

## Химический метод оценки степени биодegradации древесины конструктивных элементов

Инженер Т.А. Серова,

ОАО «СПб НИиПИ по реставрации памятников истории и культуры  
«НИИ СПЕЦПРОЕКТАРЕСТАВРАЦИЯ»;

к.б.н., ведущий научный сотрудник Ю.А. Титова;

к.б.н., ведущий научный сотрудник Ю.Д. Шенин,

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений

**Аннотация.** Древесина – экологичный и легкий материал, издавна используемый в строительстве. К сожалению, в составе конструктивных элементов зданий он восприимчив к поражению различными биологическими агентами при несоблюдении должного температурно-влажностного режима. Среди биодеструкторов ведущее положение занимают дереворазрушающие домовые грибы и плесневые микромицеты. Эти организмы используют древесину в качестве трофической базы, изменяя ее химический состав и, соответственно, механические свойства.

В работе исследуются изменения содержания основных биополимеров древесины (целлюлозы и лигнина), а также зольности и влажности материала под действием как плесневых, так и домовых грибов в образцах конструктивных элементов с разной степенью интенсивности биодеструкции. С этой целью использовали химические методы выделения целлюлозы и лигнина из интактной и пораженной грибами древесины, метод вычисления влажности материала и его зольности. Было выяснено, что при развитии глубоких поражений содержание целлюлозы снижается на 20 %, лигнина – на 40 %. Показатели влажности и зольности древесины также могут служить маркерами развития биодеструкции определенной степени.

**Ключевые слова:** древесина; химический состав древесины; целлюлоза; лигнин; дереворазрушающие грибы

### Введение

Ель (*Picea abies* (L.) Karst) и особенно сосна (*Pinus silvestris* L.) – наиболее часто используемые в строительстве породы древесины как в России, так и за рубежом [1, 2]. К сожалению, при несоблюдении верного температурно-влажностного режима деревянные конструкции поражаются биодеструкторами, чаще дереворазрушающими грибами [3, 4]. Разрушения, вызываемые грибами бурой гнили (домовыми грибами), являются наиболее частой причиной обрушения как относительно новых, так и исторических конструкций [1]. Кроме мощных разрушителей-базидиомицетов (*Coniophora cerebella* (Pers.) Pers, *Serpula lacrymans* (Wulfen) P. Karst., *Antrodia xantha* (Fr.) Ryvarden, *Fibroporia vaillantii* (DC.) Parmasto и другие), деревянные элементы часто поражаются плесневыми грибами, микромицетами, среди которых *Penicillium spp.* Link, *Fusarium spp.* Link, *Acremonium spp.* Link, *Aureobasidium pullulans* (de Bary) Arnaud и другие [5]. Эти организмы также способны изменять прочностные свойства древесины. Проблема обследования деревянных элементов на предмет биопоражения является одной из ключевых в реставрации последних лет [6]. Нормативная база по этому вопросу находится в процессе разработки, поэтому новые сведения по возможности количественной оценки степени биодеструкции являются весьма своевременными.

Представление о том, как именно изменяются свойства древесины под действием различных грибов, важно для понимания процесса биодеструкции и прогнозирования изменения состояния элемента и конструкции в целом. В основном авторы приводят данные по потере веса, эластичности, азотному компоненту и спектрам поглощения волн определенных длин [7–10 и др.]. Изменение содержания лигнина и целлюлозы в древесине под действием грибов белой гнили часто оценивают для обоснования применения этих организмов перед сульфатной варкой древесины, при производстве целлюлозы, бумаги или в прочих областях, где необходима стадия делигнификации [11–15 и др.].

В норме древесина сосны содержит около 56 % целлюлозы и 27 % лигнина. Химический состав ранней и поздней древесины в годичных слоях практически одинаков. По высоте ствола химический состав древесины меняется мало. У сосны в возрасте спелости обнаружено незначительное увеличение содержания целлюлозы и понижение содержания лигнина и пентозанов в средней по высоте части ствола. По сравнению с древесиной кора содержит больше

Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д. Химический метод оценки степени биодegradации древесины конструктивных элементов

золы, экстрактивных веществ и лигнина, но значительно меньше целлюлозы (почти в 3 раза) и пентозанов, причем резкого различия по содержанию пентозанов в коре хвойных пород (сосне, ели) и лиственных (березе, осине) не наблюдается [16–18]. Нам было интересно выяснить, как изменяется количество мажорных компонентов древесины (лигнина целлюлозы), непосредственно определяющих ее механические свойства, т. к. информации по этим данным для исторической древесины, отобранной непосредственно с пораженных и интактных конструктивных элементов в зданиях, являющихся архитектурными памятниками, по нашему мнению, не достаточно.

### *Объекты исследований*

Объектами исследований были элементы деревянных конструкций Каменноостровского театра, элементы чердачного перекрытия исторического здания гостиницы и конструктивные элементы подвального помещения и первого этажа здания наркологического диспансера (3 реставрационных исторических объекта). Отбирались как пораженные биодеструкторами, так и контрольные образцы, не затронутые биодеструкцией. Образцы пораженных деревянных конструкций в обоих исторических зданиях отбирались по следующим принципам: типичность, объем и степень поражения. Степень поражения присваивалась элементу в соответствии с нормами [19].

Образцы пораженных деревянных конструкций отбирали способами выпиливания, высверливания, выщепления и соскабливания на глубину до 20 см от поверхности с помощью инструментов (шило, нож, стамеска, молоток-гвоздодер, дрель) и стерильной тары для отбора образцов. Все пробы помещали в стерильные пакеты и доставляли для анализа в лабораторию. Каждый контрольный образец имел смешанный состав из нескольких образцов, отобранных в пяти точках элемента конструкции.

### *Методы исследований*

Динамика выбранных показателей оценивалась как на поверхности, так и в толще деструктурированных и контрольных элементов различных конструкций зданий.

Контрольные образцы, взятые на поверхности элемента конструкции и из глубоко лежащих слоев, практически сходны по своим показателям, что говорит о возможности использования и единого контроля. Для здания наркологического диспансера в связи с большой разницей в годе постройки использовался отдельный контроль.

Для характеристики особенностей и степени разложения основных биополимеров древесины, определяющих ее механические свойства, использовались неорганические и органические растворители ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) [20].

Перед проведением химических анализов образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали на электрической мельнице и просеивали через сито с диаметром пор 1 мм. Во всех образцах определяли содержание золы прокаливанием в муфельной печи при температуре 600°C.

1. *Метод количественного определения лигнина* (с 72%-й серной кислотой, модифицированный Комаровым) [20, 21]. Навеску около 1 г, взвешенную с точностью до 0.0002 г, предварительно обессмоленную спиртобензолом или серным эфиром измельченной древесины (влажность которой определяли в отдельной пробе), обрабатывали в колбе с притертой пробкой 15 мл 72%-й серной кислоты (уд. вес 1.64) в течение 2.5 часов при температуре 24–25 °С (термостат), периодически размешивая содержимое колбы во избежание образования комков. Затем смесь лигнина с серной кислотой разбавляли 200 мл дистиллированной воды и кипятили в течение 1 часа в колбе с обратным холодильником. Давали лигнину осесть, после чего отфильтровывали его через предварительно высушенный до постоянного веса пористый стеклянный фильтр №1. Лигнин промывали горячей водой до нейтральной реакции, высушивали до постоянного веса и взвешивали. Полученное количество лигнина рассчитывали в процентах от веса необессмоленной абсолютно сухой навески древесины.

2. *Метод количественного определения целлюлозы по Кюрцнеру и Хофферу* [20]. Около 1 г измельченной древесины помещали в коническую колбу объемом 200–250 мл, добавляли 25 мл смеси, состоящей из 1 объема концентрированной азотной кислоты (уд. вес 1.4) и 4 объемов этилового спирта, медленно кипятили в течение часа в колбе с обратным холодильником в водяной бане. После кипячения и оседания опилок осторожно сливали жидкость через стеклянный фильтр, предварительно высушенный до постоянного веса, и взвешивали. Попавшую

Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д. Химический метод оценки степени биодegradации древесины конструктивных элементов

на фильтр древесину смывали 25 мл свежей смеси спирта с азотной кислотой, снова нагревали на водяной бане в колбе с обратным холодильником в течение 1 часа. Такую обработку проводили 3–4 раза. Признаком конца делигнификации древесины служило отсутствие красного окрашивания при действии на остаток образца солянокислого раствора фтороглицина. Также проводили микроскопическое исследование пробы с хлорцинкйодом, который окрашивает волокна древесной целлюлозы в фиолетовый цвет. Присутствие лигнина обнаруживали по желтому окрашиванию. После последней обработки целлюлозу отфильтровывали на стеклянном фильтре, промывали 10 мл свежей смеси спирта и азотной кислоты, затем горячей водой доводили до нейтральной реакции, высушивали при 105°C до постоянного веса и взвешивали. Содержание целлюлозы вычисляли в процентах от веса абсолютно сухой древесины.

3. *Метод определения влажности измельченной древесины путем высушивания* [20]. Взвешивали низкий бюкс с крышкой, затем 1 г измельченной древесины и пересыпали навеску в бюкс. Высушивали открытый бюкс с навеской в сушильном шкафу при 100–105°C в течение 3–4 часов. После высушивания взвешивали бюкс с навеской в закрытом виде. Вычисляли влажность опилок  $\rho$ , %, по формуле:

$$\rho = (m_2 - m_0/m_1) \times 100 \%,$$

где  $\rho$  – влажность древесины;

$m_2$  – масса закрытого бюкса с навеской после сушки, г;

$m_0$  – масса закрытого бюкса, г;

$m_1$  – масса интактной древесины, г.

4. *Метод определения зольности древесины* [20]. Взвешивали фарфоровый тигель, затем 1 г измельченной древесины и пересыпали навеску в тигель. Прожигали навеску на огне горелки. Далее помещали тигель с навеской в муфельную печь с заданным нагревом до  $575 \pm 25^\circ \text{C}$ . Выдерживали тигель в печи не менее 3 часов. После извлечения из печи давали тиглю с золой остыть, затем взвешивали его. Зольность  $i$ , %, высчитывали по формуле:

$$i = (m_2 - m_0/m_1) \times 100 \%,$$

где  $i$  – зольность древесины;

$m_2$  – масса тигля с навеской после обработки в печи, г;

$m_0$  – масса тигля, г;

$m_1$  – масса интактной древесины, г.

5. *Метод определения содержания целлюлозы и/или лигнина* в процентах от веса исходной древесины (принимается, что содержание золы в образцах остается постоянным)  $C$ , %, основывается на расчетах по формуле:

$$C = 100 \% \times m_i/m_0 - m_0 \times \rho,$$

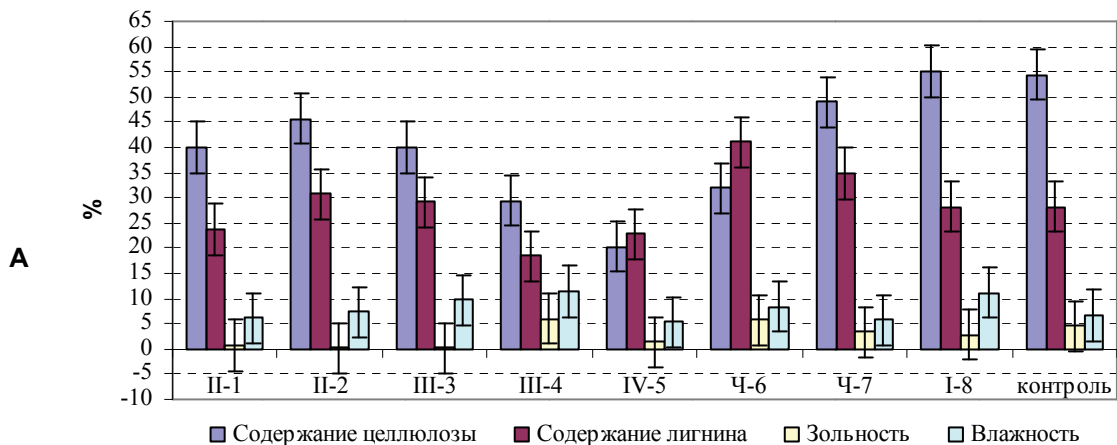
где  $\rho$  – влажность образца древесины;

$m_i$  – масса искомого биополимера (целлюлоза, лигнин);

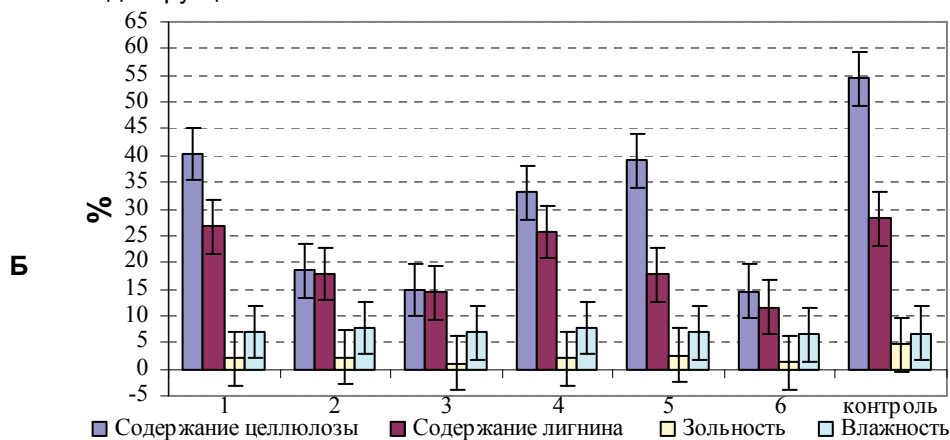
$m_0$  – общая масса образца древесины [20, 21, 22].

## Результаты и обсуждение

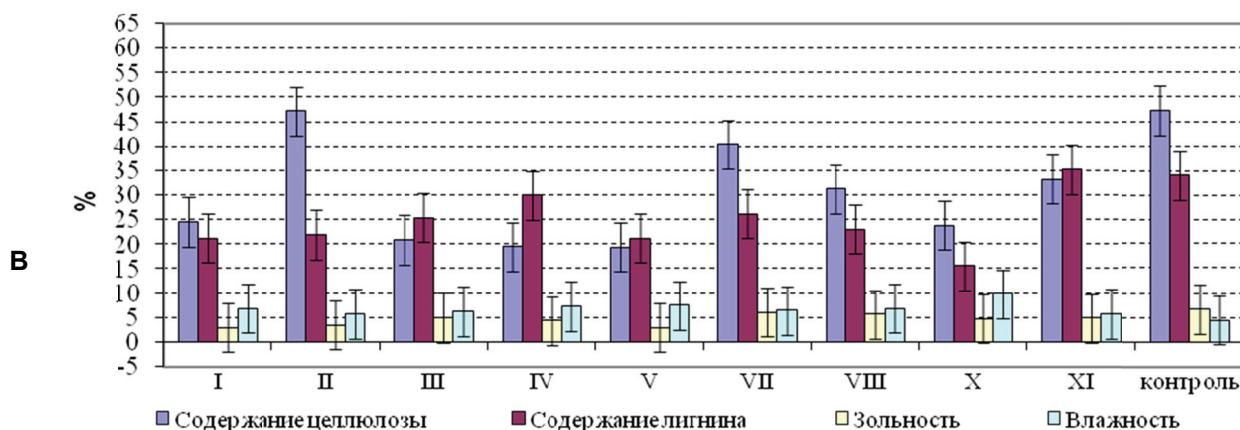
По результатам исследования был определен градиент показателей содержания компонентов, определяющих механические свойства древесины, от поверхности на глубину 15–20 см (в середину элементов конструкций) или на возможно максимальную глубину (для мелкогабаритных элементов) (рис. 1, 2). Содержание лигнина в пораженных образцах, взятых на поверхности древесины, различно. В образцах с поверхностным поражением древесины микромицетами (плесневыми грибами) I и II степеней биодеструкции в здании театра (рис. 1, А: I-8, II-2, III-3, Ч-6, Ч-7), диспансера (рис. 1, Б: XI) и I степени в здании гостиницы (рис. 1, В: 1, 4) содержание лигнина практически соответствует контрольному. Также в случае образца IV здания диспансера с III степенью интенсивности биодеструкции содержание лигнина близко к контрольному на фоне сильного снижения содержания целлюлозы. В случае образцов со II степенью интенсивности поражения микромицетами в здании гостиницы (2, 5) и диспансера (II) содержание лигнина снижено по сравнению с контрольным, что связано со способностью выявленных микромицетов усваивать лигнин при колонизации древесины [23, 24, 25]. Наименьшее содержание лигнина выявлено в образцах глубоко деструктурированной древесины (II-1, III-4, IV-5 в здании театра; 3, 6 в здании гостиницы; I, III, V-X в здании диспансера).



Степень III II III III III II I  
биодеструкции



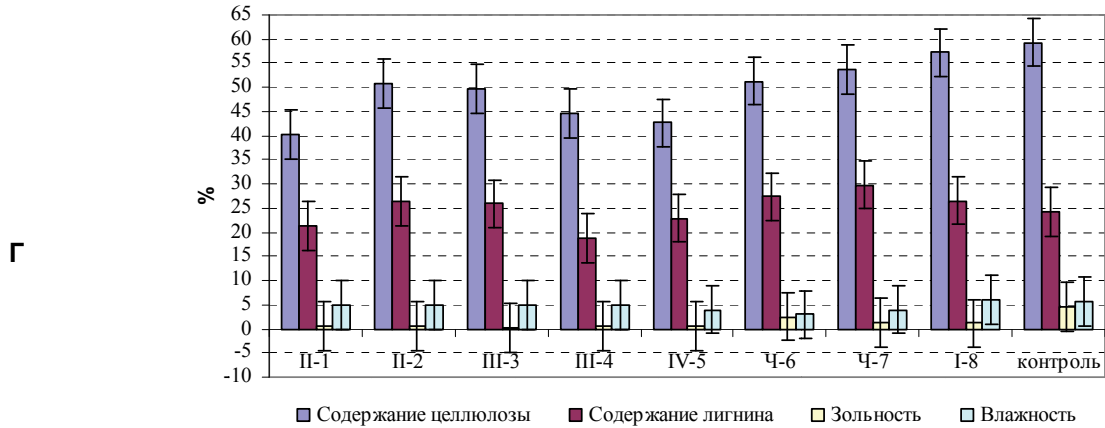
Степень I III III I III  
биодеструкции



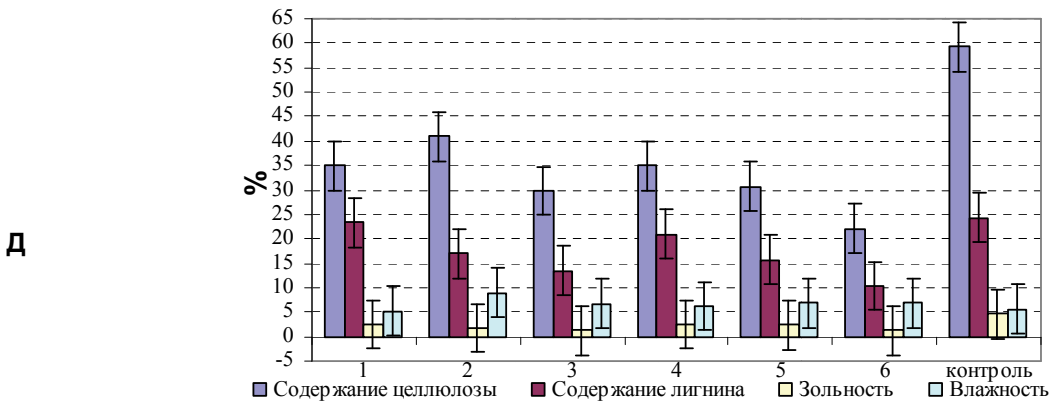
Степень III II III III III III III II  
биодеструкции

**Рисунок 1. Степень биодеструкции поверхностных слоев древесины в образцах различных элементов конструкций: А – здания Каменноостровского театра, Б – здания гостиницы, В – здания наркологического диспансера**

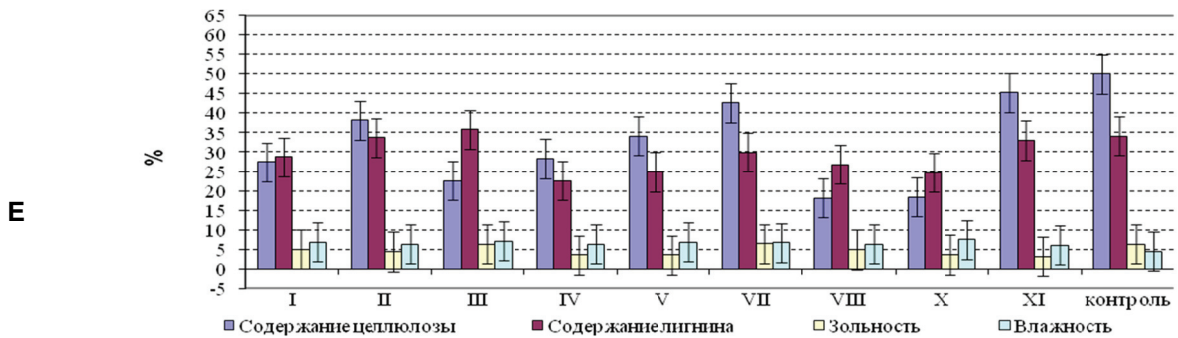
Содержание целлюлозы во всех пораженных образцах отличается от контроля в 1.2–3.7 раза в сторону уменьшения ее содержания при поражении (кроме образца II здания диспансера со II степенью биодеструкции). Наиболее глубокая биодеструкция макромицетами (домовыми грибами) характеризуется снижением содержания целлюлозы в 1.5–3.7 раза; при поверхностном поражении элементов конструкций происходит менее значительное снижение содержания целлюлозы, вызванное жизнедеятельностью микромицетов (рис. 1, 2).



Степень III II III III III II I  
биодеструкции



Степень I III III I III  
биодеструкции



Степень III II III III III III III II  
биодеструкции

**Рисунок 2. Степень биодеградации глубоких слоев древесины в образцах различных элементов конструкций: Г – здания Каменноостровского театра, Д – здания гостиницы, Е – здания диспансера**

Зольность как показатель общего содержания органики субстрата [20, 26] при биодеструкции древесины практически во всех случаях значительно ниже контрольных значений (в здании гостиницы в 2.1–4 раза, в здании театра в 2.2–10.5 раз, в здании диспансера в 1.1–2.3 раза). Снижение этого показателя свидетельствует о глубокой биодеструкции элементов конструкций, минерализации основных компонентов древесины и переходе части углерода с  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Поэтому чем ниже зольность исследованного образца, тем большей деградации подверглись его компоненты [27].

Влажность пораженной на поверхности древесины практически во всех случаях выше контрольных значений (рис. 1), что также служит показателем возникновения биопоражений древесины и развития поверхностной биодеструкции. Чем выше этот показатель, тем активнее происходит колонизация субстрата, его деградация и обводнение [23, 28–34].

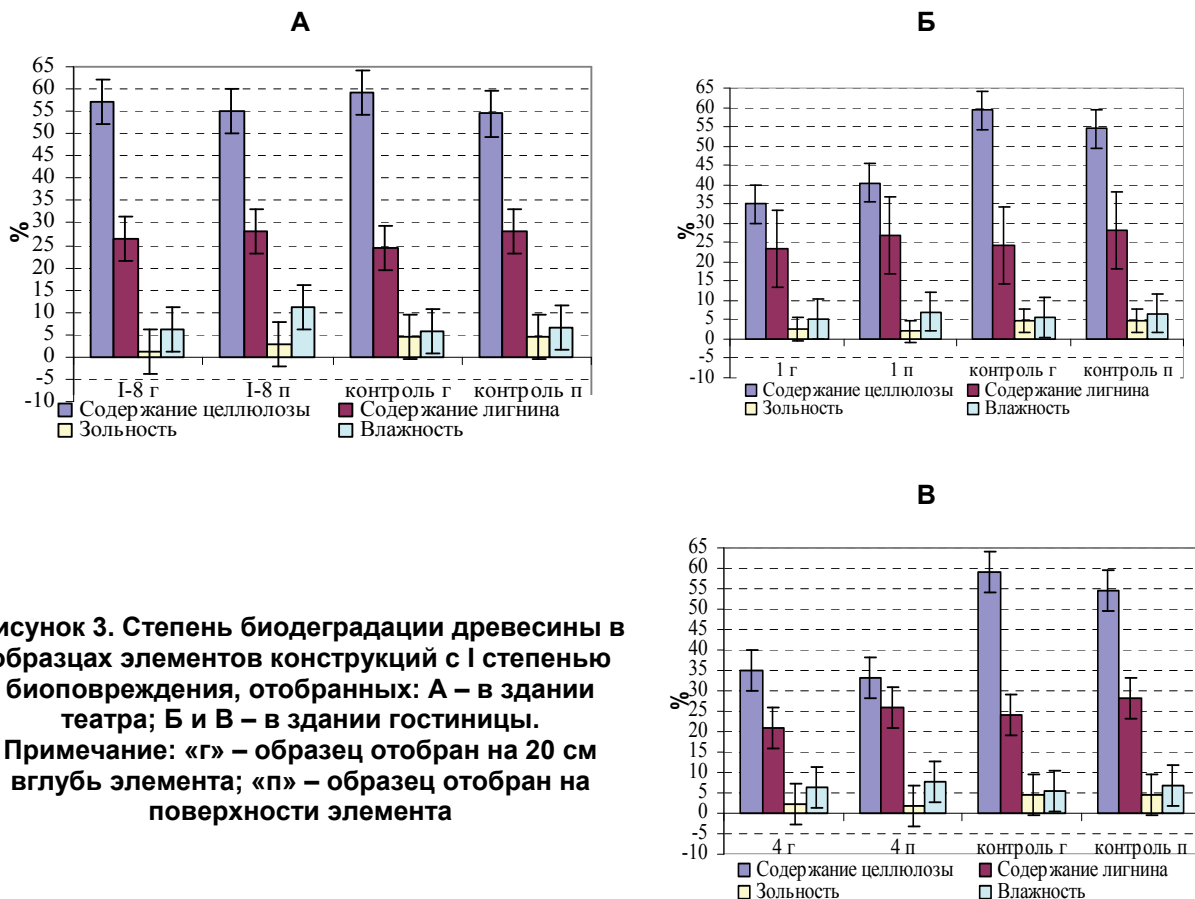
Содержание лигнина в глубоких слоях при высоких баллах поражения в 1.3–2.5 раза отличается от контроля. Образцы с поражением макромицетами (балл III) отличаются пониженным содержанием лигнина в глубоких слоях древесины, что свидетельствует о биодеградации практически всей толщи элемента. В образце XI из здания диспансера (степень биодеструкции II) содержание лигнина близко к контрольному на фоне пониженного содержания целлюлозы. Содержание лигнина в образцах со II степенью биодеградации практически не отличается от контрольного в здании театра и снижено в 1.5 раза по отношению к контролю в зданиях гостиницы и диспансера.

Это может быть связано с развитием поражения вглубь элемента, не диагностируемого как визуально, так и при проверке механической прочности в условиях здания. Кроме того, возможно колебание содержания в рамках процентных соотношений макромолекулярных соединений в составе древесины сосны [26, 35, 36]. Образцы с баллом поражения I в зданиях театра и гостиницы имеют близкие к контрольным показатели содержания лигнина (рис. 2, Г, Д). Биодеградация во всех случаях сопровождается увеличением влажности, снижением зольности древесины и содержания целлюлозы. Именно по этим показателям можно судить о начале биодеструкции элементов конструкций и о I степени биодеградации материала, причем вышеуказанные тенденции выявлены как для поверхностных, так и для глубоких слоев древесины, подвергающейся воздействию ее колонизаторов. По мере развития микогенной деструкции уменьшается содержание целлюлозы в 1.5–3.7 раза, лигнина в 1.1–2.4 раза, золы в 1.2–9.0 раз, при этом влажность увеличивается в 1.1–2.1 раза (рис. 1, 2).

Результаты оценки степени биодеградации древесины I степени биоповреждения комплексом микромицетов-биодеструкторов (без участия макромицета) показаны на рисунке 3. Картина разложения основных полимеров древесины образцов с низкой степенью биодеструкции сходная. Слабая поверхностная биодеструкция древесины исследованных элементов выражается в почти одинаковом содержании лигнина в контрольных и в подвергшихся биодеструкции образцах, взятых из глубоких слоев элемента и с поверхности (рис. 3).

Содержание целлюлозы в образце из здания театра практически не отличается от контрольного (рис. 3, А). В глубоких слоях пораженных элементов из здания гостиницы содержание целлюлозы в 1.2–1.7 раза ниже, чем в контроле. Содержание целлюлозы в поверхностных слоях в 1.5–2.0 раза ниже, а влажность в 1.2–1.3 раза выше контроля (рис. 3, Б, В). В микосинузиях этих элементов нами регистрировались виды микромицетов, которые и обеспечивают поверхностное разложение целлюлозы. Зольность образцов из поверхностных слоев меньше контрольной в 2.3 раза, для глубоких слоев этот показатель меньше контрольного в 2.0–3.8 раза.

Итак, на поверхности конструкций в начале микогенной деструкции уменьшается зольность и содержание целлюлозы в 1.4–1.8 раза, а содержание лигнина остается на уровне контрольных значений. При этом наблюдается значительное увеличение влажности в 1.8 и 1.3 раза для зданий театра и гостиницы соответственно (рис. 3).



**Рисунок 3. Степень биодegradации древесины в образцах элементов конструкций с I степенью биоповреждения, отобранных: А – в здании театра; Б и В – в здании гостиницы. Примечание: «г» – образец отобран на 20 см вглубь элемента; «п» – образец отобран на поверхности элемента**

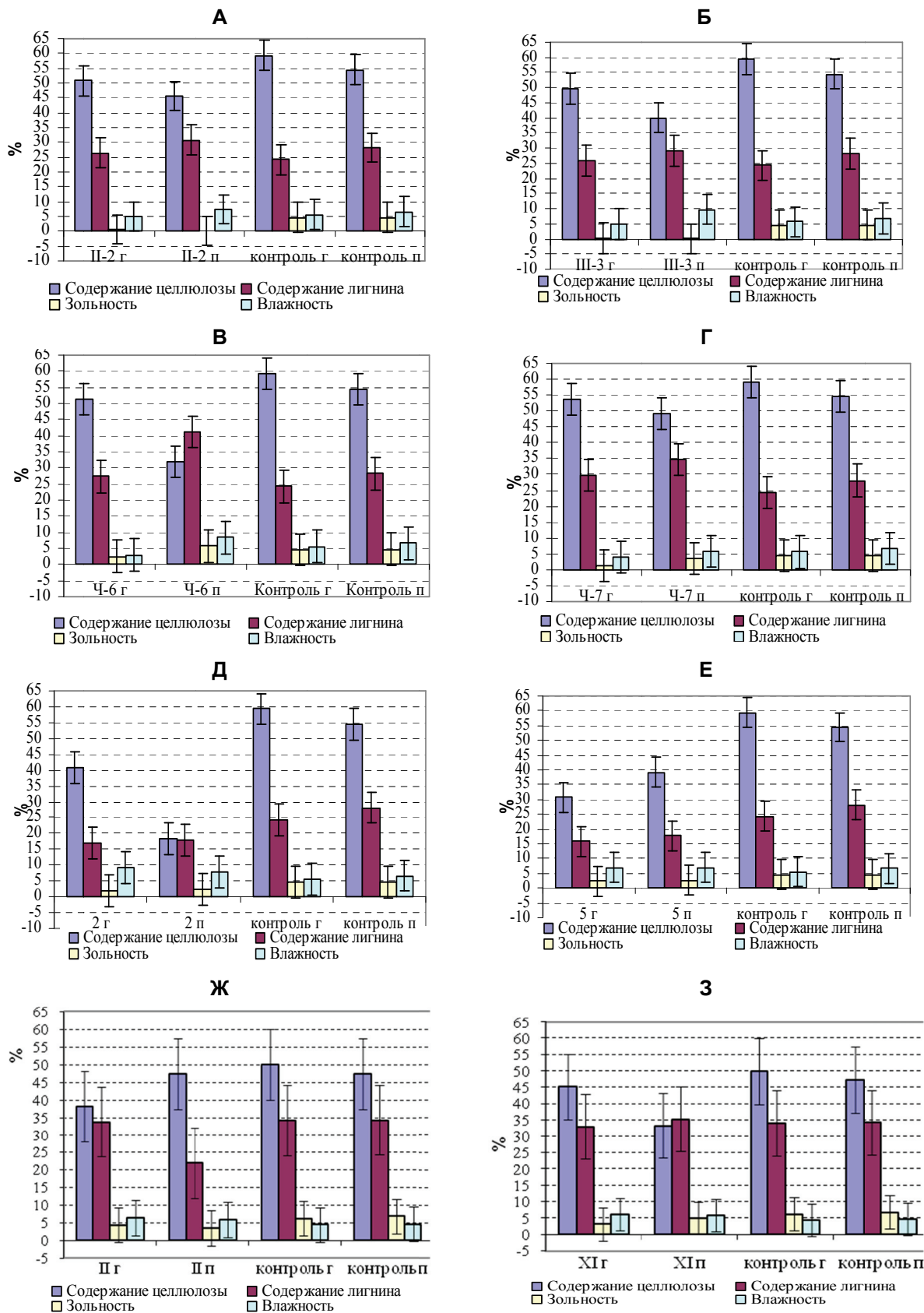
При биодеструкции II степени, осуществляемой комплексом микромицетов, выявлены как общие закономерности в изменении исследуемых показателей (здание театра), так и значительные отличия в содержании основных биополимеров древесины (рис. 4).

Содержание лигнина снижено или имеет близкие к контрольным значения в образцах, отобранных как на поверхности, так и в глубоких слоях древесины. Исключение составляют высокие показатели содержания лигнина.

В поверхностных слоях элементов стропильной системы театра (Ч-6, Ч-7) образцы содержали остатки коры. Снижение содержания лигнина в образцах древесины стропил зданий гостиницы и диспансера (рис. 4, Д, Е, Ж), по-видимому, связано с лигнолитической активностью комплекса микромицетов-колонизаторов. Содержание целлюлозы в целом ниже на поверхности, в глубоких слоях близко к контрольным значениям, что указывает на развитие поверхностного поражения грибами-биодеструкторами. Показатели влажности глубоких слоев древесины и поверхностных в пределах ошибки (рис. 4).

Зольность в 2.0–10.0 раз ниже контрольной в образцах пораженной древесины. Исключение составляет образец Ч-6, отобранный из элементов конструкций, сделанных из древесины с корой. Зольность этого образца выше контрольной в 1.2 раза. Влажность в пределах ошибки измерений. Несколько выше этот показатель по отношению к контролю в образце №2 (рис. 4).

Итак, в образцах II степени биодеструкции зданий выявлено снижение как зольности в 1.1–10.0 раз, так и содержания целлюлозы в 1.1–3.1 раза и лигнина в 1.1–1.7 раза в поверхностных и глубоких слоях элементов конструкций на фоне стойкого повышения влажности последних от поверхности в 1.2–1.5 раза вглубь элемента в 1.1–2.0 раза (рис. 4). Наиболее сильные изменения количества структурных компонентов древесины, как правило, затрагивают поверхностный слой древесины, где и развиваются микромицеты-биодеструкторы.

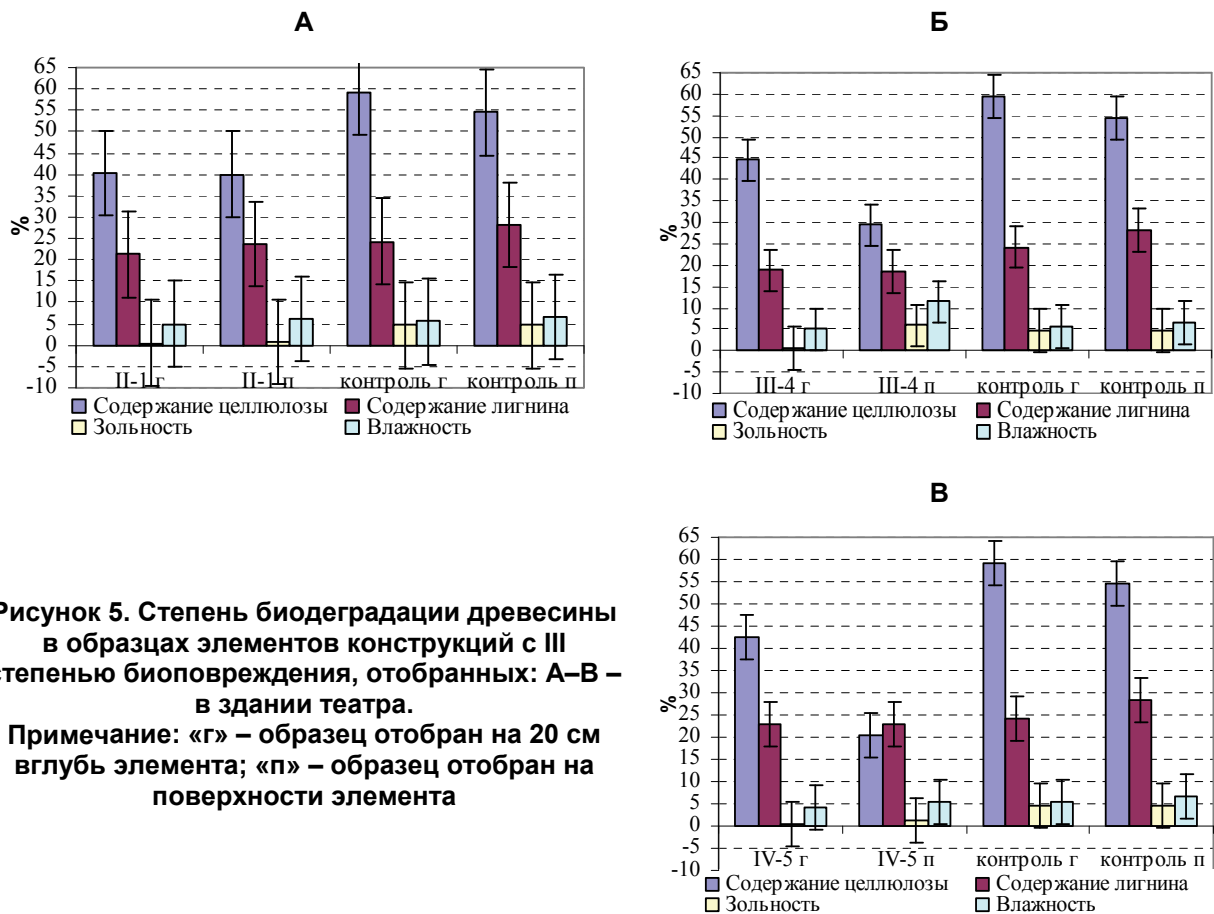


**Рисунок 4. Степень биодegradации древесины в образцах со II степенью биоповреждения, отобранных: А–Г – в здании театра; Д и Е – в здании гостиницы; Ж и З – в здании диспансера. Примечание: «г» – образец отобран на 20 см вглубь элемента; «п» – образец отобран на поверхности элемента**



При биодegradации древесины элементов конструкций с участием макромицетов–биодеструкторов и формируемых ими комплексов микромицетов происходят значительные изменения в состоянии древесины, обусловленные изменением содержания основных ее биополимеров, определяющих механические свойства. Эти изменения приводят к сукцессии комплексов микромицетов, описанной в предыдущем разделе. Выявляющие ход сукцессии показатели представлены на рисунках 5–7.

Процесс колонизации макромицетами деревянных конструкций здания театра начался с четвертого этажа (IV-5), далее перешел к третьему (III-4) и второму (II-1) этажам. Соответственно, самое низкое содержание целлюлозы в древесине элементов в образце IV-5 и самое высокое – в образце II-1. Содержание лигнина в пределах контроля: наблюдается деструктивный тип гниения, обусловленный макромицетом бурой гнили древесины, относящимся к слабым разрушителям [29] (рис. 5, А–В). Колонизация древесины макромицетами белой гнили в образцах 3 и 6 здания гостиницы находится приблизительно в одной стадии.

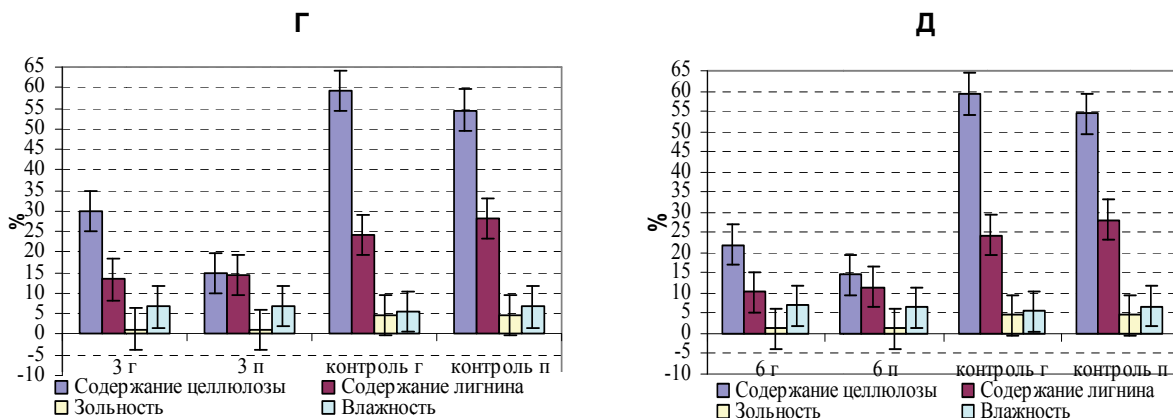


**Рисунок 5. Степень биодegradации древесины в образцах элементов конструкций с III степенью биоповреждения, отобранных: А–В – в здании театра.**

**Примечание:** «г» – образец отобран на 20 см вглубь элемента; «п» – образец отобран на поверхности элемента

Образец 3 взят из балки чердачного перекрытия, образец 6 – из наклонной стропильной ноги (большого по объему древесины элемента стропильных конструкций). В связи с наличием угла наклона благоприятные условия для развития макромицета создаются в нижней части элемента, поэтому поражение охватывает не весь элемент. Влажность участка наклонной стропильной ноги (образец 6) обычно бывает чуть выше, чем балки (образец 3), что влияет на интенсивность биодеструкции (рис. 6 Г, Д).

Биодеструкция конструктивных элементов диспансера происходила в различных температурно-влажностных условиях и началась не одновременно. Однако в связи с тем, что здание не отапливалось, и при этом кровля в последнее десятилетие сильно протекала, практически все элементы поражены биодеструкторами в значительной степени. При поражении макромицетами за несколько лет произошло разрушение большей части структурных компонентов древесины, поэтому показатели их содержания в материале снижены почти во всех образцах: в 1.5–2.8 раза целлюлоза и в 1.1–1.5 раза лигнин (рис. 7, Е–М).

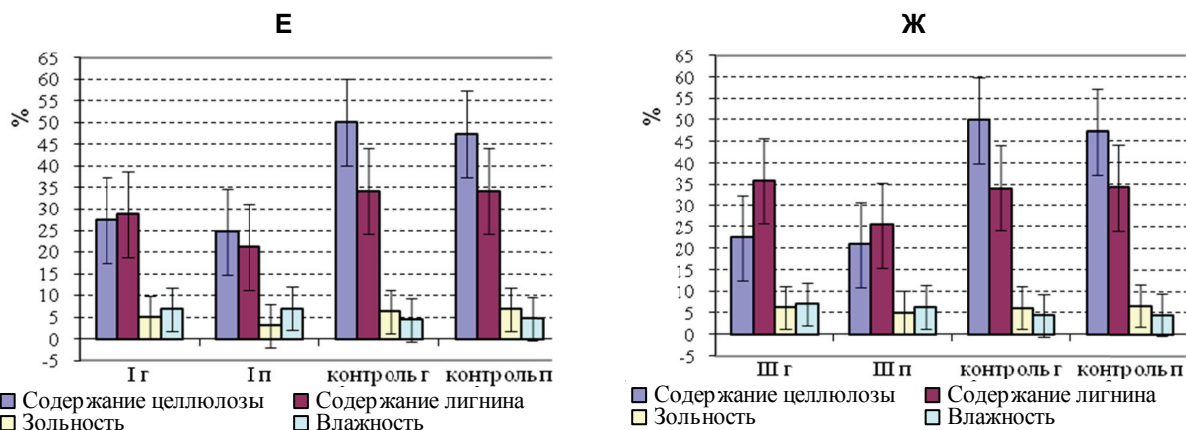


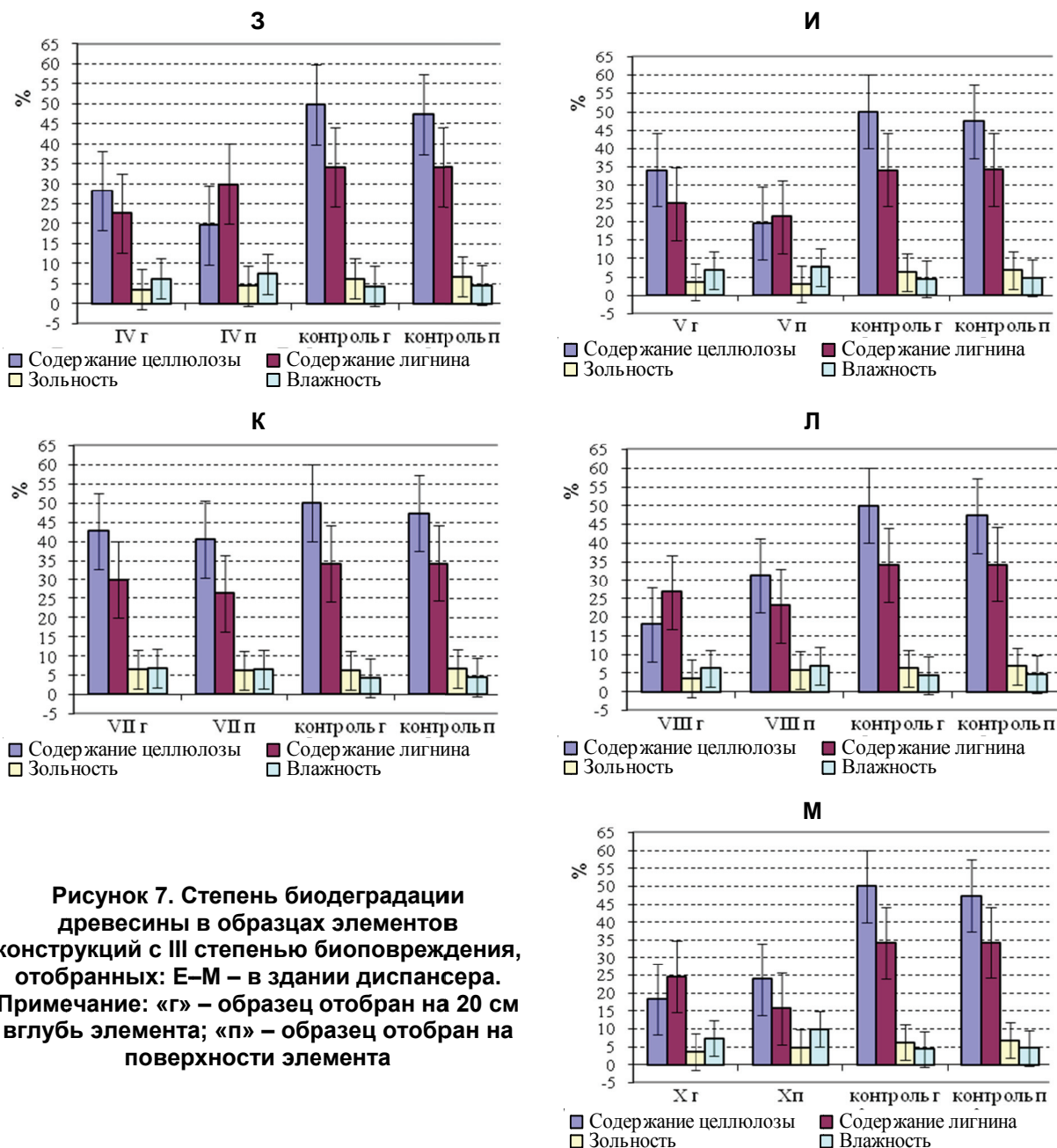
**Рисунок 6. Степень биодegradации древесины в образцах элементов конструкций с III степенью биоповреждения, отобранных: Г и Д – в здании гостиницы.**

**Примечание: «г» – образец отобран на 20 см вглубь элемента; «п» – образец отобран на поверхности элемента**

Лишь в образце VII (рис. 7, К) показатели содержания основных биополимеров древесины снижены только в 1.2–1.5 раза (целлюлоза в глубине и на поверхности) и в 1.1–1.3 раза (лигнин в глубине и на поверхности). Показатели содержания лигнина и целлюлозы, как и в других зданиях, сильнее снижены в поверхностных слоях, чем в глубоких, т. к. биодеструкция началась с поверхностных слоев при колонизации материала микромицетами. Содержание целлюлозы снижено в большей степени, чем содержание лигнина, т. к. на элементах выявлены в основном грибы бурой гнили. Зольность образцов в 3.0–9.0 раз ниже, чем контрольного образца и на поверхности, и в толще элемента. Влажность образцов в пределах или чуть выше контрольной (рис. 6, 7).

Итак, в образцах элементов конструкций с III степенью биоповреждения выявлено максимальное для каждого из зданий – объектов 3-летних исследований – снижение содержания целлюлозы в 1.4–3.8, 1.3–2.8 раза, лигнина в 1.1–2.4, 1.1–2.5 раза и зольности древесины в 1.2–7.0, 1.1–9.0 раз как на поверхности, так и в глубоких слоях деградированных элементов по сравнению с контрольными образцами древесины, не подвергшейся биодеструкции. Влажность образцов сильно деградированных элементов также достигала максимальных значений, в 1.2–2.1 раза превышая контрольные (рис. 5–7).





**Рисунок 7. Степень биодegradации древесины в образцах элементов конструкций с III степенью биоповреждения, отобранных: Е–М – в здании диспансера. Примечание: «г» – образец отобран на 20 см вглубь элемента; «п» – образец отобран на поверхности элемента**

## Выводы

В ходе исследования были выявлены следующие особенности:

- сходные тенденции изменения содержания основных биополимеров древесины при близких уровнях биодеструкции элементов;
- пропорциональное снижение содержания лигнина и целлюлозы при глубокой биодеструкции;
- уменьшение зольности субстрата более чем на 50 % по сравнению с контролем – показатель развития микогенного поражения; таким образом, зольность субстрата может служить показателем биодegradации основных компонентов древесины;
- повышение влажности более чем на 20 % по сравнению с контролем в образцах древесины – показатель развития микогенного поражения;
- снижение содержания целлюлозы более чем на 20 % по сравнению с контролем – маркер развития мягкой гнили древесины;
- уменьшение содержания лигнина более чем на 40 % по сравнению с контролем указывает на развитие лигнинразрушающих макромицетов и глубокую биодеструкцию древесины.

Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д. Химический метод оценки степени биодegradации древесины конструктивных элементов

Описанные в статье виды химического анализа можно применять в реставрационной практике для выяснения состояния древесины в связи с тем, что как поверхностная, так и глубокая разновидности биодеструкции характеризуются указанными показателями содержания целлюлозы и лигнина, а также зольностью. Приведенный анализ будет полезен в случаях, когда определить вид разрушителя невозможно в связи с отсутствием мицелия (грибницы) и плодовых тел. Кроме того, указанный способ оценки состояния поврежденной древесины позволяет количественно и достаточно точно оценить степень поражения, в то время, как оценка по объему пораженных волокон от общего объема элемента является во многом субъективной и чаще всего приблизительной.

Таким образом, выявлены сходные тенденции изменения содержания основных биополимеров древесины при близких уровнях биодеструкции элементов деревянных конструкций обследованных зданий. Эти данные могут быть использованы в дальнейшем при использовании химического метода в качестве количественной оценки степени разложения древесины под действием домовых и плесневых грибов.

### Литература

1. Humar M., Bucar B., Vek V., Pohleven F. Changes of mechanical and chemical properties of wood after brown-rot decay and blue staining // *Wood modification developments*. Heron. 2006. No. 49. Pp. 361–386.
2. Kirk T.K., Cullen D. Enzymology and molecular genetics of wood degradation by white-rot fungi // In: Young R.A., Akhtar M. (eds.) *Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry*. John Wiley & Sons Inc., 1998. Pp. 273–307.
3. Bergman R., Cai Z., Carll C.G., Clausen C.A., Dietsberger M.A., Falk R.H., Frihart C.R., Glass S.V., Hunt C.G., Ibach R.E., Kretschmann D.E., Rammer D.R., Ross R.J. *Wood handbook, Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 2010. 508 p.
4. Опарин Е.И. Древесина в условиях постоянной влажности // *Лесной журнал*. 1968. № 4. С. 47–56.
5. Zink P., Fengel D. Studies on the coloring matter of blue-stain fungi // *Holzforschung*. 1989. Vol. 43. Pp. 371–374.
6. Старцев С.А. Проблемы обследования строительных конструкций, имеющих признаки биоповреждения // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. №7. С. 41–46.
7. Curling S.F., Clausen C.A., Winandy J.E. Relationship between mechanical properties, weight loss and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay // *Forest Products Journal*. 2002. No. 52. Pp. 34–39.
8. Humar M., Vek V., Bucar B. Properties of blue-stained wood // *Drvna Industrija*. 2008. No. 59(2). Pp. 75–79.
9. Machek L., Militz H. The influence of the location of a wood defect on the modulus of elasticity determination in wood durability testing // *The International Research Group for Wood Preservation. IRG/WP 04-20287*, 2004.
10. Stephan I., Goëller S., Rudolph D. Improvements of monitoring on wood in ground contact // *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2000. No. 58. Pp. 115–119.
11. Hartley R.D. The chemistry of lignocellulosic materials from agricultural wastes in relation to processes for increasing their biodegradability // In: Meer J.M., van der, Rijkens B.A., Ferranti M.P. (eds.). *Degradation of lignocellulosics in ruminants and in industrial processes*. London and New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1987. Pp. 3–11.
12. Kontturi E.J. *Surface chemistry of cellulose: from natural fibres to model surfaces*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 149 p.
13. Lai J.-H. The bleaching response of kraft pulps from fresh and aged commercial Douglas-fir chips. An abstract of the thesis for award of the degree of master of science. Corvallis: Oregon State University, 1980. 94 p.
14. Saini V.K. Improved delignification and fiber accessibility of *Dendrocalamus strictus* by white rot fungi. Dissertation for award of the degree of doctor of philosophy in forestry. Dehradun: Forest research institute, 2011. 190 p.
15. Solar R., Kacik F., Reinprecht L., Laurova M., Geffertova J., Dibdiakova J. Effect of biotic and abiotic pretreatments of hornbeam wood on its properties interesting from the viewpoint of pulping in alkaline media. Part 2: Chemical alterations // *Bioresources*. 2008. No. 3(4). Pp. 1291–1302.

16. Степанов Б.А. Материаловедение (деревообработка). М.: Академия, 2007. 80 с.
17. Барабанщиков Ю.Г. Строительные материалы и изделия. М.: Академия, 2010. 368 с.
18. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. М.: Высшая школа, 2008. 701 с.
19. РВСН (Региональные временные строительные нормы) 20-01-2006 Санкт-Петербург Защита строительных конструкций, зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды. СПб.: Правительство Санкт-Петербурга, 2006.
20. Оболенская А.В. Практические работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1955. С. 74–89.
21. Хабаров Ю.Г. Методы определения лигнинов // Лесной журнал. 2004. №3. С. 86–102.
22. Schwanninger M., Hinterstoisser B. Klason lignin: Modification to improve the precision of the standardized determination // *Holzforschung*. 2002. Vol. 56. Pp. 161–166.
23. Бабицкая В.Г., Щерба В.В. Особенности деградации лигнина природных полимеров ксилотрофами и почвенными сапротрофами // *Микробиология*. 1994. №1. С. 65–72.
24. Дзедзюля Е.И. Участие некоторых грибных ферментов в биодegradации лигноцеллюлозных субстратов // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2001. Т. 40. №3. С. 169–214.
25. Змитрович И.В., Псурцева Н.В., Белова Н.В. Эволюционно-таксономические аспекты поиска и изучения лигнинразрушающих грибов – активных продуцентов окислительных ферментов // *Микология и фитопатология*. 2007. Т. 41. Вып. 1. С. 57–78.
26. Комаров Ф.П. Руководство к лабораторным работам по химии древесины и целлюлозы. Л.: Гослестехиздат, 1934. 56 с.
27. Ивановский Б.В. Химия угля. Л.: Изд-во ЛГИ, 1968. 80 с.
28. Арефьев С.П. Системный анализ биоты дереворазрушающих грибов. Новосибирск: Наука, 2010. 261 с.
29. Бондарцев А.С. Пособие для определения домовых грибов. М.–Л.: Изд-во Академии СССР, 1956. 98 с.
30. Марьиновская Ю.В., Севастьянова Н.Н. Микробиологическая деструкция целлюлозосодержащих отходов // *Микробиология*. 2006. №3. С. 75–81.
31. Физдель И.А. Дефекты и методы устранения биопоражения в конструкциях и сооружениях. М.: Стройиздат, 1970. 178 с.
32. Andronov E.E., Pinaev A.G., Titova J.A., Pavlov S.A., Zhivan V. I. Molecular analyses of fungal community in St. Petersburg historical sites // XV Congress of European Mycologists. Abstracts. Saint-Petersburg, 2007. Pp. 67–68.
33. Nilsson T. The degradation of cellulose and the production of cellulose, xylanase, mannanase and amylase by wood-attacking microfungi // *Studia forestalia suecica*, 1974. No. 114. 60 p.
34. Schmidt O. Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control // *Mycological Progress*. 2007. No. 6. Pp. 261–279.
35. Ванин С.И. Лесная фитопатология. М.–Л.: Гослесбумиздат, 1955. 284 с.
36. Дерево. Каталог строительных материалов и изделий. Раздел 4. / Под ред. К. С. Алабяна [и др.]. М.: Изд-во Академии Архитектуры СССР, 1948. 98 с.

*Татьяна Александровна Серова, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(905)235-99-48; эл. почта: rareavist@mail.ru*

*Юлия Анатольевна Титова, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(911)230-90-63; эл. почта: juli1958@yandex.ru*

*Юрий Дмитриевич Шенин, Санкт-Петербург, Россия  
+7(911)745-19-95; эл. почта: SheninJD@vizr.spb.ru*

© Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д., 2014

doi: 10.5862/MCE.47.9

## Chemical method of assessing the degree of biodegradation of wooden structural elements

**T.A. Serova***Specproektrestavratsiya, Saint-Petersburg, Russia  
+79052359948; e-mail: rareavist@mail.ru***J.A. Titova***All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russia  
+79112309063; e-mail: juli1958@yandex.ru***J.D. Shenin***All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russia  
+79117451995; e-mail: SheninJD@vizr.spb.ru*

### Key words

wood; chemical composition of wood; cellulose; lignin; wood destructive fungi

### Abstract

Wood is an environmentally friendly and lightweight building material that is sensible to the destruction of various biological agents at non-observance of proper temperature and humidity regime. Wood-destroying white-rot and brown-rot fungi and micromycetes (mold) have a leading position among biodestructors. These organisms use wood as the trophic base changing its chemical composition and correspondingly its mechanical properties.

We investigated changes in the content of the main biopolymers of wood (cellulose and lignin) and changes in ash content and moisture of the material under the influence of mold and wood fungi. We analyzed samples of wooden constructions with different biodestruction degree. We used chemical methods of extraction of cellulose and lignin from intact and diseased by fungi wood, method of calculation of material's moisture and ash content. It was found that, with the development of deep destructions cellulose content is reduced by 20%, lignin content is reduced by 40%. Moisture and ash content of wood can also be used as markers of a certain degree of biodegradation.

### References

1. Humar M., Bucar B., Vek V., Pohleven F. Changes of mechanical and chemical properties of wood after brown-rot decay and blue staining. *Wood modification developments. Heron*. 2006. No. 49. Pp. 361–386.
2. Kirk T.K., Cullen D. Enzymology and molecular genetics of wood degradation by white-rot fungi. In: *Young R.A., Akhtar M. (eds.). Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry*. John Wiley & Sons, Inc. 1998. Pp. 273–307.
3. Bergman R., Cai Z., Carll C.G., Clausen C.A., Dietsberger M.A., Falk R.H., Frihart C.R., Glass S.V., Hunt C.G., Ibach R.E., Kretschmann D.E., Rammer D.R., Ross R.J. *Wood handbook, Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 2010. 508 p.
4. Oparin Ye.I. Drevesina v usloviyakh postoyannoy vlazhnosti [Wood in conditions of constant humidity]. *Lesnoy zhurnal*. 1968. No. 4. Pp. 47–56. (rus)
5. Zink P., Fengel D. Studies on the coloring matter of blue-stain fungi. *Holzforschung*. 1989. Vol. 43. Pp. 371–374.
6. Startsev S.A. *Problemy obsledovaniya stroitelnykh konstruktsiy, imeyushchikh priznaki biopovrezhdeniya* [The problems of inspection of building structures with signs of biodeterioration]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No.7. Pp. 41–46. (rus)
7. Curling S.F., Clausen C.A., Winandy J.E. Relationship between mechanical properties, weight loss and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay. *Forest Products Journal*. 2002. No.52. Pp. 34–39.
8. Humar M., Vek V., Bucar B. Properties of blue-stained wood. *Drvna Industrija*. 2008. Vol. 59(2). Pp. 75–79.
9. Machek L., Milič H. The influence of the location of a wood defect on the modulus of elasticity determination in wood durability testing. *The International Research Group for Wood Preservation*. IRG/WP 04-20287, 2004.
10. Stephan I., Goëller S., Rudolph D. Improvements of monitoring on wood in ground contact. *Holz als Roh und Werkstoff*. 2000. No.58. Pp. 115–119.

Serova T.A., J.A. Titova, Shenin J.D. Chemical method of assessing the degree of biodegradation of wooden structural elements

11. Hartley R.D. The chemistry of lignocellulosic materials from agricultural wastes in relation to processes for increasing their biodegradability. In: Meer J.M., van der, Rijkens B.A., Ferranti, M.P. (eds.) *Degradation of lignocellulosics in ruminants and in industrial processes*. London and New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1987. Pp. 3–11.
12. Kontturi E.J. *Surface chemistry of cellulose: from natural fibres to model surfaces*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 149 p.
13. Lai J.-H. *The bleaching response of kraft pulps from fresh and aged commercial Douglas-fir chips. An abstract of the thesis for award of the degree of master of science*. Corvallis: Oregon State University, 1980. 94 p.
14. Saini V.K. *Improved delignification and fiber accessibility of Dendrocalamus strictus by white rot fungi. Dissertation for award of the degree of doctor of philosophy in forestry*. Dehradun: Forest research institute, 2011. 190 p.
15. Solar R., Kacic F., Reinprecht L., Laurova M., Geffertova J., Dibdiakova J. Effect of biotic and abiotic pre-treatments of hornbeam wood on its properties interesting from the viewpoint of pulping in alkaline media. Part 2: Chemical alterations. *Bioresources*. 2008. No.3(4). Pp. 1291–1302.
16. Stepanov B.A. *Materialovedeniye (derevoobrabotka)* [Science of materials (Woodwork)]. Moscow: Akademiya, 2007. 80 p. (rus)
17. Barabanshchikov Yu.G. *Stroitelnyye materialy i izdeliya* [Building materials and products]. Moscow: Akademiya, 2010. 368 p. (rus)
18. Rybyev I.A. *Stroitelnoye materialovedeniye* [Science of building materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. 701 p. (rus)
19. RVSN (Regionalnyye vremennyye stroitelnyye normy) 20-01-2006 Sankt-Peterburg Zashchita stroitelnykh konstruksiy, zdaniy i sooruzheniy ot agressivnykh khimich-eskikh i biologicheskikh vozdeystviy okruzhayushchey sredy [Regional temporary building standards 20-01-2006 Saint-Petersburg Protection of building constructions, buildings and structures of aggressive chemical and biological environmental influences]. Saint-Petersburg: Pravitelstvo Sankt-Peterburga, 2006. (rus)
20. Obolenskaya A.V. *Prakticheskiye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Practical works in the chemistry of wood and pulp]. Moscow, 1955. Pp. 74–89. (rus)
21. Khabarov Yu.G. Metody opredeleniya ligninov [Methods for lignins' identification]. *Lesnoy zhurnal*. 2004. No.3. Pp. 86–102.
22. Schwanninger M., Hinterstoisser B. Klason lignin: Modification to improve the precision of the standardized determination. *Holzforschung*. 2002. Vol. 56. Pp. 161–166.
23. Babitskaya V.G., Shcherba V.V. Osobennosti degradatsii lignina prirodnykh polimerov ksilotrofami i pochvennymi saprotrofami [Features of degradation of natural polymers' lignin by xilotrophic and soil saprotrophs]. *Mikrobiologiya*. 1994. No.1 Pp. 65–72.
24. Dzedzyulya Ye.I. Uchastiye nekotorykh gribnykh fermentov v biodegradatsii lignotsellyuloznykh substratov [The participation of some fungal enzymes in the biodegradation of lignocellulosic substrates]. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2001. Vol. 40. No.3. Pp. 169–214. (rus)
25. Zmitrovich I.V., Psurtseva N.V., Belova N.V. Evolyutsionno-taksonomicheskiye aspekty poiska i izucheniya ligninrazrushayushchikh gribov – aktivnykh produtsentov oksilitelnykh fermentov [Evolutionary and taxonomic aspects of finding and exploring ligningdestructing mushrooms - active producers of oxidative enzymes]. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2007. Vol. 41. No.1. Pp. 57–78. (rus)
26. Komarov F.P. *Rukovodstvo k laboratornym rabotam po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Manual for laboratory works in chemistry of wood and pulp]. Leningrad: Goslestekhzdat, 1934. 56 p. (rus)
27. Ivanovskiy B.V. *Khimiya uglja* [Coal chemistry]. Leningrad: Izd-vo LGI, 1968. 80 p. (rus)
28. Arefyev S.P. *Sistemnyy analiz bioty derevorazrushayushchikh gribov* [System analysis of wood-destroying fungi's biota]. Novosibirsk: Nauka, 2010. 261 p. (rus)
29. Bondartsev A.S. *Posobiye dlya opredeleniya domovykh gribov* [A manual for identification of house fungi]. Moscow–Leningrad: Izd-vo Akademii SSSR, 1956. 98 p. (rus)
30. Marinovskaya Yu.V., Sevastyanova N.N. Mikrobiologicheskaya destruktziya tsellyulozosoderzhashchikh otkhodov [Microbiological degradation of cellulose-containing waste]. *Mikrobiologiya*. 2006. No.3. Pp. 75–81. (rus)
31. Fizdel I.A. *Defekty i metody ustraneniya bioporazheniya v konstruksiyakh i sooruzheniyakh* [Defects and methods of elimination of biodestruction of constructions and buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 178 p. (rus)

32. Andronov E.E., Pinaev A.G., Titova J.A., Pavlov S.A., Zhivan V. I. Molecular analyses of fungal community in St. Petersburg historical sites. *XV Congress of European Mycologists. Abstracts*. Saint-Petersburg, 2007. Pp. 67–68.
33. Nilsson T. The degradation of cellulose and the production of cellulose, xylanase, mannanase and amylase by wood-attacking microfungi. *Studia forestalia suecica*. 1974. No.114. 60 p.
34. Schmidt O. Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress*. 2007. No.6. Pp. 261–279.
35. Vanin S.I. *Lesnaya fitopatologiya* [Forest phytopathology]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1955. 284 p. (rus)
36. *Derevo. Katalog stroitelnykh materialov i izdeliy* [The catalogue of building materials and products]. Part 4. Edited by K.S. Alyaban. Moscow: Izd-vo Akademii Arkhitektury SSSR, 1948. 98 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 77–89**