euphytica* 140, 121-131. doi: 10.1007/s10681-004-4760-0

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/s10681-004-4760-0) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Current+status+and+future+scenarios+of+hemp+breeding%2E&journal=Euphytica&author=Ranalli+P.&publication_year=2004&volume=140&pages=121-131)

Рашид К. и Дугид С. (2005). Наследование устойчивости льна к мучнистой росе. *Can. J. Plant Pathol.* 27, 404-409. doi: 10.1080/07060660509507239

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1080/07060660509507239) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Inheritance+of+resistance+to+powdery+mildew+in+flax%2E&journal=Can%2E++J%2E++Plant+Pathol%2E&author=Rashid+K.&author=and+Duguid+S.&publication_year=2005&volume=27&pages=404-409)

Рашид К. Ю. (1991). Оценка компонентов частичной устойчивости льна к ржавчине. *Can. J. Plant Pathol.* 13, 212-217. doi: 10.1080/07060669109500932

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1080/07060669109500932) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Evaluation+of+components+of+partial+resistance+to+rust+in+flax%2E&journal=Can%2E+J%2E+Plant+Pathol%2E&author=Rashid+K.+Y.&publication_year=1991&volume=13&pages=212-217)

Raupach, M. R., Finnigan, J. J., and Brunet, Y. (1996). “Когерентные вихри и турбулентность в навесах растительности: аналогия смешивающего слоя”, в *25-м юбилейном томе метеорологии пограничного слоя, 1970-1995*, eds J. R. Garratt и P. A. Taylor (Dordrecht: Springer), 351-382. doi: 10.1007/978-94-017-0944-6\_15

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0944-6_15) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Coherent+eddies+and+turbulence+in+vegetation+canopies%3A+the+mixing-layer+analogy%2C%22++in&journal=Boundary-Layer+Meteorology+25th+Anniversary+Volume%2C+1970-1995&author=Raupach+M.++R.&author=Finnigan+J.++J.&author=and+Brunet+Y.&publication_year=1996&pages=1970%E2%80%931995)

Razukas, A., Jankauskiene, Z., Jundulas, J., and Asakaviciute, R. (2009). Research of technical crops (potato and flax) genetic resources in Lithuania. *Agron. Res.* 7, 59–72.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Research+of+technical+crops+%28potato+and+flax%29+genetic+resources+in+Lithuania%2E&journal=Agron%2E+Res%2E&author=Razukas+A.&author=Jankauskiene+Z.&author=Jundulas+J.&author=and+Asakaviciute+R.&publication_year=2009&volume=7&pages=59-72)

Rihouey, C., Paynel, F., Gorshkova, T., and Morvan, C. (2017). Flax fibers: assessing the non-cellulosic polysaccharides and an approach to supramolecular design of the cell wall. *Cellulose* 24, 1985–2001. doi: 10.1007/s10570-017-1246-5

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/s10570-017-1246-5) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax+fibers%3A+assessing+the+non-cellulosic+polysaccharides+and+an+approach+to+supramolecular+design+of+the+cell+wall%2E&journal=Cellulose&author=Rihouey+C.&author=Paynel+F.&author=Gorshkova+T.&author=and+Morvan+C.&publication_year=2017&volume=24&pages=1985-2001)

Roach, M. J., and Deyholos, M. K. (2007). Microarray analysis of flax (*Linum usitatissimum* L.) stems identifies transcripts enriched in fibre-bearing phloem tissues. *Mol. Genet. Genomics* 278, 149–165. doi: 10.1007/s00438-007-0241-1

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=17503083) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/s00438-007-0241-1) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Microarray+analysis+of+flax+%28Linum+usitatissimum+L%2E%29+stems+identifies+transcripts+enriched+in+fibre-bearing+phloem+tissues%2E&journal=Mol%2E+Genet%2E+Genomics&author=Roach+M.+J.&author=and+Deyholos+M.+K.&publication_year=2007&volume=278&pages=149-165)

Roach, M. J., Mokshina, N. Y., Badhan, A., Snegireva, A. V., Hobson, N., Deyholos, M. K., et al. (2011). Development of cellulosic secondary walls in flax fibers requires b-galactosidase. *Plant Physiol.* 156, 1351–1363. doi: 10.1104/pp.111.172676

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21596948) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1104/pp.111.172676) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Development+of+cellulosic+secondary+walls+in+flax+fibers+requires+b-galactosidase%2E&journal=Plant+Physiol%2E&author=Roach+M.++J.&author=Mokshina+N.++Y.&author=Badhan+A.&author=Snegireva+A.++V.&author=Hobson+N.&author=Deyholos+M.+K.&publication_year=2011&volume=156&pages=1351-1363)

Robitaille, F., and Gauvin, R. (1999). Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: reorganization of the fiber network. *Polym. Compos.* 20, 48–61. doi: 10.1002/pc.10334

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1002/pc.10334) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Compaction+of+textile+reinforcements+for+composites+manufacturing%2E+III%3A+reorganization+of+the+fiber+network%2E&journal=Polym%2E++Compos%2E&author=Robitaille+F.&author=and+Gauvin+R.&publication_year=1999&volume=20&pages=48-61)

Romberger, J. A., Hejnowicz, Z., and Hill, J. F. (1993). *Plant Structure: Function and Development.* Berlin: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-01662-6

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/978-3-662-01662-6) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plant+Structure%3A+Function+and+Development%2E&author=Romberger+J.+A.&author=Hejnowicz+Z.&author=and+Hill+J.+F.&publication_year=1993)

Roussel, J. R., and Clair, B. (2015). Evidence of the late lignification of the G-layer in Simarouba tension wood, to assist understanding how non-G-layer species produce tensile stress. *Tree Physiol.* 35, 1366–1377. doi: 10.1093/treephys/tpv082

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=26427915) | [CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1093/treephys/tpv082) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Evidence+of+the+late+lignification+of+the+G-layer+in+Simarouba+tension+wood%2C+to+assist+understanding+how+non-G-layer+species+produce+tensile+stress%2E&journal=Tree+Physiol%2E&author=Roussel+J.++R.&author=and+Clair+B.&publication_year=2015&volume=35&pages=1366-1377)

Sack, F. D. (1997). Plastids and gravitropic sensing. *Planta* 203, S63–S68. doi: 10.1007/PL00008116

[CrossRef Full Text](https://doi.org/10.1007/PL00008116) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Plastids+and+gravitropic+sensing%2E&journal=Planta&author=Sack+F.+D.&publication_year=1997&volume=203&pages=S63-S68)

Schultes, R. E. (1970). *Random Thoughts and Queries on the Botany of Cannabis.* London: J. & A. Churchill.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Random+Thoughts+and+Queries+on+the+Botany+of+Cannabis%2E&author=Schultes+R.+E.&publication_year=1970)

Schweingruber, F. H., Börner, A., and Schulze, E.-D. (2006). *Atlas of Woody Plants Stems - Evolution, Structure and Environmental Modifications.* Berlin: Springer.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Atlas+of+Woody+Plants+Stems+-+Evolution%2C+Structure+and+Environmental+Modifications%2E&author=Schweingruber+F.+H.&author=B%C3%B6rner+A.&author=and+Schulze+E.-D.&publication_year=2006)

Smith, V. C., and Ennos, A. R. (2003). Влияние воздушного потока и изгиба стебля на механические и гидравлические свойства стеблей подсолнечника *Helianthus annuus* L. *J. Exp. Bot.* 54, 845-849. doi: 10.1093/jxb/erg068

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=12554727) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/jxb/erg068) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+effects+of+air+flow+and+stem+flexure+on+the+mechanical+and+hydraulic+properties+of+the+stems+of+sunflowers+Helianthus+annuus+L%2E&journal=J%2E+Exp%2E+Bot%2E&author=Smith+V.+C.&author=and+Ennos+A.+R.&publication_year=2003&volume=54&pages=845-849)

Снегирева А., Чернова Т., Агеева М., Лев-Ядун С., Горшкова Т. (2015). Интрузивный рост первичных и вторичных волокон флоэмы в стебле конопли определяет формирование и структуру пучка волокон. *Растения AoB* 7:lv061. doi: 10.1093/aobpla/plv061

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=26019229) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1093/aobpla/plv061) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Intrusive+growth+of+primary+and+secondary+phloem+fibres+in+hemp+stem+determines+fibre-bundle+formation+and+structure%2E&journal=AoB+Plants&author=Snegireva+A.&author=Chernova+T.&author=Ageeva+M.&author=Lev-Yadun+S.&author=and+Gorshkova+T.&publication_year=2015)

Снегирева А. В., Агеева М. В., Аменицкий С. И., Чернова Т. Е., Эбскамп М., Горшкова Т. А. (2010). Интрузивный рост волокон склеренхимы. *Russ. J. Plant Physiol.*57, 342-355. doi: 10.1134/S1021443710030052

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1134/S1021443710030052) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Intrusive+growth+of+sclerenchyma+fibers%2E&journal=Russ%2E++J%2E+Plant+Physiol%2E&author=Snegireva+A.+V.&author=Ageeva+M.+V.&author=Amenitskii+S.+I.&author=Chernova+T.+E.&author=Ebskamp+M.&author=and+Gorshkova+T.+A.&publication_year=2010&volume=57&pages=342-355)

Spielmeyer, W., Lagudah, E. S., Mendham, N., and Green, A. G. (1998). Наследование устойчивости к увяданию льна (*Fusarium oxysporum* f.sp. lini Schlecht) в удвоенной гаплоидной популяции *Linum usitatissimum* L. *Euphytica* 101, 287-291. doi: 10.1023/A:1018353011562

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1023/A%3A1018353011562) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Inheritance+of+resistance+to+flax+wilt+%28Fusarium+oxysporum+f%2Esp%2E+lini+Schlecht%29+in+a+doubled+haploid+population+of+Linum+usitatissimum+L%2E&journal=Euphytica&author=Spielmeyer+W.&author=Lagudah+E.+S.&author=Mendham+N.&author=and+Green+A.+G.&publication_year=1998&volume=101&pages=287-291)

Stevenson, F. C., and Wright, A. T. (1996). Норма высева и междурядья влияют на урожайность льна и вмешательство сорняков. *Can. J. Plant Sci.* 76, 537-544. doi: 10.4141/cjps96-098

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.4141/cjps96-098) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Seeding+rate+and+row+spacing+affect+flax+yields+and+weed+interference%2E&journal=Can%2E+J%2E+Plant+Sci%2E&author=Stevenson+F.+C.&author=and+Wright+A.+T.&publication_year=1996&volume=76&pages=537-544)

Sultana, C. (1983). Выращивание льна-волокнистого. *Outlook Agric.* 12, 104-110. doi: 10.1177/003072708301200301

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1177/003072708301200301) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+cultivation+of+fibre+flax%2E&journal=Outlook+Agric%2E&author=Sultana+C.&publication_year=1983&volume=12&pages=104-110)

Sultana, C. (1992). “Выращивание и уборка льна”, в *биологии и переработке льна*, eds H. Sharma and C. van sumere (Belfast: M Publications), 83-109.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%22Growing+and+harvesting+of+flax%2C%22+in&journal=The+Biology+and+Processing+of+Flax&author=Sultana+C.&publication_year=1992&pages=83-109)

Summerscales, J., Dissanayake, N. P., Virk, A. S. и Hall, W. (2010). Обзор лубяных волокон и их композитов.Часть 1–Волокна как армирование. *Композиты. Часть A Appl. Sci. Manuf.*41, 1329-1335. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.06.001

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=21889043) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=A+review+of+bast+fibres+and+their+composites%2EPart+1-Fibres+as+reinforcements%2E&journal=Compos%2E++Part+A+Appl%2E++Sci%2E++Manuf%2E&author=Summerscales+J.&author=Dissanayake+N.++P.&author=Virk+A.++S.&author=and+Hall+W.&publication_year=2010&volume=41&pages=1329-1335)

Telewski, F. W., and Jaffe, M. J. (1986). Тиг-морфогенез: анатомический, морфологический и механический анализ генетически различных сибов Pinus taeda в ответ на механическое возмущение. *Физиол. Plant.* 66, 219-226. doi: 10.1111/j.1399-3054.1986.tb02412.x

[PubMed Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?Db=pubmed&Cmd=ShowDetailView&TermToSearch=11538655) | [CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb02412.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thigmomorphogenesis%3A+anatomical%2C+morphological+and+mechanical+analysis+of+genetically+different+sibs+of+Pinus+taeda+in+response+to+mechanical+perturbation%2E&journal=Physiol%2E+Plant%2E&author=Telewski+F.+W.&author=and+Jaffe+M.+J.&publication_year=1986&volume=66&pages=219-226)

Тивер, Н.С. (1942). Исследования растения льна 1. Физиология роста, анатомия стебля и развитие волокон у льна-волокна. *Aust. J. Exp. Biol. Med. Sci.* 20, 149-160. doi: 10.1038/icb.1942.26

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1038/icb.1942.26) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Studies+of+the+flax+plant+1%2E+Physiology+of+growth%2C+stem+anatomy+and+fibre+development+in+fibre+flax%2E&journal=Aust%2E+J%2E+Exp%2E+Biol%2E+Med%2E+Sci%2E&author=Tiver+N.+S.&publication_year=1942&volume=20&pages=149-160)

Tiver, N. S., and Williams, R. P. (1943). Исследования растения льна 2. Влияние искусственной засухи на рост и производство масла у сорта семян. *Aust. J. Exp. Biol. Med. Sci.* 21, 201-209. doi: 10.1038/icb.1943.28

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1038/icb.1943.28) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Studies+of+the+flax+plant+2%2E+The+effect+of+artificial+drought+on+growth+and+oil+production+in+a+inseed+variety%2E&journal=Aust%2E+J%2E++Exp%2E+Biol%2E+Med%2E+Sci%2E&author=Tiver+N.+S.&author=and+Williams+R.+P.&publication_year=1943&volume=21&pages=201-209)

van Dam, J. E. G., and Gorshkova, T. A. (2003). “Клеточные стенки и волокна / образование волокон”, в *Энциклопедии прикладных наук о растениях*, (Elsevier Ltd), 87-96. doi: 10.1016/B0-12-227050-9/00046-6

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/B0-12-227050-9/00046-6)

van der Werf, H., Mathussen, E. W. J. M., and Haverkort, A. J. (1996). Потенциал конопли (*Cannabis sativa* L.) для устойчивого производства волокон: физиологическая оценка урожая. *Ann. Приложение. Биол.*129, 109-123. doi: 10.1111/j.1744-7348.1996.tb05736.x

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1996.tb05736.x) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=The+potential+of+hemp+%28Cannabis+sativa+L%2E%29+for+sustainable+fibre+production%3A+a+crop+physiological+appraisal%2E&journal=Ann%2E+Appl%2E+Biol%2E&author=van+der+Werf+H.&author=Mathussen+E.++W.++J.++M.&author=and+Haverkort+A.++J.&publication_year=1996&volume=129&pages=109-123)

van der Werf, H. M. G., Harsveld van der Veen, J. E., Bouma, A. T. M. и ten Cate, M. (1994). Качество стеблей конопли (*Cannabis sativa* L.) в качестве сырья для бумаги. *Ind. Crops Prod.* 2, 219-227. doi: 10.1016/0926-6690(94)90039-6

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/0926-6690%2894%2990039-6) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Quality+of+hemp+%28Cannabis+sativa+L%2E%29+stems+as+a+raw+material+for+paper%2E&journal=Ind%2E++Crops+Prod%2E&author=van+der+Werf+H.++M.++G.&author=Harsveld+van+der+Veen+J.++E.&author=Bouma+A.++T.++M.&author=and+ten+Cate+M.&publication_year=1994&volume=2&pages=219-227)

Vera, C. L., Duguid, S. D., Fox, S. L., Rashid, K. Y., Dribnenki, J. C. P., and Clarke, F. R. (2012). Краткое сообщение: сравнительное влияние полегания на урожайность семян льна и пшеницы. *Can. J. Plant Sci.* 92, 39-43. doi: 10.4141/cjps2011-031

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.4141/cjps2011-031) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Short+Communication%3A+comparative+effect+of+lodging+on+seed+yield+of+flax+and+wheat%2E&journal=Can%2E+J%2E+Plant+Sci%2E&author=Vera+C.++L.&author=Duguid+S.++D.&author=Fox+S.++L.&author=Rashid+K.++Y.&author=Dribnenki+J.++C.++P.&author=and+Clarke+F.++R.&publication_year=2012&volume=92&pages=39-43)

von Oheimb, G., Lang, A. C., Bruelheide, H., Forrester, D. I., Wäsche, I., Yu, M., et al. (2011). Радиальный рост отдельных деревьев в субтропическом широколиственном лесу: роль местной соседской конкуренции. *Для. Экол. Управление.* 261, 499–507. doi: 10.1016/j.foreco.2010.10.035

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.035) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Individual-tree+radial+growth+in+a+subtropical+broad-leaved+forest%3A+the+role+of+local+neighbourhood+competition%2E&journal=For%2E+Ecol%2E+Manage%2E&author=von+Oheimb+G.&author=Lang+A.+C.&author=Bruelheide+H.&author=Forrester+D.+I.&author=W%C3%A4sche+I.&author=Yu+M.&publication_year=2011&volume=261&pages=499-507)

Gone, F. W. (1974). *Размышления и спекуляции.*Пало-Альто, Калифорния: ежегодные обзоры.

[Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Reflections+and+Speculations%2E&author=Went+F.+W.&publication_year=1974)

Wielgus, K., Szalata, M. и Słomski, R. (2012). “17 - Генная инженерия и биотехнология растений из натуральных текстильных волокон”, в *Handbook of Natural Fibers Woodhead Publishing Series in Textiles*, ed. R. M. Kozłowski (Sawston: Woodhead Publishing), 550-575. doi: 10.1533/9780857095503.2.550

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1533/9780857095503.2.550) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=%2217+-+Genetic+engineering+and+biotechnology+of+natural+textile+fiber+plants%2C%22+in&journal=Handbook+of+Natural+Fibres+Woodhead+Publishing+Series+in+Textiles&author=Wielgus+K.&author=Szalata+M.&author=and+S%C5%82omski+R.&publication_year=2012&pages=550-575)

Wiersema, H. T. (1955). Ожог льна. *Euphytica* 4, 197-205. doi: 10.1007/BF00037287

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1007/BF00037287) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax+scorch%2E&journal=Euphytica&author=Wiersema+H.++T.&publication_year=1955&volume=4&pages=197-205)

Wyatt, S. E., Sederoff, R., Flaishman, M. A., and Lev-Yadun, S. (2010). Arabidopsis thaliana как модель образования желатиновых волокон. *Russ. J. Plant Physiol.*57, 363-367. doi: 10.1134/S1021443710030076

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1134/S1021443710030076) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Arabidopsis+thaliana+as+a+model+for+gelatinous+fiber+formation%2E&journal=Russ%2E+J%2E+Plant+Physiol%2E&author=Wyatt+S.+E.&author=Sederoff+R.&author=Flaishman+M.+A.&author=and+Lev-Yadun+S.&publication_year=2010&volume=57&pages=363-367)

Yan, L., Chouw, N., and Jayaraman, K. (2014). Льняное волокно и его композиты – обзор. *Композиты. Часть B Eng.* 56, 296-317. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014

[CrossRef Полный текст](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014) | [Google Scholar](http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Flax+fibre+and+its+composites+-+A+review%2E&journal=Compos%2E++Part+B+Eng%2E&author=Yan+L.&author=Chouw+N.&author=and+Jayaraman+K.&publication_year=2014&volume=56&pages=296-317)

**Ключевые**слова: биомеханика, клеточная стенка, волокнистые культуры, льноволокно, условия роста, развитие растений, селекция

**Цитирование:** Goudenhooft C, Bourmaud A и Baley C (2019) Волокна льна (*Linum usitatissimum* L.) Для композитного армирования: изучение связи между ростом растений, развитием клеточных стенок и свойствами волокон. *Спереди. Plant Sci.* 10:411. doi: 10.3389/fpls.2019.00411

**Получено:** 16 апреля 2018 г.; **Принято:** 19 марта 2019 г.;
**Опубликовано:** 03 апреля 2019 г.

Под редакцией:

[**Маркус Рюггеберг**](https://loop.frontiersin.org/people/551558/overview), Швейцарская федеральная лаборатория материаловедения и технологии, Швейцария

Обзор:

[**Damien Soulat**](https://loop.frontiersin.org/people/613234/overview), ENSAIT, Франция
[**Ryszard Michal Kozlowski**](https://loop.frontiersin.org/people/443363/overview), Институт натуральных волокон и лекарственных растений, Польша

**Copyright** © 2019 Goudenhooft, Bourmaud and Baley. Это статья в открытом доступе, распространяемая на условиях [**лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY)**](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Использование, распространение или воспроизведение на других форумах разрешено при условии, что автор(ы) и владелец(ы) авторских прав зачислены и что оригинальная публикация в этом журнале цитируется в соответствии с принятой академической практикой. Не допускается использование, распространение или размножение, не соответствующее настоящим условиям.

**\*Корреспонденция:** Ален Бурмо, **alain.bourmaud@univ-ubs.fr**

**Отказ от ответственности:**Все претензии, выраженные в этой статье, принадлежат исключительно авторам и не обязательно представляют интересы их аффилированных организаций или издателя, редакторов и рецензентов. Любой продукт, который может быть оценен в этой статье или заявке, которая может быть сделана его производителем, не гарантируется и не одобрен издателем.

https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full