

Оригинальная статья

## Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов

Т. М. Соловьев<sup>✉</sup>, Т. А. Исакова, В. В. Павлова, Г. В. Ботвин, А. А. Чириков,  
В. В. Петров, Е. С. Петухова

Лаборатория технологий и переработки сырья мамонтовой фауны  
Якутского научного центра СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация  
<sup>✉</sup>[tuskulsolovev@yandex.ru](mailto:tuskulsolovev@yandex.ru)

### Аннотация

В настоящее время, согласно существующей нормативной документации, определение сорта бивней мамонта (БМ) производится на основании их внешнего вида (целостность и геометрические параметры) без учета таких характеристик сырья, как особенности минерализации, механические свойства, влажность и пр. Однако, как показывает практика, данные характеристики БМ определяют подходы к хранению и косторезной обработке изучаемого сырья. Поэтому цель данной работы состояла в изучении особенностей минерализации и выявлении зависимостей между физико-механическими свойствами БМ и их сортом. В работе использованы образцы БМ I–IV сортов. Минеральный состав изучали методом рентгенофазового анализа. Определен показатель максимального влагонасыщения и исследована динамика изменения массы после просушивания в зависимости от сорта БМ, а также установлена зависимость физико-механических свойств различных сортов БМ от их влажности. Рентгенофазовый анализ показал, что БМ III и IV сортов отличаются от БМ I и II сортов наличием примесей фосфатных минералов. Установлено, что на показатель максимального водонасыщения и на характер потери влаги значительное влияние оказывает наличие трещин и пор в исследуемых образцах. Результаты исследования физико-механических свойств образцов БМ показали, что с увеличением содержания влаги прочность при сжатии снижается. Физико-механические свойства БМ практически не зависят от их сортности.

**Ключевые слова:** бивень мамонта, сортность бивня мамонта, рентгенофазовый анализ, минеральные примеси, максимальное водонасыщение, динамика потери влаги, прочность при сжатии

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (НИОКТР № 122042000008-5). Физико-механические испытания были проведены на базе ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН к.г.-м.н., с.н.с. Заякиной Н.В., к.б.н. вед. инж. Васильевой Т.И. за помощь в исследовании минерального состава БМ.

**Для цитирования:** Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С. Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):495–506. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506>

Original article

## Mineral composition, physical and mechanical properties of mammoth tusks of different grades

T. M. Solovev<sup>✉</sup>, T. A. Isakova, V. V. Pavlova, G. V. Botvin, A. A. Chirikov,  
V. V. Petrov, E. S. Petukhova

Laboratory for Technologies and Processing of Raw Materials of Mammoth Fauna,  
Yakut Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation  
<sup>✉</sup>[tuskulsolovev@yandex.ru](mailto:tuskulsolovev@yandex.ru)

### Abstract

According to current regulations, mammoth tusk (MT) grades are identified based on their appearance (integrity and geometric parameters), without considering their mineralization features, mechanical properties, and humidity. How-

ever, these characteristics specify approaches for the storage and bone cutting processing of raw materials. This study aimed to investigate the features of mineralization and the relationships between the physical and mechanical properties of MT and their grades. We studied MT samples from Grades I to IV. Their mineral compositions were determined using X-ray phase analysis. The indicators of maximum moisture saturation and dynamics of the change in mass after drying were identified according to the MT grade. The dependence of the physical and mechanical properties of various grades of MT on their moisture content was established. X-ray phase analysis revealed that MT Grades III and IV differed from Grades I and II in the presence of phosphate mineral impurities. We found that the presence of cracks and pores in the studied samples significantly affected the index of maximum water saturation and nature of moisture loss. The study of the physical and mechanical properties of the MT samples showed that with an increase in moisture content, the compressive strength decreased. We also proved that the physical and mechanical properties of MT did not depend on their grades.

**Keywords:** mammoth tusk, grade of mammoth tusk, X-ray phase analysis, mineral impurities, indicator of maximum water saturation, moisture loss dynamics, compressive strength

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (number 122042000008-5). Physical and mechanical tests were carried out at the Core Shared Research Facilities (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant number 13.CSRF.21.0016).

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the employees of the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: N.V. Zayakina, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, and T.I. Vasilyeva, Cand. Sci. (Biol.), Senior Engineer, for their help in studying the mineral composition of the mammoth tusks.

**For citation:** Solovlev T.M., Isakova T.A., Pavlova V.V., Botvin G.V., Chirikov A.A., Petrov V.V., Petukhova E.S. Mineral composition, physical and mechanical properties of mammoth tusks of different grades. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):495–506. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506>

## Введение

Бивень мамонта (БМ) (ископаемая мамонтовая кость (ИМК)) – сырье биогенного происхождения, в течение десятков тысяч лет захороняемое в толщах мерзлотных отложений, характеризуется чрезвычайно высокой чувствительностью к воздействию различных факторов окружающей среды [1–4]. В результате термоабразии берегов морей, рек и крупных тундровых озер с высокими ярами происходит разрушение реликтов позднелепесточеновой лессово-ледовой формации, в частности, едомного комплекса, с выпадением бивней и других костных остатков животных мамонтовой фауны из вмещающих пород во внешнюю среду, включая водные объекты [5]. Перепады температур, воздействие солнечного излучения, ветров, а также микробиологическое заражение приводят к достаточно быстрой деградации костного сырья, снижая его сортность вплоть до состояния, непригодного для обработки [6–11]. Следует отметить, что главным фактором, приводящим к растрескиванию тела БМ, является резкое снижение влажности материала, в особенности БМ, которые были добыты со дна водоемов и были изначально перенасыщены влагой [12].

В настоящее время определение сортности БМ проводится на основе разработанного Национальным мамонтовым фондом Республики Саха (Яку-

тия) и Всемирным музеем мамонта (г. Якутск) документа «Технические условия на ископаемый бивень и его обломки, добываемые на территории Республики Саха (Якутия) ТУ 421-001-92», а также с учетом более раннего документа «Кость мамонтовая в сырье, ТУ 41-07-006-81», использовавшегося СПО «Северкварцсамоцветы» в 1982–1984 гг. [13]

Согласно существующей нормативной документации [13], к I сорту относят БМ без повреждений, приведших к утратам (кроме прижизненных); вещество бивней сухое, без трещин, минимальный диаметр при выходе из альвеолы – 10 см; фрагменты без трещин, диаметр минимальный – 10 см, длина минимальная – 30 см (рис. 1).

Ко II сорту относят бивни целые или поврежденные с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с отдельными (не более трех) продольными трещинами глубиной до 30 % диаметра; диаметр минимальный – 7,5 см; фрагменты с трещинами (не более трех), диаметр минимальный – 7,5 см, длина минимальная – 20 см (рис. 2).

Бивни III сорта представляют собой бивни целые или поврежденные с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с несколькими продольными трещинами глубиной до 50 % диаметра и/или с концентрическими трещинами в краевой

зоне; диаметр минимальный – 5 см; длина минимальная – 10 см (рис. 3).

БМ IV сорта (синонимы: «несортовой материал», щепя) – это фрагменты бивней в виде обломков или щепы (редко – сильно разрушенные бивни) с многочисленными продольными и кольцевыми трещинами и расслоениями; гидроксиапатит (костная ткань) и/или collagen частично дегидратированы (обезвожены); параметры – без ограничений (рис. 4).

Таким образом, согласно имеющейся нормативной документации, отнесение БМ и их фрагментов к тому или иному сорту производится только на основании внешних признаков. Такой подход не учитывает особенности минерализации сырья, степень его влагонасыщения, а также механические характеристики материала. Ранее проведенные работы показали [1], что физико-механические свойства образцов БМ имеют обратно пропорциональную зависимость от влажности, причем наименее увлажненные образцы имеют



**Рис. 1.** Бивень мамонта I сорта

**Fig. 1.** Mammoth tusk: Grade I



**Рис. 2.** Бивень мамонта II сорта

**Fig. 2.** Mammoth tusk: Grade II





Рис. 3. Бивень мамонта III сорта

Fig. 3. Mammoth tusk: Grade III



Рис. 4. Бивень мамонта IV сорта

Fig. 4. Mammoth tusk: Grade IV

хрупкий характер разрушения при сжатии. Переработка такого сырья в изделия может привести к откалыванию фрагментов формируемого изделия либо к хрупкому разрушению при интенсивном механическом воздействии обрабатывающими

инструментами. Переувлажненный материал, в свою очередь, имеет склонность к растрескиванию при потере влаги, что может привести к быстрому разрушению сырья и изделий из него при высыхании. Влажность сырья определяется сре-

дой, из которой оно было извлечено. Длительное воздействие влаги (при залегании на дне водоемов) либо солнечного излучения в сочетании с воздушными потоками может оказать существенное влияние на механические и технологические свойства БМ, не оказывая влияние на их внешний вид. Исходя из вышесказанного, исследование зависимостей состава и физико-механических свойств БМ в зависимости от их сортности будет способствовать разработке интегрированного подхода к классификации данного вида сырья, учитывающего не только внешний вид фрагментов, но и среду, из которой сырье было извлечено, включая особенности минерализации и степень увлажненности. Следует отметить, что результаты подобных исследований в научной литературе практически не отражены.

### **Материалы и методы исследований**

Для исследования были приобретены образцы БМ различного сорта. Их внешний вид представлен на рисунках 1–4. Все исследуемые БМ после приобретения были обернуты в пищевую пленку и хранились в одинаковых условиях в морозильной камере при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Минеральный состав образцов БМ определяли методом рентгенофазового анализа (РФА). Исследование проводили на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) при следующих условиях:  $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучение – 30 кВ, 10 мА; интервал  $4,5\text{--}65^{\circ}$  ( $2\theta$ ). Для идентификации минералов использована база данных PDF-2/Release 2011 RDB.

Как уже отмечалось, влажность материала БМ существенно влияет на его физико-механические свойства. Для выявления зависимости между влажностью, сортностью и физико-механическими свойствами были проведены исследования просушенных и переувлажненных (влагонасыщенных) образцов из БМ.

Для данных испытаний были подготовлены образцы кубической формы ( $1\times 1\times 1$  см). Образцы выпиливались из срединной части БМ (дентина) с использованием ленточной пилы.

Просушивание образцов осуществляли в сушильном шкафу при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  до постоянной массы. Для контроля динамики потери массы при просушивании взвешивание осуществлялось после 1, 3, 6, 9 и 24 ч выдержки в сушильном шкафу. Для максимального влагонасыщения образцы БМ были помещены в водную среду на 6 недель. Взвешивание осуществлялось еже-

недельно. Перед взвешиванием образцы кондиционировали в течение 30 мин для удаления поверхностной влаги.

Трещинообразование оценивалось на основании изучения снимков, полученных с использованием цифрового микроскопа «ККМОООН G1200» (КНР) при увеличении в 28 раз.

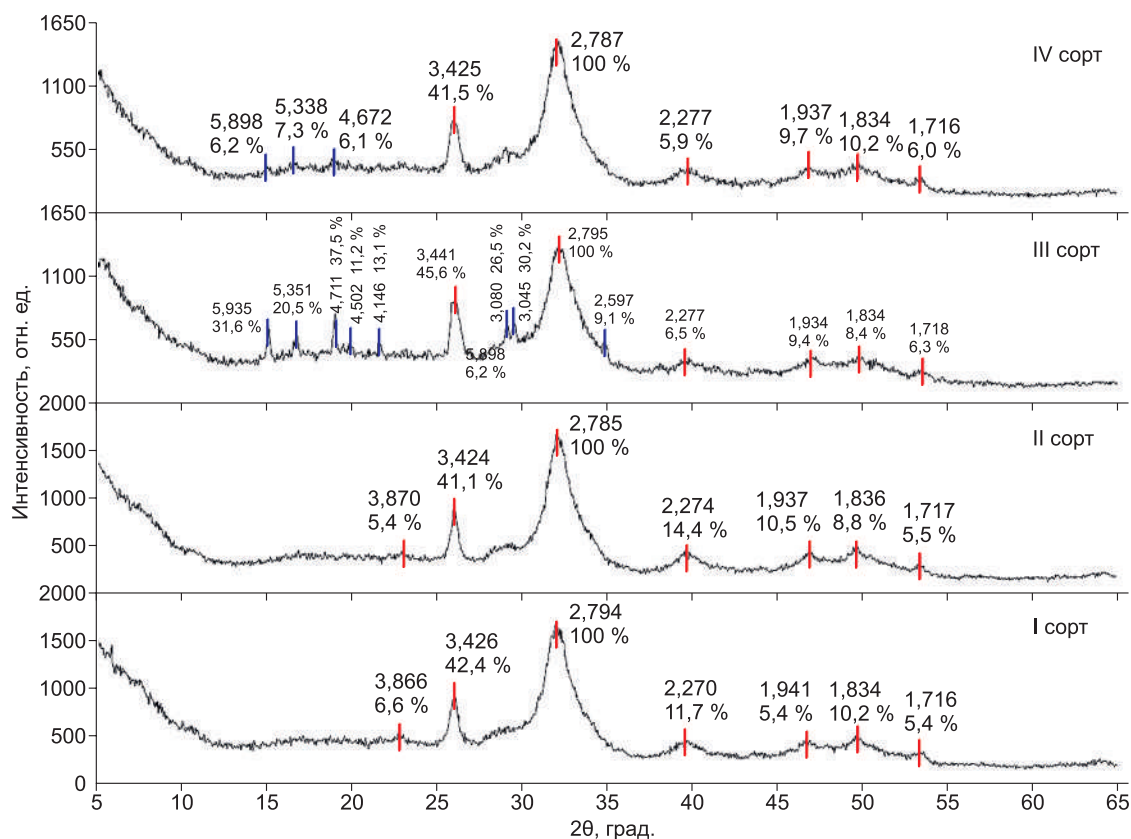
Определение прочности при сжатии осуществляли на универсальной испытательной машине Z600 (Zwick/Roell, Германия) при следующих условиях: предварительная нагрузка – 40 Н; скорость приложения предварительной нагрузки – 10 мм/мин; скорость испытания – 1 мм/мин. При проведении испытаний учитывалась анизотропия исследуемого материала. Для этого часть образцов во время сжатия располагали так, чтобы нагрузка была направлена вдоль тела бивня, а часть образцов – поперек тела бивня. Для каждой серии испытаний количество образцов составляло не менее 5.

### **Результаты и обсуждение**

*Исследование состава минеральной части БМ.* Результаты исследования образцов из БМ различных сортов методом РФА представлены на рис. 5.

Установлено, что минеральный состав БМ практически не зависит от их сорта – основным компонентом, как было отмечено ранее [14], является магний замещенный гидроксиапатит (ГАП)  $(\text{Ca}_{10-x}\text{Mg}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2)$ . Однако, в образцах БМ III и IV сортов кроме гидроксиапатита были обнаружены следы минерала ньюбериит  $(\text{Mg}(\text{PO}_3\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O})$ . Находки данного минерала в БМ в научной литературе известны. Было высказано предположение, что данный минерал может образовываться в бивне в условиях кислой среды ( $\text{pH} < 6,2$ ) и при высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния [15, 16].

Содержание другого минерала в виде примеси было выявлено в БМ, найденном в рамках экспедиционных работ на территории Нижнеколымского района (лицензионный участок Якутского научного центра СО РАН) в 2021 г. Обнаруженный образец представлял собой фрагмент БМ ориентировочно III сорта. Его внешняя часть имела синеватый оттенок. РФА порошка, полученного из внешнего минерализованного слоя, помимо основного компонента (гидроксиапатита), позволил по характерным пикам в области 11, 13, 28, 30 градусов  $2\theta$  установить наличие в виде примеси минерала вивианит  $(\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O})$



**Рис. 5.** Дифрактограммы образцов бивня мамонта разных сортов. Пики гидроксиапатита (красные полосы), ньюбериита (синие)

**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of mammoth tusk samples of different grades. Peaks of hydroxyapatite (red stripes), newburyite (blue)

(рис. 6). Вивианит – это бесцветный прозрачный минерал и известен тем, что при окислении окрашивается в темно-синий или сине-зеленый цвет. Чаще всего встречается как продукт выветривания на гидротермальных и пегматитовых месторождениях, в значительных количествах образуется в восстановительных условиях лимонитовой зоны осадочных сидеритовых месторождений железа и в низинных торфяных болотах. Однако его часто находят нарастающим на органические остатки или в составе окаменелостей – окаменелых костей и зубов животных [17].

Помимо ньюбериита и вивианита, в литературе существуют сведения об обнаружении таких минералов, как метавивианит ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), сантабарбараит ( $\text{Fe}^{3+}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), струвит ( $(\text{NH}_4)\text{Mg}(\text{PO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и бобьерит ( $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) [15, 16]. Причиной образования метавивианита и сантабарбараита является окисление вивианита, т. е. по их содержанию можно также косвенно оценить степень

выветривания и окисления палеонтологического объекта [18]. В свою очередь, струвит и бобьерит склонны образовываться в условиях высокой влажности при наличии ионов аммония. В качестве источника ионов аммония может выступать, к примеру, органическая часть БМ – коллаген.

Таким образом, в зависимости от среды и условий залегания БМ степень его минерализации и состав минеральной составляющей могут существенно различаться. Систематическое изучение минерального состава БМ, учитывающее условия его залегания (вида грунта, свойства водной среды, pH среды и пр.), может способствовать развитию представлений об особенностях минерализации палеонтологических остатков, позволит оценивать особенности их залегания, определяющие подходы к их последующему сохранению и обработке.

*Физико-механические испытания БМ.* На рис. 7 представлены результаты исследования измене-

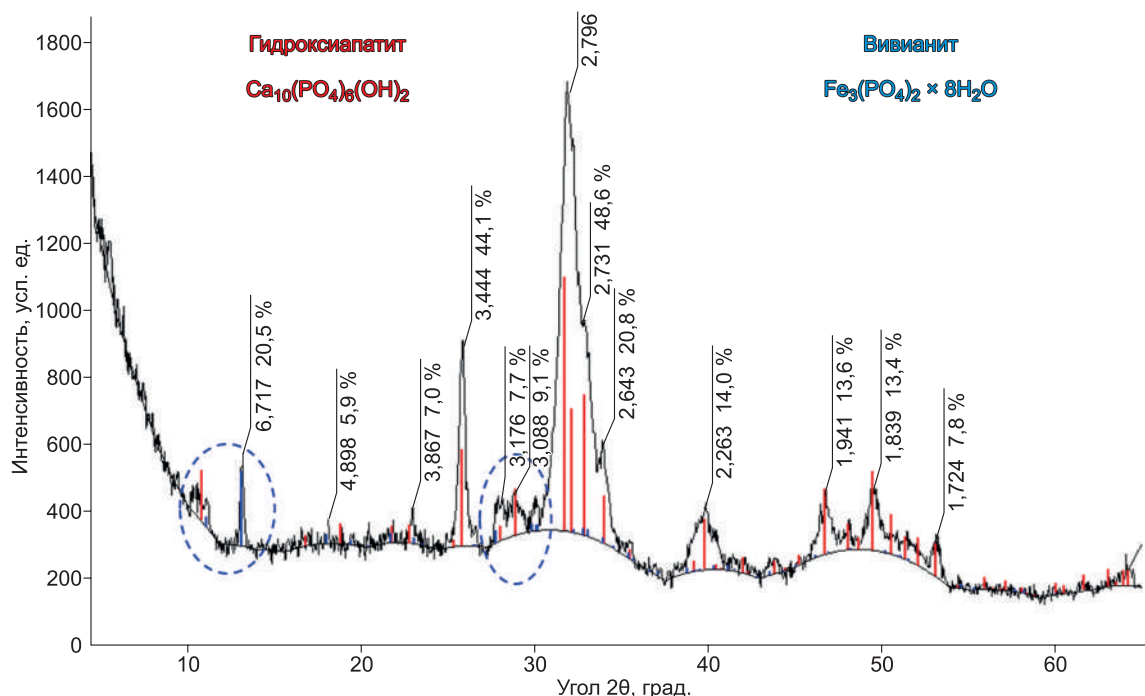


Рис. 6. Дифрактограмма коркового слоя найденного бивня мамонта

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the cortical layer of the found mammoth tusk

ния массы образцов БМ различного сорта после их просушивания при 60 °С. Отчетливой зависимости между сортностью БМ и особенностями влагопотери при просушивании не выявлено – наибольшая потеря массы зафиксирована у образцов II сорта (–8,2 %), наименьшая у образцов III сорта (–4,3 %). Полученный результат может быть обусловлен как условиями их залегания в природной среде, так и условиями их хранения у поставщика. В зависимости от условий залегания и последующего хранения, влага, адсорбированная на поверхности, в капиллярах и на других дефектных областях образцов, находилась в равновесном состоянии с окружающей средой.

Видно (см. рис. 7), что зависимость потери массы от продолжительности высушивания для образцов БМ III и IV сортов до 9 ч имеет линейный, а для БМ I и II сортов – нелинейный характер. Полученный результат обусловлен тем, что БМ III и IV сортов характеризуются наличием большого количества дефектов (см. рис. 3, 4), увеличивающих общую открытую поверхность, с которой может свободно испаряться влага при просушивании. БМ I и II сортов характеризуются более монолитной плотной структурой, и удаление влаги протекает через немногочисленные естественные микропоры.

Изучение трещинообразования после просушивания подтверждает полученный результат. После просушивания образцы БМ III и IV расщепались (рис. 8), что вызвано наличием изначальных дефектов в их структуре. Причем трещины выявлены уже после 1 ч выдержки в сушильном шкафу, с ростом продолжительности просушивания размер и количество трещин уве-

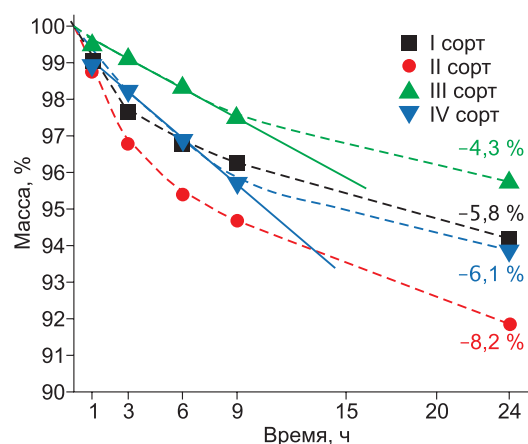


Рис. 7. Динамика изменения массы образцов БМ различного сорта при их просушивании при 60 °С

Fig. 7. Dynamics of the mass changing of MT samples of different grades during their drying at 60 °C



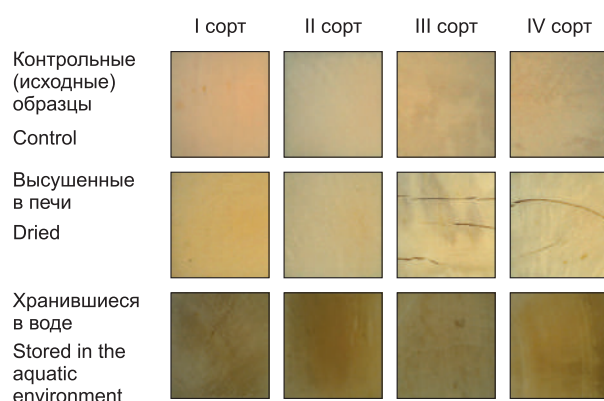


Рис. 8. Внешний вид

Fig. 8. Appearance of the samples

личиваются. БМ I и II сортов сохраняют свою целостность. Устойчивость данных образцов к термообработке обусловлена хорошо сохранившейся нативной структурой коллагена, выполняющего в костном материале роль связующего [19], в то время как коллаген в БМ III и IV сортов находится в более окисленном состоянии, что приводит к преждевременному разрушению образцов при нагревании [20, 21]. Именно поэтому при подготовке к косторезной обработке сушку БМ более высоких сортов рекомендуется проводить в мягких условиях в несколько этапов, обеспечивающих низкую скорость влагопотери для сохранения свойств коллагена [22, 23].

На рис. 9 представлены результаты исследования влагонасыщения образцов БМ различных сортов после выдержки в водной среде. Видно, что уже после 2 недель выдержки в водной среде образцы достигают максимального влагонасыщения. Установлено, что величина влагонасыщения напрямую зависит от сорта БМ – чем ниже сорт, тем больше влаги он может впитать. Так, наибольшим приростом массы характеризуются образцы III и IV сортов (+20,7 и +22,7 %), а наименьшим – образцы I и II сортов (+11,3 и +12,9 %). Полученный результат, возможно, обусловлен тем, что бивни III и IV сорта, как было отмечено ранее, из-за частичного разложения коллагена под воздействием агрессивных факторов окружающей среды, в том числе за счет действия микроорганизмов, имеют пористую дефектную микроструктуру, что, соответственно, обуславливает их способность поглотить наибольшее количество влаги. Трещин на поверх-

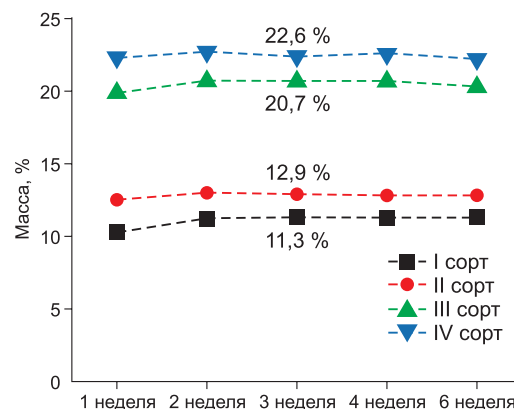


Рис. 9. Динамика изменения массы образцов БМ различного сорта при хранении их в водной среде

Fig. 9. Mass changing dynamics of MT samples of different grades during their storage in the aquatic environment

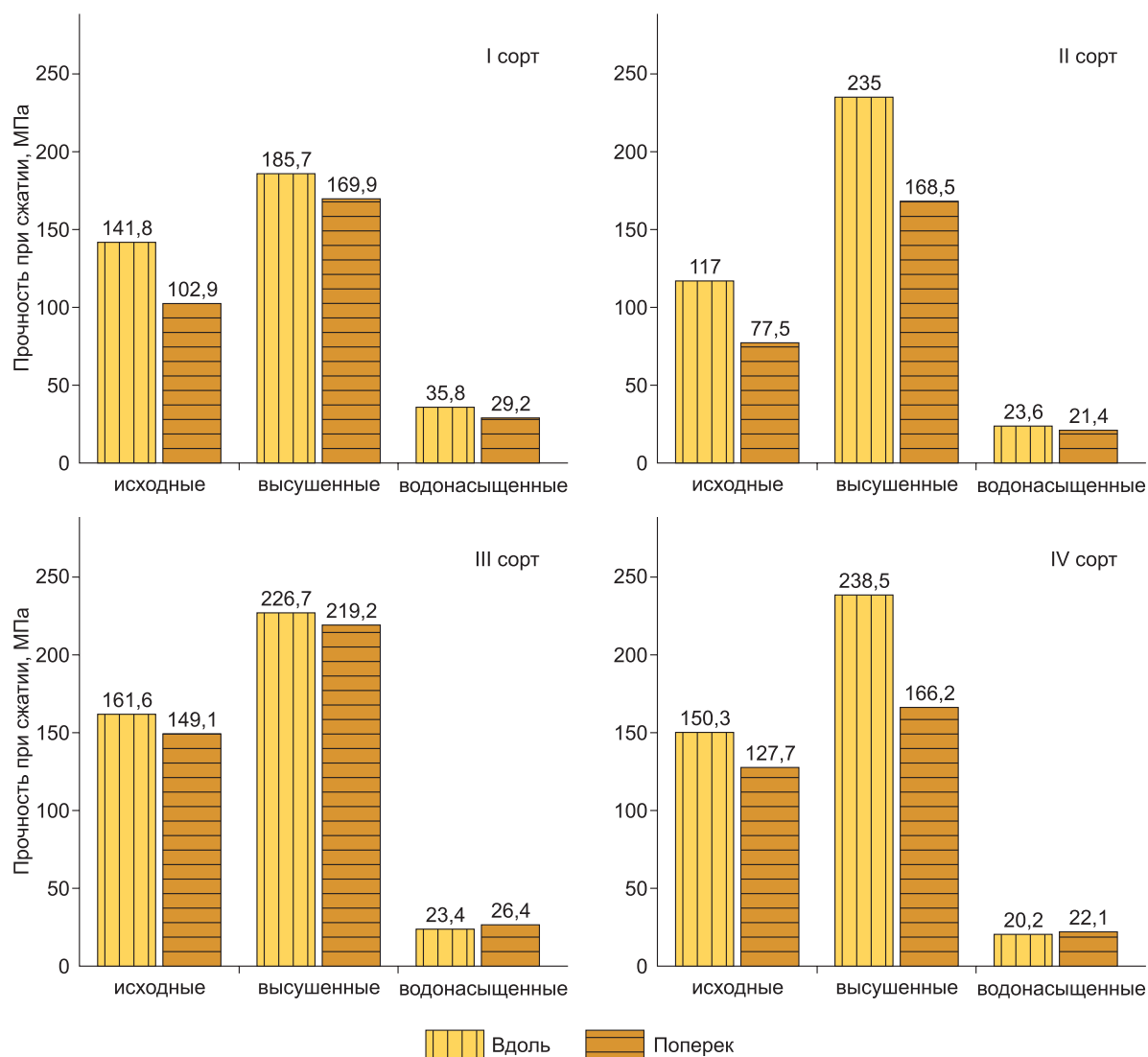
ности влагонасыщенных образцов (см. рис. 8) не выявлено, образцы приобрели темно-желтый оттенок. При визуальной оценке сортности влагонасыщенных образцов (извлеченных при добыче из водной среды) их внешний вид будет отвечать требованиям к сырью I и II сорта, однако, при хранении такие материалы быстро потеряют влагу и скрытые за счет влагонасыщения дефекты проявятся в виде интенсивного трещинообразования. Именно поэтому существующая визуальная методика классифицирования БМ неэффективна для сырья, извлеченного из водной среды.

На рис. 10 представлены результаты исследования прочности при сжатии контрольных, просушенных и влагонасыщенных образцов БМ. Поскольку БМ является анизотропным материалом, определения прочности осуществляли как в продольном, так и в поперечном телу бивня направлениях [24, 25].

Отчетливой зависимости между сортом БМ и его физико-механическими свойствами не выявлено (см. рис. 10). Прочность контрольных образцов колеблется в диапазоне 77–161 МПа, прочность просушенных образцов в 1,5–2 раза выше прочности контрольных образцов. Прочность в поперечном направлении в общем случае ниже определенной в продольном направлении. Прочность влагонасыщенных образцов в 4–7 раз ниже, по сравнению с контрольными образцами, анизотропия свойств практически не проявляется.

Сопоставление данных о влагопотере (см. рис. 7) с результатами определения прочности при сжатии контрольных образцов выявило следующую закономерность: образцы БМ II сор-





**Рис. 10.** Прочность при сжатии исходных, высушенных и водонасыщенных образцов БМ различной сортности

**Fig. 10.** Compressive strength of the original, dried and water-saturated MT samples of different grades

та, характеризующиеся наибольшей влажностью (8,2 %), имеют самую низкую прочность (вдоль – 117, поперек – 77,5 МПа), а образцы БМ III сорта, характеризующиеся наименьшей влажностью (4,3 %), показали самое высокое значение прочности при сжатии (вдоль – 161,6, поперек – 149,1 МПа). Образцы БМ I и IV сортов, имеющие близкие показатели влажности (5,8 и 6,1 % соответственно), обладают также близкими значениями прочности при сжатии (вдоль – 141,8 и 150,3, поперек – 102,9 и 127,7 МПа соответственно).

Таким образом, показано: прочность БМ существенно зависит от их влажности. Полученный результат возможно использовать для опре-

деления среды, из которой был извлечен БМ. Низкий показатель прочности при сжатии будет свидетельствовать о том, что бивень был извлечен из водной среды, а высокий показатель – сырье залегало в слабовлажной или сухой среде (на открытом воздухе, в замороженных грунтах и пр.). Однако, как показывает практика, если материал бивня после извлечения из водной среды до исследования длительное время хранился в складских помещениях и успел просохнуть, его прочность вновь возрастет.

### Закключение

Таким образом, исследование состава и физико-механических свойств БМ в зависимости

от содержания влаги и сортности позволило сделать следующие основные выводы:

– исследование минерального состава БМ III–IV сортов показало, что, кроме ГАП, в составе внешней оболочки сырья присутствуют другие фосфатные минералы, состав которых зависит от свойств среды, в которой залегал бивень; в зависимости от состояния сырья минерализация может также подвергаться дентин бивня;

– зависимость скорости потери влаги БМ различных сортов при просушивании имеет различный характер: для БМ III–IV сортов характерна линейная зависимость, для БМ I–II сортов – нелинейная. Различный характер полученных зависимостей определяется микро- и макроструктурными характеристиками образцов – высокодефектное сырье имеет большую поверхность, способствующую быстрому испарению влаги; испарение влаги при просушивании высокосортных образцов происходит через естественные микрокапилляры и интенсифицируется с увеличением продолжительности теплового воздействия;

– исследование особенностей влагонасыщения показало, что объем воды, который может впитать образец, напрямую зависит от сорта БМ: чем ниже сорт БМ, тем больший прирост массы наблюдается при выдержке в водной среде; полученный результат также обусловлен дефектностью структуры исследуемого образца;

– показатель прочности при сжатии БМ существенно зависит от их влажности. Образцы, насыщенные водой, имеют в 4–7 раз более низкую прочность, а высушенные – в 1,5–2,5 раза более высокую прочность по сравнению с контрольными образцами.

### Список литературы / References

1. Соловьев Т.М., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Колесова Е.С., Петров В.В. Влияние условий хранения на физические свойства бивней мамонтов. *Все материалы. Энциклопедический словарь*. 2021;(11):14–19. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2021-0-11-14-19>

Solovyev T.M., Petukhova E.S., Botvin G.V., Kolesova E.S., Petrov V.V. Influence of storage conditions on physical properties of mammoth ivories. *All materials. Encyclopaedic reference manual*. 2021;(11):14–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2021-0-11-14-19>.

2. Смирнов А.Н. Ископаемая мамонтовая кость: проблемы и перспективы изучения и освоения ресурсного потенциала в Российской Арктике. *Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена*. 2005;5(13):255–257.

Smirnov A.N. Fossil ivory: problems and perspectives of the studies and development of the resource po-

tential in the Russian Arctic. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2005;5(13):255–257. (In Russ.)

3. Смирнов А.Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в российской Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007;(4):21–29.

Smirnov A.N. The fossil ivory resource potential in the Russian Arctic. *Mineral resources of Russia. Economics and management*. 2007;(4):21–29. (In Russ.)

4. Кириллин Н.Д., Ноговицын Р.Р. Ископаемая мамонтовая кость – особый природный ресурс. *Наука и техника в Якутии*. 2018;1(18):19–23.

Kirillin N.D., Nogovitsin R.R. Fossil ivory is a special natural resource. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2018;1(18):19–23. (In Russ.)

5. Керемясов Н.В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова: Серия Науки о Земле*. 2018;(2):5–18.

Keremyasov N.V. Methods and technologies of fossil mammoth bone search. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth sciences*. 2018;(2):5–18. (In Russ.)

6. Kendall C., Eriksen A.M., Kontopoulos I., Collins M.J., Turner-Walker G. Diagenesis of archaeological bone and tooth. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2018;491:21–37. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.041>

7. Fernandez-Jalvo Y., Sanchez-Chillon B., Andrews P., Fernandez-Lopez S., Alcalá Martínez L. Morphological taphonomic transformations of fossil bones in continental environments, and repercussions on their chemical composition. *Archaeometry*. 2002;44(3):353–361.

8. Hedges R.E.M. Bone diagenesis: an overview of processes. *Archaeometry*. 2002;44(3):319–328.

9. Matthiesen H., Eriksen A.M., Hollesen J., Collins M. Bone degradation at five Arctic archaeological sites: Quantifying the importance of burial environment and bone characteristics. *Journal of Archaeological Science*. 2021;125:105296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2020.105296>

10. Guareschi E.E., Nicholls Ph.K., Evans N.Y., Barham M.B. et al. Bone diagenesis in the marine environment-I: Characterization and distribution of trace elements in terrestrial mammalian bones recovered from historic shipwrecks. *International Journal of Osteoarchaeology*. 2022;32(2):509–523. <https://doi.org/10.1002/oa.3072>

11. Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А. Особенности биозаражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):75–85. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75-85>

Isakova T.A., Petukhova E.S., Pavlova, V.V., Erofeevskaya L.A. Features of biological contamination of mammoth tusks during long-term storage in various con-

ditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021; 26(3):75–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75-85>

12. Guareschi E.E., Magni P.A., Berry H.G.G. Potential Issues in the Conservation of Bone and Teeth in Maritime Archaeology. *Heritage*. 2023;6(2):779–788. <https://doi.org/10.3390/heritage6020042>

13. Об утверждении Концепции развития сбора, изучения, использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны на территории Республики Саха (Якутия). Распоряжение Главы РС(Я) №649-РГ от 13.08.2018.

On approval of the Concept for the development of the collection, study, use, processing and sale of paleontological materials of the mammoth fauna in the Republic of Sakha (Yakutia). Order of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia). №649-RG dt. 13.08.2018. (In Russ.)

14. Соловьев Т.М., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Исакова Т.А., Павлова В.В. Анализ состава и структуры бивня мамонта *Mammuthus primigenius* методами термогравиметрического и рентгенофазового анализа. *Материаловедение*. 2021;(2):9–12. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-2-9-12>

Solov'ev T.M., Petukhova E.S., Botvin G.V., Isakova T.A., Pavlova V.V. Analysis of composition and structure of *Mammuthus primigenius* mammoth tusk by thermogrammetric and x-ray spectroscopy methods. *Materialovedenie*. 2021;(2):9–12 (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-2-9-12>

15. Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory. *Studies in Conservation*. 2002;(47):155–160.

16. Shen M., Lu Z., Xu Y., He X. Vivianite and its oxidation products in mammoth ivory and their implications to the burial process. *ACS Omega*. 2021;6(34):22284–22291. <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.1c02964>

17. Вивианит. [catalogmineralov.ru](http://catalogmineralov.ru); 2007. URL: <https://catalogmineralov.ru/mineral/vivianite.html> (дата обращения: 16.03.2023)

Blue iron earth; 2007. [catalogmineralov.ru](http://catalogmineralov.ru); URL: <https://catalogmineralov.ru/mineral/vivianite.html> (accessed: 16.03.2023)

18. Scott D. A., Eggert G. The vicissitudes of vivianite as pigment and corrosion product. *Stud. Conserv.* 2013;52:3–13.

19. Albéric M., Gourrier A., Wagermaier W., Fratzl P., Reiche I. The three-dimensional arrangement of the mineralized collagen fibers in elephant ivory and its relation to mechanical and optical properties. *Acta Biomaterialia*. 2018;72:342–351. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.02.016>

20. Дроздова Н.А., Насонова В.В. Влияние различных пищевых добавок и ингредиентов на технологические характеристики животных белков. *Теория и практика переработки мяса*. 2016;1(3):48–56.

Drozdova N.A., Nasonova V.V. Influence of different food additives and ingredients on the technological characteristics of animal proteins. *Theory and practice of meat processing*. 2016;1(3):48–56. (In Russ.)

21. Фадеев А.С., Ямпольская Г.П., Левачев С.М., Зайцев С.Ю. Денатурация монослоев коллагена на границе раздела вода–воздух: моделирование процесса. *Биологические мембраны*. 2008;25(2):142–154.

Fadeev A.S., Yampolskaya G.P., Levachev S.M., Zaytsev S.Yu. Denaturation of collagen monolayers at the water-air interface: process modeling. *Biologiceskie membrany*. 2008;25(2):142–154. (In Russ.)

22. Плотников В.В., Протопопов А.В., Петрова Т.Ф. Естественные методы консервации бивней мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799). *Северные архивы и экспедиции*. 2020;4(3):131–141. <https://doi.org/10.31806/2542-1158-2020-4-3-131-140>

Plotnikov V.V., Protopopov A.V., Petrova T.F. Natural methods for preserving mammoth tusks (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799). *Northern archives and expeditions*. 2020;4(3):131–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.31806/2542-1158-2020-4-3-131-140>

23. Сушка бивня. [rezbaderevo.ru](http://rezbaderevo.ru); 2020. URL: <https://rezbaderevo.ru/sushka-bivnya> (дата обращения: 16.03.2023)

Drying tusk; 2020. [rezbaderevo.ru](http://rezbaderevo.ru); URL: <https://rezbaderevo.ru/sushka-bivnya> (accessed: 16.03.2023)

24. Pfeifer S.J., Hartrampf W.L., Kahlke R.-D., Muller F.A. Mammoth ivory was the most suitable osseous raw material for the production of Late Pleistocene big game projectile points. *Scientific Reports*. 2019;9(1):1–10. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38779-1>

25. Vollrath F. Ivory as an Important Model Bio-composite. *Curator: The Museum Journal*. 2018;61(1):95–110. <http://dx.doi.org/10.1111/cura.12236>

#### Об авторах

СОЛОВЬЕВ Тускул Михайлович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7824-7623>, ResearcherID: A-8985-2019, Scopus AuthorID: 56766061100, РИНЦ AuthorID: 959304, e-mail: [tuskulsolov'ev@yandex.ru](mailto:tuskulsolov'ev@yandex.ru)

ИСАКОВА Татьяна Александровна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus AuthorID: 56233152900; РИНЦ AuthorID: 997578, e-mail: [tatyana\\_issakova@mail.ru](mailto:tatyana_issakova@mail.ru)

ПАВЛОВА Валерия Валериевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5390-5186>, ResearcherID: G-1242-2017, Scopus AuthorID: 57207732763, РИНЦ AuthorID: 922259, e-mail: [pavvaleriya-55@mail.ru](mailto:pavvaleriya-55@mail.ru)

БОТВИН Глеб Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7834-8144>, ResearcherID: A-8984-2019, Scopus AuthorID: 57193342926, РИНЦ AuthorID: 1050374, e-mail: [gleb-0379@mail.ru](mailto:gleb-0379@mail.ru)

ЧИРИКОВ Александр Александрович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1448-1891>, ResearcherID: AAZ-8527-2020, Scopus AuthorID: 57226573537, РИНЦ AuthorID: 1080866, e-mail: [4irikof@mail.ru](mailto:4irikof@mail.ru)

ПЕТРОВ Вячеслав Васильевич, технолог 2 категории, <https://orcid.org/0000-0002-6340-4120>, ResearcherID: AAO-6767-2021, РИНЦ AuthorID: 1086389, e-mail: [petrovkuraev@yandex.ru](mailto:petrovkuraev@yandex.ru)

ПЕТУХОВА Евгения Спартаковна, кандидат технических наук, и.о. зав. лаб, <https://orcid.org/0000-0002-2091-725X>, ResearcherID: A-5453-2014, Scopus AuthorID: 57189756749, РИНЦ AuthorID: 177616, e-mail: [evgspar@rambler.ru](mailto:evgspar@rambler.ru)

#### *About the authors*

SOLOVEV, Tuskul Michailovich, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7824-7623>, ResearcherID: A-8985-2019, RISC AuthorID: 959304, e-mail: [tuskulsolovev@yandex.ru](mailto:tuskulsolovev@yandex.ru)

ISAKOVA, Tatyana Aleksandrovna, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus AuthorID: 56233152900; RISC AuthorID: 997578, e-mail: [tatyana\\_issakova@mail.ru](mailto:tatyana_issakova@mail.ru)

PAVLOVA, Valeriya Valerievna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5390-5186>, ResearcherID: G-1242-2017, Scopus AuthorID: 57207732763, RISC AuthorID: 922259, e-mail: [pavvaleriya-55@mail.ru](mailto:pavvaleriya-55@mail.ru)

BOTVIN, Gleb Vladimirovich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7834-8144>, ResearcherID: A-8984-2019, Scopus AuthorID: 57193342926, RISC AuthorID: 1050374, e-mail: [gleb-0379@mail.ru](mailto:gleb-0379@mail.ru)

CHIRIKOV, Aleksandr Aleksandrovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1448-1891>, ResearcherID: AAZ-8527-2020, Scopus AuthorID: 57226573537, RISC AuthorID: 1080866, e-mail: [4irikof@mail.ru](mailto:4irikof@mail.ru)

PETROV, Vyacheslav Vasilevich, Technologist, <https://orcid.org/0000-0002-6340-4120>, ResearcherID: AAO-6767-2021, RISC AuthorID: 1086389, e-mail: [petrovkuraev@yandex.ru](mailto:petrovkuraev@yandex.ru)

PETUKHOVA, Evgeniia Spartakovna, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-2091-725X>, ResearcherID: A-5453-2014, Scopus AuthorID: 57189756749, RISC AuthorID: 177616, e-mail: [evgspar@rambler.ru](mailto:evgspar@rambler.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 21.03.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 25.08.2023*

*Принята к публикации / Accepted 02.09.2023*