

- Severa: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (29-30 marta 2012 g.). YAkutsk: Izdatel'skiy dom SVFU, 2013. P. 48-63.
31. Nikolaev A.N. The influence of soil temperature on the radial growth of larch and pine trunks in Central Yakutia // Science and Education. 2004. № 2 (34). P. 15-19.
 32. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. Environmental technologies for cutting wood in the conditions of the North-Western region of the Russian Federation. Spb.: LTA, 2008. 174 p.
 33. Ershov YU.I. Features of geography and genesis of permafrost soils of the subarctic of Central Siberia // Sovremennyye problemy merzlotnogo pochvovedeniya i prikladnoj ekologii Severa: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (29-30 marta 2012 g.). YAkutsk: Izdatel'skiy dom SVFU, 2013. P. 113-117.
 34. Zorin M.V., Kunickaya O.A. Types of modern plastic plates for the construction of temporary forest roads and technological corridors // Derevyannoe domostroenie Severa: tradicii i innovacii: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (14-15 fevr. 2023 g.). Petrozavodsk, 2023. P. 28-30.
 35. Zorin M.V., Kunickaya O.A. Modern collapsible coatings for the construction of temporary forest roads and technological corridors // Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 54-57.

УДК 630*812.7

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-101-105

Физико-механические свойства затопленной древесины ели сибирской и перспективы ее использования

Е.М. Рунова^a, Н.П. Плотников^b, И.Н. Челышева^c, П.С. Медведева^d

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a runova0710@mail.ru, ^b n-plotnikov@mail.ru, ^c irinachelysheva@yandex.ru, ^d ms.polina.medvedeva.2015@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>,^c <https://orcid.org/0000-0003-1017-5149>

Статья поступила 30.10.2023, принята 13.11.2023

*Комплексное использование древесины является актуальной проблемой лесного комплекса, при этом практически не освещаются вопросы комплексного использования древесины, затопленной в водохранилищах при строительстве ГЭС. Изучены физико-механические свойства древесины ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb), затопленной в акватории Братского водохранилища и пролежавшей в воде более 10 лет. Исследование образцов древесины ели сибирской проводилось согласно общепринятым методикам. Установлено, что физические свойства древесины затопленной ели сибирской существенно отличаются от справочных данных, приведенных в ГССД. Ширина годичных слоев в 1,8 раза превышает табличные данные, процент поздней древесины несколько ниже стандартного значения на 10,8 %. Плотность затопленной ели и базовая плотность оказались существенно меньше справочных данных соответственно на 32,34 и 27,12 %. Коэффициенты усушки в тангенциальном и радиальном направлении и объемный коэффициент усушки оказались меньше справочных данных. Объемный коэффициент усушки составил 0,294, что меньше справочных данных на 18,33 %. Показатели прочности древесины при сжатии вдоль волокон составили всего 15,43 МПа, что на 69,02 % меньше приводимых справочных данных. Предел прочности при статическом изгибе составил 44,26 МПа, что меньше табличных данных на 45,69 %. Также относительно небольшая прочность у испытуемых образцов при скалывании вдоль и поперек волокон. Таким образом, установлено, что длительное пребывание ели в воде вызывает ухудшение прочностных свойств древесины и ограничивает возможности ее использования.*

Ключевые слова: затопленная древесина; ель сибирская; испытания; плотность древесины; механические свойства.

Physico-mechanical properties of submerged Siberian spruce wood and prospects for its use

Е.М. Runova^a, N.P. Plotnikov^b, I.N. Chelysheva^c, P.S. Medvedeva^d

Bratsk State University; 40, Makarenko, Bratsk, Russia

^a runova0710@mail.ru, ^b n-plotnikov@mail.ru, ^c irinachelysheva@yandex.ru, ^d ms.polina.medvedeva.2015@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0001-6178-4038>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>,^c <https://orcid.org/0000-0003-1017-5149>

Received 30.10.2023, accepted 13.11.2023

*The integrated use of wood is an urgent problem of the forest complex, while the issues of the integrated use of wood submerged in reservoirs during the construction of hydroelectric power plants are practically not covered. The physical and mechanical properties of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb), submerged in the Bratsk reservoir, which has been in water for more than 10 years, are studied. Studies of samples of Siberian spruce wood are carried out according to generally accepted methods. It is established that the physical properties of the wood of the submerged Siberian spruce differ significantly from the reference data given in the State Standard Reference Data Service. The width of the annual layers is 1.8 times higher than the tabular data; the percentage of late wood is slightly lower*

than the standard value by 10.8%. The density of the submerged spruce and the base density are significantly less than the reference data by 32.34% and 27.12%, respectively. The shrinkage coefficients in the tangential and radial directions and the volumetric shrinkage coefficient are less than the reference data. The volume shrinkage coefficient is 0.294, which is 18.33% less than the reference data. The strength of wood under compression along the fibers is only 15.43 MPa, which is 69.02% less than the reference data provided. The tensile strength at static bending is 44.26 MPa, which is 45.69% less than the tabular data. Also, the strength of the tested samples is relatively small when chipping along and across the fibers. Thus, it has been found that the prolonged stay of spruce in water causes deterioration of the strength properties of wood and limits the possibilities of its use.

Keywords: submerged wood; Siberian spruce; tests; wood density; mechanical properties.

Введение. Очистка рек и водохранилищ от затопленной древесины является глобальной экологической и технологической проблемой. Ангаро-Енисейский каскад гидроэлектростанций и водохранилищ представляет огромные по площади водоемы, которые были сплошь покрыты спелыми и перестойными лесами. Не везде при заполнении водохранилищ выполнены условия лесосводки, также запасы затопленной древесины пополнялись при водном транспорте леса, при подмыве и разрушении берегов. Наиболее точно определены объемы затопленной на корню, заготовленной и затопленной древесины для Братского водохранилища, которое является одним из крупнейших водохранилищ в нашей стране и в мире. По оценкам специалистов, в водохранилище находится от 5 до 9 млн м³ древесины, которые в настоящее время практически не используются, затрудняют судоходство, ухудшают качество воды и рыбных ресурсов. Поэтому изучение потребительских свойств древесины является не только производственной проблемой, но и экологической, экономической, что позволит сократить вырубку лесопокрытой территории [1; 2].

Цель работы — исследование физических и механических свойств древесины ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb), пролежавшей в воде более 10 лет.

Методика исследования. Стволы ели сибирской, полностью покрытые водой, извлекались из Братского водохранилища с использованием лебедки, установленной на плавучем средстве. Глубина взятия образцов — 2 м, заготовленные стволы ели предварительно высушивались в тени под навесом, затем распиливались. Образцы брались из нижней бессучковой части ствола. Для исследования использовались общепринятые методы исследования [3–7]. Первоначально проведено исследование макроскопического и анатомического исследования древесины [8]. Затем определены физиче-

ские свойства древесины, такие как средняя ширина годичного слоя, число годичных слоев в 1 см поперечного разреза, процент поздней древесины, влажность образцов, плотность, усушка образцов в различных направлениях. Из механических свойств древесины определялись наиболее распространенные: предел прочности на сжатие вдоль и поперек волокон, предел прочности на скалывание вдоль и поперек волокон, предел прочности на статический изгиб при пересчете на влажность 12 %. Полученные результаты обрабатывались статистически с использованием программы *Microsoft Excel* и критерия Колмогорова – Смирнова.

Результаты исследований и их обсуждение. При осмотре заготовленных образцов ели было установлено, что затопленная древесина приобрела неравномерно серую и серо-бурую окраску. Годичные слои хорошо выражены, переходная зона между ранней и поздней древесиной слабо выражена. Древесина имеет среднюю плотность, широкослойная. Среднее количество годичных слоев в образцах древесины 3,2; процент поздней древесины — 22,3 %. Образцы имеют очень слабый терпеновый запах. Анатомическое исследование древесины показало, что имеются нарушения структуры древесины, которые могут привести к ухудшению физико-механических свойств древесины [8; 10–13].

Были определены физические и механические показатели древесины затопленной ели, поднятой со дна акватории Братского водохранилища в 2021 и 2022 гг., на образцах в общем количестве 178 шт. Образцы были подготовлены в соответствии с требованиями стандарта.

В табл. 1 приведены результаты исследования физических свойств затопленной древесины ели сибирской в сравнении с нормируемыми справочными данными (Государственная служба стандартных справочных данных — ГССД) [9].

Таблица 1. Сводная таблица результатов исследования физических свойств ели затопленной в сравнении с нормируемыми справочными показателями.

Наименование показателя	Значение показателя			Отклонения от табличного значения абсолютное /относительное, %
	Количество опытов, <i>n</i>	Среднее арифметическое значение показателя	Табличные значения показателей ГССД	
Количество годичных слоев в 1 см	29	3,2	9,0	$\frac{-5,8}{-64,4}$
Средняя ширина годичного слоя, мм	29	3,13	1,11	$\frac{2,02}{182,0}$
Процент поздней древесины, %	29	22,3	25,0	$\frac{-2,7}{-10,8}$
Плотность во влажном состоянии, кг/м ³	29	626,87	–	–
Плотность в абсолютно сухом состоянии, кг/м ³	29	284,15	420	$\frac{-135,85}{-32,34}$
Плотность базисная, кг/м ³	29	265,99	365	$\frac{-99,01}{-27,12}$
Коэффициент усушки по радиальному направлению	29	0,089	0,11	$\frac{-0,021}{-19,09}$
Коэффициент усушки по тангенциальному направлению	29	0,158	0,24	$\frac{-0,082}{-34,16}$
Коэффициент усушки по объему	29	0,294	0,36	$\frac{-0,066}{-18,33}$

На основании полученных результатов определено, что образцы ели затопленной имеют достаточно большую ширину годовичных слоев (3,13 мм), что в 1,8 раза превышает табличные данные, процент поздней древесины несколько ниже стандартного значения на 10,8 %. Ширина годовичного слоя и процент поздней древесины находятся в тесной зависимости с плотностью и прочностными свойствами древесины. Как и следовало ожидать, плотность затопленной ели и базовая плотность оказались существенно меньше справочных данных соответственно на 32,34 и 27,12 %. Коэффициенты усушки в тангенциальном и радиальном направлении и объемный коэффициент

усушки оказались меньше справочных данных. Объемный коэффициент усушки составил 0,294, что меньше справочных данных на 18,33 %.

Показатели прочности древесины являются определяющими при использовании затопленной древесины ели [14–16]. В табл. 2 приведены результаты исследования основных прочностных показателей (предела прочности на сжатие вдоль и поперек волокон, предела прочности при статическом изгибе, предела прочности при скалывании вдоль и поперек волокон).

Таблица 2. Сводная таблица результатов исследования механических свойств ели затопленной в сравнении с нормируемыми справочными показателями

Наименование показателя	Количество опытов, <i>n</i>	Среднее арифметическое значение показателя	Табличные значения показателей ГСССД	Отклонения от табличного значения абсолютное /относительное, %
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, при $W=12\%$, МПа	30	15,429	49,8	$\frac{-34,37}{-69,02}$
Предел прочности при сжатии поперек волокон, при $W=12\%$, МПа	30	2,693	Нет данных	–
Предел прочности при статическом изгибе, при $W=12\%$, МПа	27	44,257	81,5	$\frac{-37,24}{-45,69}$
Предел прочности при скалывании вдоль волокон в радиальном направлении, при $W=12\%$, МПа	31	4,730	7,27	$\frac{-2,54}{-34,94}$
Предел прочности при скалывании вдоль волокон в тангенциальном направлении, при $W=12\%$, МПа	31	3,756	7,38	$\frac{-3,62}{-9,05}$

Как видно из табл. 2, показатели прочности древесины при сжатии вдоль волокон составили всего 15,43 МПа, что на 69,02 % меньше приводимых справочных данных. Предел прочности при статическом изгибе также существенно меньше нормативных данных 44,26 МПа, что меньше табличных данных на 45,69 %. Также сравнительно небольшая прочность у испытуемых образцов при скалывании вдоль и поперек волокон меньше табличных значений соответственно на 34,94 и 49,05 %.

Все полученные результаты были статистически обработаны по методике Колмогорова – Смирнова. В качестве примера на рис. 1 приведены гистограммы с наложенными на них кривыми нормального распределения, показывающие, что распределение полученных результатов соответствует кривой нормального распределения.

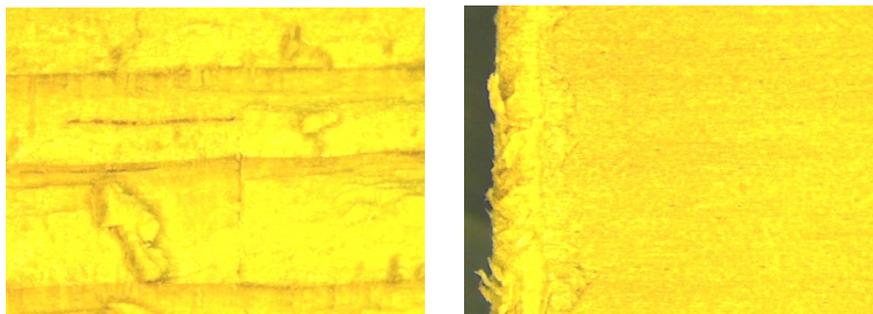


Рис. 1. Внешний вид древесины затопленной ели

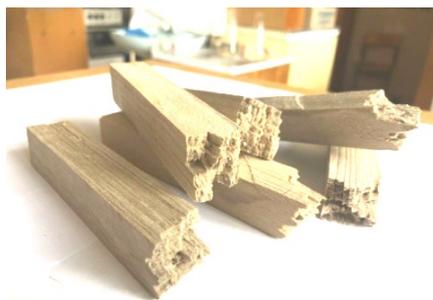


Рис. 2. Образцы ели после испытания на статический изгиб. Место излома слабо-зашепистое, что свидетельствует о хрупкости древесины

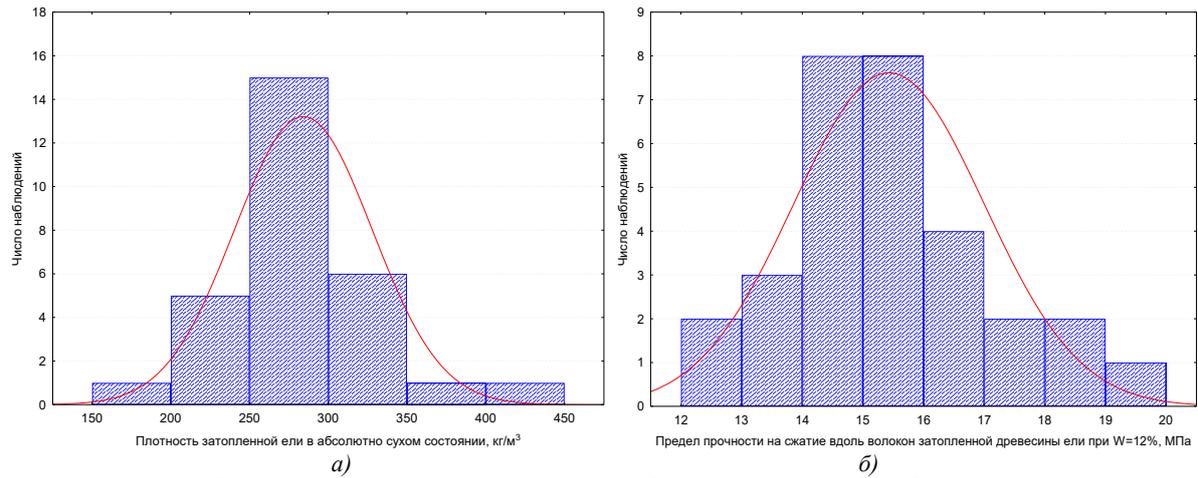


Рис. 3. Гистограмма распределения количества образцов по плотности в абсолютно сухом состоянии с графиком нормального распределения (а); гистограмма распределения количества образцов по пределу прочности на сжатие при W 12 % с графиком нормального распределения (б)

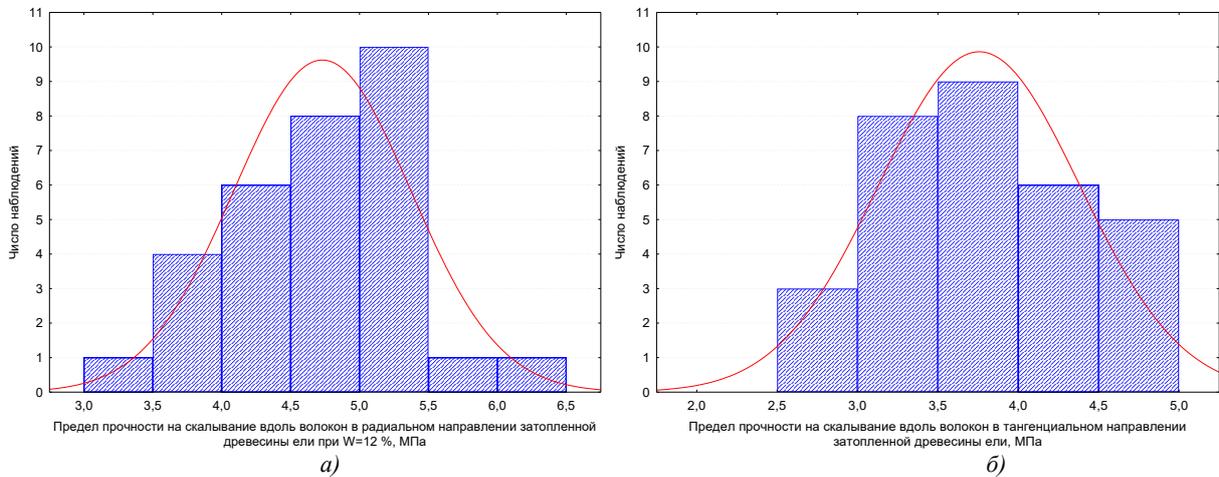


Рис. 4. Гистограмма распределения количества образцов по пределу прочности на скалывание в радиальном направлении при W 12 % с графиком нормального распределения (а); гистограмма распределения количества образцов по пределу прочности на скалывание в тангенциальном направлении при W 12 % с графиком нормального распределения (б)

Таблица 3. Описательные статистики результатов испытаний древесины затопленной ели сибирской

Показатель	Количество наблюдений	Среднее арифметическое	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Плотность затопленной ели в абсолютно сухом состоянии, кг/м³	29	284,155	1 918,260	43,797	15,41	0,639	1,698
Базисная плотность затопленной ели, кг/м³	29	265,993	175,489	13,247	4,98	-0,144	-0,817
Предел прочности на сжатие поперек волокон при W=12 % затопленной ели, МПа	30	2,693	0,095	0,308	11,45	-0,112	-0,338
Предел прочности на сжатие вдоль волокон при W=12 % затопленной ели, МПа	30	15,429	2,470	1,571	10,17	0,386	-0,105
Предел прочности при статическом изгибе затопленной ели при W=12 %, МПа	27	44,257	97,111	9,854	22,27	-0,904	-0,521
Предел прочности на скалывание вдоль волокон в радиальном направлении затопленной ели при W=12 %, МПа	31	4,730	0,412	0,642	13,58	-0,085	-0,352
Предел прочности на скалывание вдоль волокон в тангенциальном направлении затопленной ели при W=12 %, МПа	31	3,756	0,393	0,627	16,7	0,359	-0,571

Данные табл. 3 подтверждают гипотезу о нормальном распределении полученных данных о прочностных свойствах образцов ели, затопленной в акватории Братского водохранилища.

Заключение. Результаты исследования позволяют сделать выводы, что древесина ели сибирской, пролежавшая в воде не менее 10 лет, теряет свою плотность и прочностные свойства. Так, существенно, на 27,12 % снижается базисная

плотность древесины, на 69,02 % снижается предел прочности при сжатии вдоль волокон, на 45,69 % снижается предел прочности при статическом изгибе по сравнению с данными ГССД. Снижение прочностных свойств ели затопленной делает ее малопривлекательной для использования в строительстве и получении пиломатериалов, но древесина вполне пригодна для получения композитных материалов [17–20].

Литература

1. Иванов В.А. Обоснование технологии заготовки и направлений использования древесины, затопленной в ложе водохранилищ: автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. СПб., 2001. 20 с.
2. Корпачев В.П., Андрияс А.А., Пережилин А.И. Проблемы освоения плавающей древесной массы на водохранилищах ГЭС Сибири // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 2 (53). С. 134-139.
3. ГОСТ 16483.1-84. Древесина. Метод определения плотности. Введ. 01.07.85. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
4. ГОСТ 16483.3-84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
5. ГОСТ 16483.5-73. Древесина. Методы определения предела прочности при скальвании вдоль волокон. Введ. 01.07.74. М.: Изд-во стандартов, 1973. 7 с.
6. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. М.: Изд-во стандартов, 1972. 4 с.
7. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине / под ред. Б.Н. Уголева. М.: Лесная пром-сть, 1989. 296 с.
8. Аксенов П.А., Рунова Е.М., Плотников Н.П. Исследование макро- и микростроения затопленной древесины ели // Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI, № 4. С. 339-345.
9. ГСССД 69-84 Древесина. Показатели физико-механических свойств малых чистых образцов. М.: Изд-во стандартов, 1985. 32 с.
10. Губин И.В., Гудаева Е.А. Исследование физико-механических свойств топяковой древесины // Дни науки-2007. Технические науки. Строительство и архитектура: материалы III Междунар. науч.-практической конф. Днепропетровск: Наука и образование, 2007. Т. 11. С. 15-17.
11. Ушаков А.С. О некоторых свойствах затопленной древесины // Водные ресурсы региона, их охрана и рациональное использование: сб. ст. 10-й экологической конф. студентов, магистрантов и аспирантов (24 нояб. 2014 г.). Красноярск: Сиб. гос. технологический ун-т, 2014. С. 61-65.
12. Сафин Р.Г. Технология изделий из древесины. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 226 с.
13. Pearce F. The logger of the lake // New Scientist 11 August 2001 P. 38.
14. Klingbeil C. Lost treasures // Tracks & treads. Spring. 2011. P. 17-19.
15. Harvesting an underwater forest // International Forest Industries Magazine. Electronic data. URL: <http://www.internationalforestindustries.com> (дата обращения: 11.12.2016).
16. Perham R.E. Elements of floating-ebri control systems. Final report. Department of the Army. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Washington, 1988. 52 p.
17. Soine H. Holzwerkstoffe - Herstellung und Verarbeitung, Stuttgart: DRW Verlag, 1995.
18. Pizzi A. Advanced Wood Adhesives Technology. Basel: Marcel Dekker Inc., 1994. 289 p.
19. Utgof S.S., Ignatovich L.V. Mathematical modeling application to determine effect of technological factors on physical and mechanical properties of densified low deciduous wood // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 5-6. P. 59-63.
20. Рунова Е.М., Чельшева И.Н., Кузнецов В.С. Возможность использования топяковой древесины лиственницы в деревообработке // Естественные и инженерные науки - развитию регионов: материалы межрегион. науч.-технической конф. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2005. С. 143-144.

References

1. Ivanov V.A. Justification of harvesting technology and directions of use of wood flooded in the bed of reservoirs: avtoref. dis. ... na soisk. uchen. step. d-ra tekhn. nauk. SPb., 2001. 20 p.
2. Korpachev V.P., Andriyas A.A., Perezhilin A.I. Problems of development of floating wood pulp in the reservoirs of hydroelectric power stations in Siberia // The Bulletin of KrasGAU. 2011. № 2 (53). P. 134-139.
3. GOST 16483.1-84. Wood. Method for determining density. Vved. 01.07.85. M.: Izd-vo standartov, 1984. 7 p.
4. GOST 16483.3-84. Wood. Method for determining the ultimate strength in static bending. M.: Izd-vo standartov, 1984. 7 p.
5. GOST 16483.5-73. Wood. Methods for determining the tensile strength during shearing along the fibers. Vved. 01.07.74. M.: Izd-vo standartov, 1973. 7 p.
6. GOST 16483.7-71. Wood. Methods for determining humidity. M.: Izd-vo standartov, 1972. 4 p.
7. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Handbook on wood / pod red. B.N. Ugoleva. M.: Lesnayaya prom-st', 1989. 296 p.
8. Aksenov P.A., Runova E.M., Plotnikov N.P. Study of the macro- and microstructure of flooded spruce wood // Conifers of the boreal zone. 2023. V. XLI, № 4. P. 339-345.
9. GSSSD 69-84 Wood. Indicators of physical and mechanical properties of small pure samples Drevesina.. M.: Izd-vo standartov, 1985. 32 p.
10. Gubin I.V., Gudaeva E.A. Study of the physical and mechanical properties of driftwood // Dni nauki-2007. Tekhnicheskie nauki. Stroitel'stvo i arhitektura: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie, 2007. V. 11. P. 15-17.
11. Ushakov A.S. About some properties of flooded wood // Vodnye resursy regiona, ih ohrana i racional'noe ispol'zovanie: sb. st. 10-j ekologicheskoy konf. studentov, magistrantov i aspirantov (24 noyab. 2014 g.). Krasnoyarsk: Sib. gos. tekhnologicheskij un-t, 2014. P. 61-65.
12. Safin R.G. Technology of wood products. Kazan': Izd-vo KNITU, 2016. 226 p.
13. Pearce F. The logger of the lake // New Scientist 11 August 2001 P. 38.
14. Klingbeil C. Lost treasures // Tracks & treads. Spring. 2011. P. 17-19.
15. Harvesting an underwater forest // International Forest Industries Magazine. Electronic data. URL: <http://www.internationalforestindustries.com> (data obrashcheniya: 11.12.2016).
16. Perham R.E. Elements of floating-ebri control systems. Final report. Department of the Army. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Washington, 1988. 52 p.
17. Soine H. Holzwerkstoffe - Herstellung und Verarbeitung, Stuttgart: DRW Verlag, 1995.
18. Pizzi A. Advanced Wood Adhesives Technology. Basel: Marcel Dekker Inc., 1994. 289 p.
19. Utgof S.S., Ignatovich L.V. Mathematical modeling application to determine effect of technological factors on physical and mechanical properties of densified low deciduous wood // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 5-6. P. 59-63.
20. Runova E.M., Chelysheva I.N., Kuznecov V.S. Possibility of using larch bog wood in woodworking // Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov: materialy mezhtregion. nauch.-tekhnicheskoy konf. Bratsk: GOU VPO «BrGU», 2005. P. 143-144.