

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ АНТРОПОЛОГИЯ / BIOLOGICAL ANTHROPOLOGY

Научная статья / Research Article

<https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-26-2-12>

УДК/UDC 572.5/.7

### Применение вероятностного подхода в диагностике туберкулеза по ископаемым останкам (методические аспекты)

К.Ю. Куприкова, А.П. Бужилова ✉

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация

✉ [albu\\_pa@mail.ru](mailto:albu_pa@mail.ru)

#### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Туберкулез – актуальное социальное заболевание, вызываемое преимущественно *Mycobacterium tuberculosis*, которое отмечается у человека с доисторических времен. При анализе туберкулеза по ископаемым костным останкам используются специфические признаки, которые довольно редко формируются на костях скелета, что стимулирует поиск новых подходов в диагностике. Относительно недавно был предложен т. н. вероятностный подход, опирающийся на неспецифические костные признаки заболевания, которые по отдельности обладают незначительной диагностической способностью, однако комплексно в разном сочетании позволяют успешно провести диагностику. Исходя из изученных другими исследователями материалов паспортизованных коллекций, можно выделить 10 индикаторов на черепе и посткраниальном скелете, которые отвечают поставленной задаче.

**Материалы и методы.** Впервые на примере антропологической серии Козино XIV-XVIII вв. (298 инд.) была апробирована единая методическая процедура фиксации неспецифических признаков туберкулеза и расчета вероятности заболевания на индивидуальном и групповом уровне. Все статистические расчеты проводились в среде «R» на основе кода, написанного К.Ю. Куприковой.

**Результаты и обсуждение.** Описана топография и критерии учета неспецифических индикаторов туберкулеза, апробирован поэтапный алгоритм расчета Тау-индекса – вероятности присутствия заболевания на индивидуальном и групповом уровне. Проведена статистическая оценка распространенности туберкулеза в группе с учетом оценки качества полученной модели. Обнаружено 27 индивидов, чей Тау-индекс указывал на большую вероятность заражения инфекцией. Наличие заболевания подтверждено палеогенетическим анализом, что доказывает эффективность использованного метода.

**Заключение.** Предложенный комплекс костных индикаторов туберкулеза с применением метода вероятностного подхода актуален для диагностики этого заболевания на ископаемых останках. Необходимо продолжить накопление данных для прямого сопоставления результатов диагностики методами вероятностного подхода и палеогенетики.

**Ключевые слова:** палеоантропология; палеопатология; туберкулез; вероятностный подход; древнерусское население; палеоэпидемиология

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

**Для цитирования:** Куприкова К.Ю., Бужилова А.П. Применение вероятностного подхода в диагностике туберкулеза по ископаемым останкам (методические аспекты) // Вестник Московского университета. Серия XXIII. Антропология. 2026. № 2. С. 146-161. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-26-2-12>

## Application of a probabilistic approach to the diagnosis of tuberculosis in archaeological human remains: methodological aspects

Kseniya Yu. Kuprikova, Alexandra P. Buzhilova ✉

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ albu\_pa@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Tuberculosis is a pressing public health issue caused primarily by *Mycobacterium tuberculosis*. Genetic data enables the reconstruction of the co-evolution of this pathogen and humans over tens of thousands of years. The analysis of tuberculosis in ancient human skeletal remains relies on specific osseous lesions, which are rarely formed. This scarcity stimulates the search for new diagnostic approaches. Recently, a probabilistic approach has been proposed. It utilizes non-specific skeletal features of the disease. Individually, these features have limited diagnostic value, but in combination, they can successfully identify the disease. Based on materials from certified collections previously examined by other researchers, ten indicators on the skull and postcranial skeleton have been identified as suitable for this purpose.

**Materials and methods.** A unified methodological procedure for recording nonspecific signs of tuberculosis and calculating the probability of the disease at both individual and group levels was tested using the Kozino anthropological series (14th–18th centuries), comprising 298 individuals. All statistical analyses were performed in the R environment using custom code developed by K. Yu. Kuprikova.

**Results and discussion.** This section describes the topography and criteria for recording Tuberculosis indicators and presents a step-by-step algorithm for calculating the Tau index, which estimates the probability of disease presence at both individual and group levels. The algorithm's performance was tested, and a statistical assessment of disease prevalence within the group was conducted, accounting for the model's quality. Twenty-seven individuals were identified with a Tau index suggesting a high probability of bone tuberculosis. Paleogenetic analysis confirmed the presence of the disease in these cases, validating the effectiveness of the proposed methodological approach.

**Conclusion.** The proposed set of osseous indicators, analyzed through a probabilistic approach, is a relevant tool for diagnosing tuberculosis in ancient skeletal remains. To further validate this methodology, future research should involve the collection of additional data for a direct comparison between diagnoses made using probabilistic approaches and those confirmed by paleogenetic analysis.

**Keywords:** paleoanthropology; paleopathology; tuberculosis; probabilistic approach; ancient Russians; paleoepidemiology

**Acknowledgements.** The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

**For citation:** Kuprikova K.Yu., Buzhilova A.P. Application of a probabilistic approach to the diagnosis of tuberculosis in archaeological human remains: methodological aspects. *Lomonosov Journal of Anthropology*. 2026 (2), pp. 146-161. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-26-2-12>

## Введение

Туберкулез – актуальное социальное заболевание; мировая численность заболевших только в 2023 г. оценивается на уровне 10,8 млн, а умерших – 1,25 млн человек (ВОЗ, 2025). Инфекция вызывается микобактериями туберкулезного комплекса (МТВС), куда входит и собственно возбудитель легочного туберкулеза человека – *Mycobacterium tuberculosis* (van Doren, 2023). У большинства людей заражение туберкулезной палочкой на протяжении многих лет протекает бессимптомно, однако при ослаблении иммунной системы (из-за недоедания, стрессов, сопутствующих заболеваний и иных неблагоприятных факторов), примерно в 10% случаев инфекция развивается во вторичную активную форму (Ortner, 2003). При этой форме туберкулез может поражать костную систему, что позволяет проводить диагностику заболевания на ископаемых костных останках.

Высокий уровень латентного состояния данной инфекции является показателем длительного сосуществования человека-хозяина и бактериального патогена-вектора. Наиболее древние достоверные скелетные свидетельства туберкулеза у *H. sapiens* датируются 9250–8160 л. до н.э. (Hershkovitz et al., 2008). В неолитическую эпоху число описанных случаев заметно возрастает, что, по-видимому, совпадает с переходом человечества от образа жизни охотников-собирателей к оседлым земледельцам и скотоводам (Cohen, Armelagos, 1984). Благодаря таким наблюдениям, доминирующей гипотезой о происхождении человеческого туберкулеза долгое время была идея о зоонозной природе инфекции, которая «перекочевала» от животных к человеку в эпоху неолитизации. Однако, согласно палеогенетическим исследованиям, древнейший общий предок патогенов МТВС, вероятно, представлял собой человеческую форму (Sabin et al., 2020). Таким образом, сегодня исследователями обсуждается наиболее вероятный сценарий, что одомашненный скот мог «подхватить» это заболевание от человека, хотя необязательно напрямую (Roberts, Buikstra, 2021).

*M. tuberculosis* не обладает природным резервуаром, из-за чего одним из наиболее значимых факторов в распространении инфекции воздушно-капельным путем является относительная плотность населения. В истории человечества можно выделить два подобных сцена-

рия: 1) в эпоху неолита оседлость приводит к увеличению плотности населения, а развитию активной формы заболевания способствуют преобладающие случаи недоедания и голодания на начальных этапах неолитизации (из-за гибели урожая и падежа скота); 2) в эпоху средневековья в результате активного процесса урбанизации многочисленные группы городского населения живут в условиях скученности и антисанитарии, а снижению иммунитета в таких случаях способствует влияние негативных антропогенных факторов (Roberts, Buikstra, 2021).

Несмотря на значительный прогресс в изучении палеопатологии туберкулеза методами морфологии и молекулярной биологии, до сих пор масштабные исследования заболевания на групповом уровне остаются немногочисленными. Самые распространенные варианты публикаций – это разбор отдельных находок с нередким подтверждением диагноза молекулярными методами (например, Pava et al., 2023). Это объясняется объективными причинами присутствия в арсенале палеопатолога довольно малого числа специфических (патогномичных) костных индикаторов, которые отражают результат длительного прогрессирования активной фазы заболевания (Ortner, 2003). Обратим внимание, что такие находки сами по себе довольно редки, так как по клиническим данным известно, что при самом распространенном легочном варианте заболевания, костная форма туберкулеза развивается только у 3–5% больных, а при внелегочном варианте – у ~30% (Roberts, Buikstra, 2021).

За последние годы наметился еще один исследовательский тренд в диагностике древних инфекций. Дж. Болдсеном (Boldsen, 2001) на примере диагностики проказы по костным останкам был предложен т.н. вероятностный подход. Он заключается в расчете двух показателей для каждого костного индикатора заболевания – чувствительности и специфичности, которые вычислены исследователем при изучении паспортизированной антропологической коллекции (есть документальные сведения о заболевании). С учетом этих данных и при их фиксации на материалах антропологических коллекций, можно рассчитать индекс, количественно характеризующий степень вероятности присутствия заболевания (Тау-индекс). С применением такого подхода появляется возможность использовать

определенные костные признаки, которые по отдельности обладают незначительной диагностической способностью, однако в совокупности при расчете Тау-индекса позволяют провести диагностику инфекции. В дальнейшем вслед за другими исследователями обозначим их как неспецифические или атипичные признаки. Более того, на основе расчета суммы индексов, полученных для каждого индивида, возможна групповая оценка распространенности заболевания в выборке с построением вероятностной модели.

С использованием этого же метода при анализе паспортизированной антропологической коллекции умерших от туберкулеза (480 инд. из американской коллекции Терри XX века) была проведена оценка диагностической ценности 18 атипичных признаков (Pedersen et al., 2018). Некоторые из них позиционировались авторами как индикаторы ранней стадии заболевания. При сравнительном анализе материалов (группа больных – коллекция Терри и контрольная выборка – коллекция Басса) исследователи использовали определенные критерии для принятия решения о «работоспособности» признаков: достоверно большая встречаемость среди индивидов больных туберкулезом, высокая чувствительность признака и достоверная связь с хотя бы половиной других проанализированных признаков. В итоге, в рекомендованном для успешной диагностики списке оказалось 6 признаков из 18, которые фиксировались на разных участках скелета.

Другая группа исследователей, изучив эту же коллекцию, предприняла попытку дифференциации признаков менингита на эндокране, которые ранее также не считались валидными для диагностики туберкулеза (Ortner, 2003). В результате была обнаружена достоверная ассоциация ряда признаков на эндокране с присутствием туберкулезной инфекции (Spekker et al., 2020a; Spekker et al., 2020b; Spekker et al., 2021). Более того, характерные зернистые вдавления на эндокране авторы предложили считать патномоничными, т.е. однозначно указывающими на присутствие инфекции (Spekker et al., 2020a). Далее были разработаны количественные оценки специфичности и чувствительности индикаторов менингита, которые в совокупности показали пригодность их использования для успешной дифференциации туберкулеза, хотя по отдельности неспецифичность этих признаков не оспа-

ривается ни самими авторами работы, ни другими исследователями (Spekker et al., 2022).

Таким образом, на сегодняшний день для применения вероятностного подхода в диагностике туберкулеза по ископаемым останкам можно использовать по крайней мере 10 индикаторов, которые показали свою валидность на примере паспортизированных антропологических коллекций. В настоящей работе на примере сельской выборки русских XIV–XVIII вв. апробирована единая методическая процедура фиксации и расчета признаков туберкулеза на индивидуальном и групповом уровне.

## Материалы и методы

Работа была выполнена на материалах антропологической коллекции Козино (Одинцовский район, Московской области), которая датируется широким интервалом XIV–XVIII вв. (Двуреченская с соавт., 2011). Серия хранится в фондах НИИ и Музея антропологии МГУ.

Коллекция использована без ее деления на хронологические этапы из-за невозможности такой дифференциации. Общий размер серии составил 376 индивидов (144 мужчины, 142 женщины, 81 ребенок и 9 половозрелых индивидов, для которых определение пола было затруднено). Определение пола и биологического возраста проводились традиционными общепринятыми в палеоантропологии методами (Алексеев, Дебец, 1964; Алексеев, 1966; White et al., 2011).

Согласно методическим рекомендациям разных исследователей (Pedersen et al., 2018; Spekker et al., 2022) был апробирован вероятностный подход присутствия туберкулеза у конкретного индивида и распространенности данного заболевания в группе. При этом в изученной выборке Козино был апробирован объединенный список признаков, что практикуется впервые. Процедура фиксации признаков и расчета индексов изложена ниже. Все статистические расчеты проводились в среде «R» (R Core Team, 2025). Статистические расчеты вероятностного подхода были реализованы на основе кода, написанного одним из авторов публикации (К.Ю. Куприкова, доступен при запросе).

## Результаты

### Неспецифические индикаторы костного туберкулеза

Неспецифические индикаторы вероятного присутствия туберкулеза демонстрируют поражения в шести местах посткраниального скелета: внутренняя поверхность ребер, вентральная поверхность тел позвонков, латеральная часть подвздошной кости, ямка вертлужной впадины, ушко-видная поверхность подвздошной кости и локтевой отросток проксимального эпифиза локтевой кости (табл. 1, рис. 1).

По мнению исследователей (Pedersen et al., 2018), именно эти признаки встречались значительно чаще в группе больных туберкулезом, чем в контрольной группе, и были статистически связаны друг с другом. Авторы отметили, что наиболее «работающим» индикатором оказался признак присутствия воспалительной реакции на вентральных поверхностях грудных и поясничных позвонков (53,3% вероятности успешного диагноза при наличии только этого признака).

Группа индикаторов на эндокране демонстрирует положительную связь с туберкулезным менингитом. Это зернистые вдавления (GI), аномальные вдавления кровеносных сосудов (ABVI), периостальные отложения на поверхности внутренней пластинки черепа (PA) и аномально выраженные пальцевидные вдавления (APDI) (табл. 1,

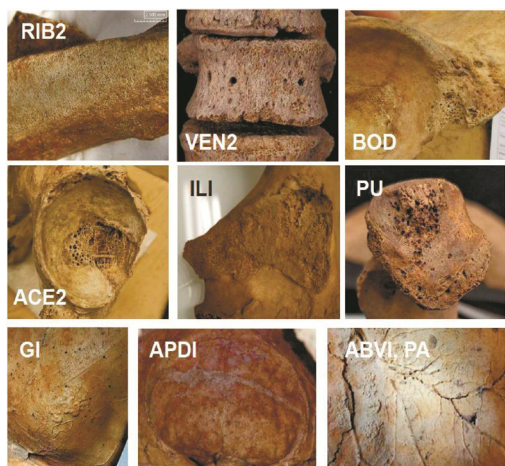


Рисунок 1. Неспецифические индикаторы туберкулеза, использованные в процедуре вероятностного подхода. Условные обозначения как в таблице 1

Figure 1. Non-specific skeletal lesions included in the probabilistic diagnosis of tuberculosis.

Legend: Lesion codes and descriptions are provided in Table 1

рис. 1). При расчете диагностической чувствительности и специфичности этих признаков, показано, что признак GI сам по себе достаточен для постановки окончательного диагноза туберкулезного менингита (Spekker et al., 2020a). Результаты теста  $\chi^2$  показали, что сочетание ABVI, PA и APDI друг с другом (в любой возможной комбинации) значительно чаще встречается у лиц, умерших от туберкулеза. Следовательно, фиксация всех 4 признаков (с учетом свойств и диагностического потенциала каждого) обоснованно может быть использована в диагностике заболевания (Spekker et al., 2022).

Таким образом, для применения полноценной процедуры вероятностного подхода в диагностике туберкулеза необходимо изучить череп, позвонки, ребра, тазовые и локтевые кости. Отметим, что речь идет об исследовании индикаторов, выявленных на остеологической коллекции больных легочным туберкулезом. Мы не исключаем, что другие патогены МТВС могут оставлять «следы» на неучтенных в этой программе участках скелета. Согласно рекомендациям Д. Ортнера (Ortner, 2003), следует обращать внимание и на присутствие специфических признаков болезни Потта, несимметричных артритов крупных суставов, как и следов холодного абсцесса на подвздошной кости.

### Процедура фиксации неспецифических индикаторов

Описание поражения поверхности кости анализируемых признаков изложены авторскими коллективами в разных масштабах: в одних случаях применяется градуированная шкала патологических изменений, в других – приводится макроморфология и патофизиология признаков (соответственно Pedersen et al., 2018; Spekker et al., 2022). Поскольку авторы использовали в статистическом анализе только очевидное присутствие патологических изменений, мы предлагаем в исследовательском бланке отмечать признаки по бинарной системе (есть/нет) с учетом определенных критериев их фиксации (табл. 1).

Обратим внимание, что, если большая часть признаков на посткраниальном скелете доступна для прямого обзора, то при полноценной сохранности черепа, исследование эндокрана необходимо проводить при помощи подсветки, освещая поверхность внутренней пластинки через затылочное отверстие, и анализируя присутствие признаков изогнутым стоматологическим зеркалом для осмотра труднодоступных участков.

**Таблица 1. Программа индикаторов туберкулеза, использованных в процедуре вероятностного подхода**  
**Table 1. Non-specific skeletal lesions included in the probabilistic diagnosis of tuberculosis**

№	ID признака Feature ID	Локализация на скелете Localization on the skeleton	Критерии присутствия признака (признак есть) Criteria for the presence of a feature (the feature is present)	Специфичность признака** Specificity of the feature**	Чувствительность признака** Sensitivity of the feature**
1	RIB2	Внутренняя (вентральная) поверхность ребер, в области расположения легких	Пролиферация костной ткани на исследуемой поверхности длиной >5 см. ИЛИ: 1 или более бобовидных литических дефектов с диаметром >5 мм	0,987	0,337
2	VEN2	Вентральная поверхность тел всех отделов позвонков	Пролиферация костной ткани с типичной “плетеной” структурой, покрывающая >50% поверхности хотя бы на 2 грудных или поясничных позвонках	0,959	0,533
3	BOD	Латеральная часть подвздошной кости. Латеральное тело подвздошной кости между нижней ягодичной линией и верхним краем вертлужной впадины	3 или более крупных круглых ямки с закругленными краями, каждая из которых обладает размером >3 мм. В серьезных случаях, может присутствовать абсцесс ИЛИ: Пролиферация ткани с “плетеной” структурой, покрывающая примерно бы 50% поверхности	0,949	0,332
4	ACE2	Ямка вертлужной впадины	2 или более глубоких полости, каждая из которых обладает размером >3 мм или покрывает >50% поверхности, с имеющими “плетеную” структуру краями и плотно расположенными трабекулами	0,935	0,420
5	ILI	Ушковидная поверхность подвздошной кости	Сгруппированные ямки или крупные полости в 2 и более областях, каждая из которых обладает размером >3 мм, или в одной области размером >10 мм	0,942	0,296
6	PU	Локтевой отросток проксимального эпифиза локтевой кости	Сгруппированные ямки или крупные полости в 2 и более областях, каждая из которых обладает размером >3 мм, или в одной области размером >10 мм	0,983	0,092
7	GI	Зернистые вдавления на эндокране. На орбитальной части лобной кости, на больших крыльях клиновидной кости, на чешуе височных костей и боковых частях и чешуе затылочной кости	Скопление небольших (0,5-1,0 мм в диаметре), относительно неглубоких (не более 0,5 мм в глубину), более-менее округлых углублений с округленными краями и стенками	0,969	0,291

**Есть окончание / Continued**

Примечания. \*Для избегания путаницы с нормальным для детского и раннего зрелого возраста присутствием пальцевидных вдавлений на внутренней поверхности черепа, у индивидов этого возрастного этапа данный признак не фиксируется. \*\*Показатели взяты из Pedersen et al., 2018 и Spekker et al., 2022

Notes. \*In order not to confuse the age-appropriate with the pathological abnormally pronounced digital impressions of the skull in children, this lesion was not recorded for the individuals of this age group. \*\*Taken from Pedersen et al., 2018 and Spekker et al., 2022

**Окончание таблицы 1**  
**Table 1 Continued**

№	ID признака Feature ID	Локализация на скелете Localization on the skeleton	Критерии присутствия признака (признак есть) Criteria for the presence of a feature (the feature is present)	Специфичность признака** Specificity of the feature**	Чувствительность признака** Sensitivity of the feature**
8	APDI*	Аномально выраженные пальцевидные вдавления на эндокране в районе свода черепа (не учитывать область основания и нижней трети свода)	Неглубокие вдавления, сделанные как будто пальцем, разделенные костными гребнями разного размера	0,679	0,658
9	ABVI	Аномальные вдавления кровеносных сосудов на эндокране в области лобной, височной и затылочной кости, особенно вокруг наиболее выступающих их частей	Небольшие, ограниченные участки коротких ветвящихся вдавлений кровеносных сосудов по типу синусов. Иногда эти изменения описываются как “лабиринтоподобные” или “серпантинноподобные”	0,938	0,214
10	PA	Периостальные отложения на поверхности внутренней пластинки черепа, могут быть по периметру ABVI или откладываться независимо	Отложения новообразованной костной ткани, имеющей вид фиброзной, порозной и нерегулярной “корочки”	0,896	0,201

*Расчет индивидуальных значений Тау-индекса*

На первом этапе оценивается вероятность заболевания туберкулезом у каждого индивида, рассчитанная на основе Тау-индекса (далее  $\tau$ ). Он рассчитывается как взвешенная сумма баллов поражений на основе уравнения:

$$\tau_k = \Pi_k^+ - \Pi_k^- = \sum_{j=1}^{10} \ln \left( \frac{sens_j^{\Delta_{jk}} \cdot (1 - sens_j)^{(1-\Delta_{jk})}}{spe_j^{1-\Delta_{jk}} \cdot (1 - spe_j)^{\Delta_{jk}}} \right)$$

где:

$LL$  – лог-правдоподобие (log-likelihood) набора признаков у  $k$ -го индивида выборки при условии, что индивид болен (+) и не болен (-);  
 $sens$  – чувствительность  $j$ -го индикатора ТБ;  
 $spe$  – специфичность  $j$ -го индикатора ТБ;  
 $\Delta_{jk}$  – параметр, принимающий значение 1 при наличии и 0 при отсутствии  $j$ -го индикатора у  $k$ -го индивида. Если наличие или отсутствие некоторого индикатора невозможно оценить, то он не вносит вклад в сумму для данного индивида (его  $\ln$  равен 0).

Количественная оценка чувствительности и специфичности для расчета по формуле взяты из соответствующих работ (Pedersen et al., 2018; Spekker et al., 2022), их значения приведены в таблице 1.

Если значение  $\tau$  будет положительным, то набор индикаторов, зафиксированных на его скелете, указывает скорее на присутствие инфекции, чем ее отсутствие. Аналогично, если  $\tau$  получается отрицательным, то индивид с зафиксированным набором признаков, скорее всего, не был болен. При значениях  $\tau$  близких к 0 результат для диагностики неопределенный, причем «неопределенность», согласно рекомендациям, задается интервалом от -1 до 1 (Boldsen, 2005).

Отметим, что при работе с  $\tau$  стоит иметь в виду, что он представляет разницу двух лог-правдоподобий, и что математически это не равнозначно вероятности. Если бы  $\tau$  являлся статистической вероятностью, то он принимал бы значения от 0 до 1. Правдоподобие же представляет обратную величину и описывает то, насколько хорошо наша модель соотносится с реальностью. Иными словами, правдоподобие характеризует вероятность наблюдаемого набора симптомов при условии, что человек болен/не болен. На основе данной величины в дальнейшем ведется оценка частоты заболевания в группе (см. ниже). Тем не менее, при постановке диагноза данная величина может служить показателем «вероятности» заболевания у индивида с учетом, что слово «вероятность» не несет строгого математического смысла.

Кроме того, с учетом сохранности скелета размах изменчивости  $\tau$  может варьировать, как и на его значение может влиять присутствие/отсутствие признаков только на костях скелета или только на черепе (рис. 2).

При наличии полного комплекта необходимых для диагностики костей и присутствия на них всех 10 признаков, минимальное значение  $\tau$  в нашем исследовании составило -3,605, а максимальное – 17,726. При отсутствии признаков на черепе, но присутствии их на костях скелета, значение  $\tau$  зафиксировано на уровне 11,589. При отсутствии признаков на скелете, но присутствии их на черепе,  $\tau$  был существенно ниже и составил 2,532, поскольку в этом случае индекс  $> 1$ , то он показывает положительную оценку вероятности заболевания. Если череп не сохранился, то минимальное значения  $\tau$  в серии Козино составило -2,317, а максимальное – 12,878. При отсутствии костей посткраниального скелета минимальное значения  $\tau$  было -1,289, а максимальное – 4,849. В целом очевидна несимметричность значений  $\tau$  вокруг нуля, положительные значения варьируют в пределах 17,726–2,532, отрицательные от -1,289 до -3,605.

Несмотря на различия в сохранности скелета или наличии атипичных признаков, полученные значения  $\tau$  не вносят неопределенности в диагноз. Согласно критериям (Boldsen, 2005), эти значения выходят за допустимый диапазон ( $-1 < \tau < 1$ ), что указывает на надежность оценки.

Вероятно, данный принцип будет справедлив и для других случаев. Поэтому вероятностный подход следует применять даже при неполной сохранности скелета, когда отсутствуют некоторые необходимые для диагностики скелетные элементы.

#### Верификация индивидуальных значений Тау-индекса

Значение  $\tau > 1$  (заболевание вероятно есть) было зафиксировано у 27 индивидов из серии Козино, т.е. составило 9,1% (табл. 2). С учетом широкого хронологического интервала существования могильника Козино (в несколько столетий) и отсутствия на нем очевидных скоплений погребений индивидов с признаками заболевания, можно прийти к заключению, что это очень низкий процент, который указывает на случайное присутствие туберкулеза.

Обратим внимание, что признаки инфекции встречаются в случайном порядке, отличаясь по своей комбинации у каждого индивида (табл. 2). Наиболее часто отмечаются признаки: PA, ABVI, VEN2, RIB2 и GI (частота соответственно – 27%; 12,7%; 8,7%; 7,6%; 6,4% и 5,9%). Это 3 из 4-х возможных признаков на черепе и два на посткраниальном скелете. Признаки VEN2 и RIB2 довольно часто сопутствуют друг другу, что объясняется топографической близостью позвонков и ребер, по которым может распространяться инфекция. Подобная закономерность ожидается

Сохранность скелета			Посткраниальный скелет		
			В наличии		Отсутствует
Череп			Атипичные признаки есть	Атипичных признаков нет	
	В наличии	Атипичные признаки есть	17,726	2,532	4,849
		Атипичных признаков нет	11,589	-3,605	-1,289
	Отсутствует		12,878	-2,317	

Рисунок 2. Теоретические значения Тау-индекса при различной сохранности останков. Зеленым (признаки есть/нет) обозначены значения  $\tau$  при полной сохранности костей, необходимых для диагностики; синим – при отсутствии костей посткраниального скелета; оранжевым – при отсутствии костей черепа

Figure 2. Theoretical values of the Tau ( $\tau$ ) index under different states of skeletal preservation. Legend: Green cells:  $\tau$  values assuming complete preservation of diagnostically relevant bones. Blue cells:  $\tau$  values assuming absence of postcranial bones. Orange cells:  $\tau$  values assuming absence of cranial bones

и для признаков на тазовых костях, однако, на примере серии Козино она не отмечена, возможно, из-за очень низких значений частоты их встречаемости (1,5–2%). В целом, выявленный нами список индикаторов не противоречит данным исследователей, которые выделяли наиболее «работоспособные» признаки, опираясь на критерии специфичности и чувствительности.

В выборке наибольшую часть с признаками заболевания составляют неполовозрелые индивиды (14,8%). Возможно, это следствие не репрезентативности детской части выборки. Число больных мужчин и женщин примерно одинаково (8% и 9,2% соответственно). Полученные результаты не противоречат данным, известным по клинической статистике (Ortner, 2003).

**Таблица 2. Индивиды из серии Козино с признаками туберкулеза, выявленные методом вероятностного подхода**  
**Table 2. List of the individuals with signs of tuberculosis identified using a probabilistic approach**

ID погребения ID of the burial	Пол Sex	Возраст Age	τ	Присутствие индикаторов туберкулеза Presence of tuberculosis indicators	Возможность фиксации необходимых для диагностики признаков, % Possibility of recording the signs necessary for diagnostics, %
91	?	Infantilis I	1,58	ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
196	?	Infantilis I	1,58	ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
198	?	Infantilis I	1,58	ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
294	?	Infantilis II	4,85	GI, ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
140	♀	Adultus I	2,59	RIB2, GI	100%
174	♀	Adultus I	2,3	ABVI, PA, APDI	25%, есть череп / there is a skull
223	♀	Adultus I	1,26	GI	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
240	♀	Adultus I	2,04	GI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
283	♀	Adultus I	3,45	GI, ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
16	♀	Adultus II	1,12	GI, PA, APDI	100%
97	♀	Adultus II	7,65	RIB2, VEN2, PU, GI	100%
175	♀	Adultus II	3,78	VEN2, ILI, PA, APDI	100%
222	♀	Adultus II	2,04	GI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
303	♀	Adultus II	3,45	GI, ABVI, PA	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
8(1)	♀	Juvenis	4,78	RIB2, GI, ABVI, PA	100%
291	♀	Maturus I	1,26	GI	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
46	♀	Maturus II	1,9	VEN2, BOD	100%
123	♂	Adultus I	5,52	RIB2, VEN2, ABVI, PA	100%
156	♂?	Adultus I	3,33	RIB2, VEN2	100%

**Есть окончание / Continued**

Примечания. Обозначения признаков см. в таблице 1. Цветом выделены случаи, подтвержденные методами палеогенетики (Severinov et al., 2025).

Notes. Symbols as in table 1. Cases verified by the genetic analysis are shown in color (Severinov et al., 2025).

**Окончание таблицы 2**  
**Table 2 Continued**

ID погребения ID of the burial	Пол Sex	Возраст Age	$\tau$	Присутствие индикаторов туберкулеза Presence of tuberculosis indicators	Возможность фиксации необходимых для диагностики признаков, % Possibility of recording the signs necessary for diagnostics, %
22	♂	Adultus II	1,34	RIB2	80% нет черепа / absence of a skull
87	♂	Adultus II	1,26	GI	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
106	♂	Maturus I	1,9	VEN2, BOD	100%
224	♂	Maturus I	2,66	GI, APDI	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
284	♂	Maturus I	1,26	GI	20% нет позвонков, ребер, тазовых и локтевых костей absence of vertebrae, ribs, pelvic and elbow bones
39	♂	Maturus II	1,45	VEN2, PU	100%
24	♂	Senilis	1,54	RIB2, PA	80% нет позвонков / absence of vertebrae
70	♂	Senilis	1,45	VEN2	75% нет черепа, вертлужной впадины на боковой поверхности тазовой кости absence of the skull, acetabulum on the lateral

Для верификации результатов, полученных по индивидуальным значениям  $\tau$ , был проведен палеогенетический анализ оценки присутствия заболевания, который во всех изученных случаях – 18 образцов, подтвердил присутствие легочного туберкулеза (Severinov et al., 2025). В таблице 2 верифицированные образцы выделены цветом, среднее значение  $\tau$  составило 2,53 ( $\sigma = 1,57$ ). Это образцы с разными вариантами комплектности скелета. Отметим, что фрагменты генома *M. tuberculosis* были обнаружены в том числе у индивида (№16) со значениями  $\tau$  чуть больше 1 (табл. 2). Это молодая женщина, у которой при полной комплектности останков были выявлены атипичные признаки только на эндокране.

#### Расчет групповых значений Тау-индекса

На основе индивидуальных значений  $\tau$ , рассчитывается среднее значение и дисперсия для всей выборки.

Среднее  $\tau_0$  для всей выборки можно представить в виде взвешенной суммы 2 теоретических усредненных  $\tau$ , вес которых зависит от распространенности туберкулеза в популяции:

$$\bar{\tau}_0 = p \cdot \bar{\tau}_+ + (1 - p) \cdot \bar{\tau}_-, \text{ где}$$

$\tau_0$  – наблюдаемое среднее  $\tau$ ;

$\tau_+$  – теоретическое среднее  $\tau$  в выборке, если бы в ней все индивиды болели ТБ;

$\tau$  – теоретическое среднее  $\tau$  в выборке, если бы в ней никто не болел ТБ;

$p$  – распространенность ТБ в выборке.

Аналогично, дисперсия  $\tau$  может быть представлена в виде взвешенной суммы теоретических дисперсий (Pedersen et al., 2019):

$$s_0^2 = p \cdot s_+^2 + (1 - p) \cdot s_-^2 + p \cdot (1 - p) \cdot (\bar{\tau}_+ - \bar{\tau}_-)^2, \text{ где}$$

$s_0^2$  – наблюдаемое среднее  $\tau$ ;

$s_+^2$  – теоретическое среднее  $\tau$  в выборке, если бы в ней все индивиды болели ТБ;

$s_-^2$  – теоретическое среднее  $\tau$  в выборке, если бы в ней никто не болел ТБ;

$p$  – распространенность ТБ в выборке.

Для расчета теоретических  $\tau$  симулируются 2 выборки. В первой симуляции предполагается, что никто в выборке не был болен туберкулезом. В таком случае частота встречаемости каждого признака равна 1 – spe (специфичность) данного признака (Boldsen, 2005). Вторая представляет симуляцию, при которой все в выборке были бы больны, тогда ожидаемая частота встречаемости признаков заболевания равняется показателю sens (чувствительности).

Средний Тау-индекс ( $\tau_0$ ) по группе Козино оказался равен -1,25 ( $\sigma = 2,94$ ). Значение теоретического Тау-индекса при ситуации, если бы никто в выборке не страдал от туберкулеза ( $\tau$ ), составило бы -1,26 ( $\sigma = 1,88$ ). Для обратной си-

туации ( $\tau^+$ ), данный показатель составил бы 2,09 ( $\sigma = 7,88$ ).

Таким образом, зафиксированное нами среднее значение  $\tau_0$  для серии Козино находится между двумя теоретическими:  $-1,26 < -1,25 < 2,09$ , и ближе к  $\tau^-$ . Это подтверждает наше первоначальное заключение о низкой частоте встречаемости заболевания в изученной серии.

### Оценка распространенности туберкулеза в группе

Для теоретической оценки значения распространенности инфекции ( $p$ ) строится специальная функция –  $f(p)$ , объединяющая среднее и дисперсию наблюдаемого и теоретических тау-индексов (Pedersen et al., 2019):

Данная функция аппроксимирует умноженный на -2 натуральный логарифм функции правдоподобия оценки распространенности

$$f(p) = \left( \frac{\bar{\tau}_0 - (p \cdot \bar{\tau}_+ + (1-p) \cdot \bar{\tau}_-)}{se(\bar{\tau}_0)} \right)^2 + \left( \frac{s_0^2 - (p \cdot s_+^2 + (1-p) \cdot s_-^2 + p \cdot (1-p) \cdot (\bar{\tau}_+ - \bar{\tau}_-)^2)}{se(s_0^2)} \right)^2$$

(Boldsen, 2005). Соответственно, значение  $p$ , при котором будет наблюдаться минимум данной функции ( $p$ ), будет являться максимально правдоподобной оценкой распространенности туберкулезной инфекции в исследуемой серии.

Максимально правдоподобная оценка распространенности туберкулеза ( $p$ ), составила 2,3% (при 95% доверительном интервале от 0 до 7,1%) (рис. 3).

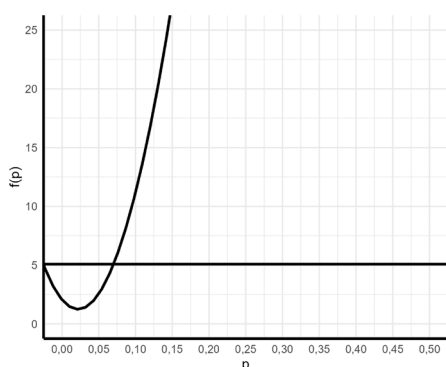


Рисунок 3. Оценка распространенности туберкулеза в серии Козино, полученная методом максимального правдоподобия. Горизонтальной линией показан 95% доверительный интервал

Figure 3. Maximum likelihood estimation of TB frequency in Kozino. Horizontal line marks the 95% intervals

Д. Педерсен и соавторами (Pedersen et al., 2019) сходным образом была изучена средневековая выборка из городского кладбища Рибе (Дания), и получено значение ( $p$ ) – 17%. Полученные в нашем исследовании более низкие значения ( $p$ ) для сельской выборки вполне согласуются с особенностями эпидемиологии туберкулеза, частота которого зависит от плотности населения. С учетом этого фактора, при равных эпидемиологических условиях в городской выборке показатель должен быть выше, чем в сельской группе. Обратим внимание, что в работе Д. Педерсен и соавторов были использованы только признаки на посткраниальном скелете. В то время, как наше исследование показывает очевидный вклад признаков на черепе в повышение числа случаев больных туберкулезом. Следовательно, можно предположить, что разрыв в показателях ( $p$ ) в сельской и городской выборке теоретически может быть еще больше.

Отметим другой важный момент. По рекомендации автора метода (Boldsen, 2005), необходимо пересчитать индивидуальные значения  $\tau$  после получения теоретических групповых значений индекса:

$$\tau_k^* = \tau_k + \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad \text{где}$$

$\tau_k$  – наблюдаемое значение  $\tau$  у  $k$ -го индивида;

$p$  – распространенность ТБ в выборке.

Считается, что пересчитанный индекс ( $\tau^*$ ) учитывает контекст, в котором находится каждый индивид выборки. Так, при одном и том же наборе симптомов, мы будем ожидать присутствие туберкулеза у индивида из популяции, где заболевание очевидно присутствует, чем у того, который происходит из популяции, где этого заболевания нет или оно встречается спорадически.

На примере Козино пересчитанное значение  $\tau^* > 1$  только у 2-х индивидов из выявленных ранее 27. Это молодые мужчина и женщина с полным комплектом необходимых для диагностики костей. Кроме того, у них отмечены самые высокие значения исходного  $\tau$  (инд. 97 и 123, табл. 2).

Полученный результат требует накопления данных. При всей своей логичности, предложенная Дж. Болдсенем специальная функция расчета  $\tau^*$  отвергает немалое число случаев

туберкулеза, выявленных при расчете  $\tau$ , которые были подтверждены затем методами палеогенетики (табл. 2).

#### Оценка качества полученной модели

Функция для оценки распространенности заболевания имеет распределение  $\chi$ -квадрат (Boldsen, 2005). Для оценки качества полученной модели можно использовать критерий  $\chi$ -квадрат с одной степенью свободы. Нулевая гипотеза состоит в том, что полученные среднее и дисперсия указывают на одно и то же значение  $\hat{p}$ . Эта гипотеза отвергается в случае, если  $f(p) > 3,84$ . В таком случае, полученное значение не является достоверной оценкой распространенности заболевания. Кроме того, значения  $p$ , удовлетворяющие условию  $f(p) - f(\hat{p}) < 3,84$ , входят в 95% доверительный интервал для  $\hat{p}$ .

Анализ качества построенной модели показал достаточно хороший уровень ее валидности ( $p$ -value = 0,25,  $f(\hat{p}) = 1,34$ ).

#### Обсуждение результатов

В серии Козино мы не зафиксировали специфических (традиционно используемых в диагностике туберкулеза) признаков заболевания. Однако, из апробированной программы атипичных индикаторов туберкулеза большая часть была отмечена на черепе, и чуть в меньшей степени – на позвонках и ребрах (рис. 4).

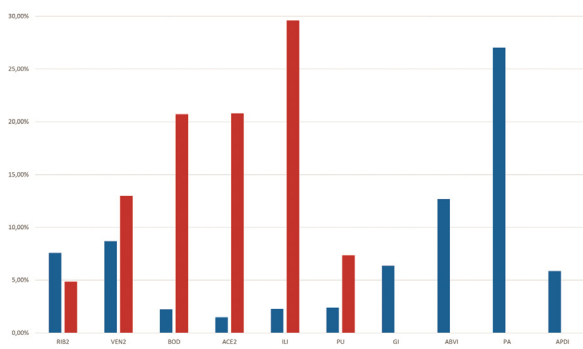


Рисунок 4. Частота встречаемости атипичных признаков туберкулеза в двух средневековых выборках, %. Условные обозначения: Синий – частота признаков в серии Козино (Россия); Красный – частота признаков в серии Риббе (Дания).

Обозначения признаков в таблице 1

Figure 4. Comparative frequency of skeletal manifestations of tuberculosis in two medieval populations. Legend: Blue bars – Kozino series (Russia); Red bars – Ribe series (Denmark).

Manifestation codes correspond to those in Table 1

Самая высокая частота отмечена для признака PA (периостальные отложения на поверхности внутренней пластинки черепа), который сам по себе не может расцениваться как специфический индикатор. Признак GI (зернистые вдавления), который по мнению О. Спеккер и соавторов (Spekker et al., 2021) считается патогномичным, отмечен нами с частотой 6,36%. В работе итальянских исследователей были изучены фрагменты эндокранов (212 инд.) из выборки X–XII вв. для оценки присутствия только признака GI, который дал величину – 53,7%, что вызвало сомнения в правомочности заявленного О. Спеккер и соавторами диагностического статуса этого признака (Genchi et al., 2025). Очевидно, только накопление новой информации позволит продолжить обсуждение патогномичности признака GI.

Из числа туберкулезных индикаторов посткраниального скелета, в серии Козино чаще всего признаки отмечались в области, близкой к легким (ребра и позвонки). Примечательно, что согласно тесту  $\chi^2$  частоты встречаемости этих признаков, как и индикаторов на локтевых костях, достоверно не отличается от частот, полученных для городской датской серии Риббе, упомянутой выше. Однако серия Риббе отличается высокой частотой признаков на тазовых костях (рис. 4). Заметим, что некоторые из индикаторов на тазовых костях осторожно рассматриваются исследователями, как диагностически ценные (Ortner, 2003). В выборках оседлых скотоводов они отмечались в наибольшей степени (Buzhilova, 2023).

Как видим, оценка вклада атипичных признаков по отдельности не дает однозначной картины в диагностике, что еще раз подтверждает тезис исследователей об использовании комплекса атипичных признаков с учетом различных комбинаций. Очевидно, что в таком случае успешность диагностики может быть подтверждена уровнем показателя  $\tau$ , как и при хорошей сохранности костей верифицирована палеогенетическими методами.

Метод вероятностного подхода был апробирован только на двух сериях (Риббе и Козино), однако даже при таком минимальном объеме изученного материала видна эффективность использования атипичных признаков. В ходе апробации и сопоставления результатов у нас появилось несколько важных комментариев.

Во-первых, необходимо обсудить потенциал расчета индекса  $\tau^*$  с учетом теоретического уровня распространения инфекции в группе. Напомним, что мы получили валидные результаты (верифицированные методами палеогенетики) без учета  $\tau^*$ , опираясь на заведомо промежуточный расчет индивидуальных значений  $\tau$ , который позволил оценить 27 индивидов с диагнозом туберкулеза, а не 2, как это получилось бы при полноценном использовании процедуры. Возможно, предложенный нами расчет индивидуальных  $\tau$  без учета значений  $\tau^*$  окажется более подходящим в данном алгоритме диагностики туберкулеза, требующим верификации  $\tau$  методами палеогенетики. Однако не все так однозначно. Несмотря на то, что в нашем случае молекулярный метод подтвердил диагноз в 100% случаев, другой группой исследователей при проведении палеогеномного анализа зубного камня из моляров умерших от туберкулеза (коллекция Терри) не удалось подтвердить достоверную связь между атипичными признаками, уровнем  $\tau$  и наличием *M. tuberculosis* у этих индивидов (Austin et al., 2024). Безусловно, такое противоречие требует накопления новых данных для более правомерной оценки полученных результатов.

Во-вторых, важно понимать, что эталонная коллекция, использованная в оценке «работоспособности» атипичных признаков, строго говоря, не совсем отвечает критериям подходящей выборки. Как мы указывали выше, в качестве обучающей выборки исследователями была использована паспортизованная коллекция Терри (Смитсоновский институт, США), состоящая из индивидов с известной причиной смерти из-за туберкулеза, что не исключало одновременного присутствия у них других заболеваний. Таким образом, значения показателей специфичности и чувствительности теоретически могут отличаться в других популяциях, как и у индивидов, переболевших туберкулезом, но умерших по другой причине.

В-третьих, в нашем исследовании оценивался  $\tau$  у неполовозрелых индивидов, для которых нами были взяты значения специфичности и чувствительности индикаторов туберкулеза по данным, полученным при анализе коллекции половозрелых индивидов, так как до нас никто индивидуальные значения  $\tau$  для детей не рассчитывал. Мы не можем исключить, что значения специфичности и чувствительности индикаторов

туберкулеза у детей могут иметь другие значения. С другой стороны, по данным палеопатологии известно, что у детей костная система может затрагиваться в большем количестве случаев, причем чаще туберкулезным менингитом (Lamb, Starke, 2017; Lewis, 2017). В нашем случае, эндокраниальные признаки также были отмечены в большем проценте случаев у неполовозрелых индивидов, аналогичный результат был обнаружен в работе других исследователей (Genchi et al., 2025). Итак, полученные тенденции на примере неполовозрелых индивидов Козино обнадеживают, однако для полноты данных необходимо провести дополнительные исследования на детской паспортизованной коллекции, и сопоставить значения специфичности и чувствительности индикаторов для половозрелых и неполовозрелых индивидов.

Предложенные О. Спеккер и Д. Педерсен индикаторы туберкулеза успели обрести популярность в палеопатологии (о чем свидетельствует число цитирований соответствующих публикаций). Тем не менее, на момент написания текста данной работы, статистический подход к оценке распространенности туберкулеза на основе данных признаков пока был применен только Д. Педерсен и соавторами при изучении городского кладбища в Дании (Pedersen et al., 2019). Практически не изучена этим методом встречаемость признаков на эндокраниальной поверхности, хотя весомый вклад этих признаков в значение  $\tau$  в нашем исследовании, как и высокий процент их присутствия у больных туберкулезом, обозначенных исследованиями О. Спеккер и соавторов указывают на их высокий потенциал.

## Заключение

Применение вероятностного подхода позволило выявить в серии Козино индивидов с признаками туберкулеза, чей диагноз был в полном объеме подтвержден палеогенетическим анализом. Таким образом, предложенный список атипичных костных индикаторов туберкулеза в сочетании с новым статистическим подходом (Тау-индексом) продемонстрировал свою актуальность для диагностики заболевания.

Данный метод может быть рекомендован для палеопатологических исследований, причем даже в таких сериях, где отсутствуют индивиды с классическими признаками туберкулеза.

Тем не менее, некоторые аспекты представленного подхода требуют дальнейшей разработки. В первую очередь, диагностика заболевания по детским останкам с правомочным использованием значений специфичности и чувствительности индикаторов. Важно увеличить число серий с сопоставлением результатов диагностики палеогенетическим методом и Тау-индексом. Кроме того, желательна более подробная разработка критериев постановки диагноза на индивидуальном уровне и верификации оценки уровня распространенности туберкулеза на популяционном уровне.

Увеличение числа сельских и городских выборок разных эпох и сохранности материалов с проведением унифицированной методики позволит ответить на многие вопросы для большей уверенности в «работоспособности» предложенного подхода.

### Список литературы

- Алексеев В.П., Дебец Г.Ф. Краниометрия. Методика антропологических исследований. М.: Наука. 1964. 127 с.
- Алексеев В.П. Остеометрия: Методика антропологических исследований. М.: Наука. 1966. 198 с.
- ВОЗ <https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/tuberculosis> обращение 21.12.2025
- Двуреченская Н.Д., Двуреченский О.В., Разуваев Ю.Д. Итоги работ на археологическом комплексе в с. Козино // Археологические открытия, 2011. Т. 2008. С. 136-137.
- Austin R.M., Honap T.P., Mann A.E., Hübner A., DeGaglia C.M.S., Warinner C., Zuckerman M.K., Hofman C.A. Metagenomic and paleopathological analyses of a historic documented collection explore ancient dental calculus as a diagnostic tool. *Scientific Reports*, 2024, 14 (1), pp. 14720. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64818-7>
- Boldsen J.L. Epidemiological approach to the paleopathological diagnosis of leprosy. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 2001, 115 (4), pp. 380-387. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1094>
- Boldsen J. L. Leprosy and mortality in the Medieval Danish village of Tirup *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 2005, 126 (2), pp. 159-168. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20085>
- Buzhilova A. Probable cases of tuberculosis in early medieval pastoralists of Eastern Europe. *Tuberculosis*, 2023, 143, pp. 102365. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2023.102365>
- Cohen M.N., Armelagos G.J. Paleopathology at the origins of agriculture: editors' summation In: *Paleopathology at the Origins of Agriculture*. Ed. by Cohen M. N., Armelagos G. J. Orlando, FL: Academic Press, 1984, pp. 585-601.
- Genchi M.L., Giuffra V., Campana S., Riccomi G. Are endocranial granular impressions pathognomonic of tuberculous meningitis or a marker of tuberculous infection? An investigation on a medieval osteoarcheological assemblage from Italy. *International Journal of Paleopathology*, 2025, 49, pp. 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2025.03.002>
- Hershkovitz I., Donoghue H.D., Minnikin D.E., Besra G.S., Lee O.Y., Germaey A.M., Galili E., Eshed V., Greenblatt C.L., Lemma E., Bar-Gal G.K., Spigelman M. Detection and molecular characterization of 9000-year-old Mycobacterium tuberculosis from a Neolithic settlement in the Eastern Mediterranean. *PLoS one*, 2008, 3 (10), pp. e3426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003426>
- Lamb G.S., Starke J.R. Tuberculosis in infants and children. *Tuberculosis and Nontuberculous Mycobacterial Infections*, 2017, pp. 541-569. <https://doi.org/10.1128/9781555819866.ch32>Digital Object Identifier
- Lewis M.E. *Paleopathology of children: Identification of pathological conditions in the human skeletal remains of non-adults*. London: Academic Press, 2017. 300 p.
- Ortner D.J. *Identification of pathological conditions in human skeletal remains*. San Diego, Calif.: Academic press, 2003. 608 p.
- Papa V., Galassi F.M., Varotto E., Gori A., Vaccarezza M. The Evolution of Diagnostic Techniques in the Paleopathology of Tuberculosis: A Scoping Review. *Pathogens and Immunity*, 2023, 8 (1), pp. 93-116. <https://doi.org/10.20411/pai.v8i1.597>
- Pedersen D.D., Milner G.R., Kolmos H.J., Boldsen J.L. The association between skeletal lesions and tuberculosis diagnosis using a probabilistic approach. *International Journal of Paleopathology*, 2018, 27, pp. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2019.01.001>
- Pedersen D.D., Milner G.R., Kolmos H.J., Boldsen J.L. Tuberculosis in medieval and early modern Denmark: A paleoepidemiological perspective *International Journal of Paleopathology*, 2019, 27, pp. 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2018.11.003>
- R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna: Austria, 2025. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Roberts C.A., Buikstra J.E. The history of tuberculosis from earliest times to the development of drugs. In: *Clinical tuberculosis*. CRC Press, 2021, pp. 3-15.
- Sabin S., Herbig A., Vågene Å.J., Ahlström T., Bozovic G., Arcini C., Bos K.I.A seventeenth-century Mycobacterium tuberculosis genome supports a Neolithic emergence of the Mycobacterium tuberculosis complex. *Genome biology*, 2020, 21 (1), pp. 201. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02112-1>
- Severinov K., Kuprikova K., Berezina N., Tsedilina T., Ivanova A., Botsmanov E., Klimuk E., Buzhilova A., Kritsky A. Highly accurate and efficient diagnostics of tuberculosis in ancient human remains. In: *Abstract book of the 11th International Symposium on Biomolecular Archaeology*, 2025, pp. 210.
- Spekker O., Hunt D.R., Berthon W., Molnár E., Pálfi G. Insights into the diagnostic efficacy and macroscopic appearance of endocranial bony changes indicative of tuberculous meningitis: Three example cases from the Robert J. Terry Anatomical Skeletal Collection. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2022, 32 (2), pp. 444-456. <https://doi.org/10.1002/oa.3079>Digital Object Identifier
- Spekker O., Hunt D.R., Berthon W., Paja L., Molnár E., Pálfi G., Schultz M. Tracking down the White Plague. Chapter three: Revision of endocranial abnormally pronounced digital impressions as paleopathological diagnostic criteria

for tuberculous meningitis. *Plos one*, 2021, 16(3), pp. E0249020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249020>

Spekker O., Hunt D.R., Paja L., Molnár E., Pálfi G., Schultz M. Tracking down the White Plague: The skeletal evidence of tuberculous meningitis in the Robert J. Terry Anatomical Skeletal Collection. *Plos one*, 2020a, 15 (3), pp. E0230418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230418>

Spekker O., Schultz M., Paja L., Váradi O.A., Molnár E., Pálfi G., Hunt D.R. Tracking down the White Plague. Chapter two: The role of endocranial abnormal blood vessel impressions and periosteal appositions in the paleopathological diagnosis of tuberculous meningitis. *Plos one*, 2020b, 15 (9), pp. E0238444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238444>

van Doren T.P. Biocultural perspectives of infectious diseases and demographic evolution: Tuberculosis and its comorbidities through history. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 2023, 32 (2), pp. 100-117. <https://doi.org/10.1002/evan.21970>

White T.D., Black M.T., Folkens P.A. Human osteology. Academic press, 2011. 591 p.

## References

Alekseev V.P., Debets G.F. *Craniometry: Methodology of Anthropological Research*. Moscow, Nauka Publ., 127 p. (In Russ.).

Alekseev V.P. 1966. *Osteometry: Methodology of Anthropological Research*. Moscow, Nauka Publ., 253 p. (In Russ.).

Austin R.M., Honap T.P., Mann A.E., Hübner A., DeGaglia C.M.S., Warinner C., Zuckerman M.K., Hofman C.A. Metagenomic and paleopathological analyses of a historic documented collection explore ancient dental calculus as a diagnostic tool. *Scientific Reports*, 2024, 14 (1), pp. 14720. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64818-7>

Boldsen J.L. Epidemiological approach to the paleopathological diagnosis of leprosy. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 2001, 115 (4), pp. 380-387. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1094>

Boldsen J. L. Leprosy and mortality in the Medieval Danish village of Tirup. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 2005, 126 (2), pp. 159-168. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20085>

Buzhilova A. Probable cases of tuberculosis in early medieval pastoralists of Eastern Europe. *Tuberculosis*, 2023, 143, pp. 102365. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2023.102365>

Cohen M.N., Armelagos G.J. Paleopathology at the origins of agriculture: editors' summation. In: *Paleopathology at the Origins of Agriculture*. Ed. by Cohen M. N., Armelagos G. J. Orlando, FL: Academic Press, 1984, pp. 585-601.

Genchi M.L., Giuffra V., Campana S., Ricconi G. Are endocranial granular impressions pathognomonic of tuberculous meningitis or a marker of tuberculous infection? An investigation on a medieval osteoarchaeological assemblage from Italy. *International Journal of Paleopathology*, 2025, 49, pp. 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2025.03.002>

Dvurechenskaya N. D., Dvurechensky O. V., Razuvaev Yu. D. Results of work at the archaeological complex in the village of Kozino. *Archaeological Discoveries*, 2011, 2008, pp. 136-137. (In Russ.).

Hershkovitz I., Donoghue H.D., Minnikin D.E., Besra G.S., Lee O.Y., Gernaey A.M., Galili E., Eshed V., Greenblatt C.L., Lemma E., Bar-Gal G.K., Spigelman M. Detection and molecular characterization of 9000-year-old Mycobacterium tuberculosis from a Neolithic settlement in the Eastern Mediterranean. *PloS one*, 2008, 3 (10), pp. e3426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003426>

Lamb G.S., Starke J.R. Tuberculosis in infants and children. *Tuberculosis and Nontuberculous Mycobacterial Infections*, 2017, pp. 541-569. <https://doi.org/10.1128/9781555819866.ch32>Digital Object Identifier

Lewis M. E. *Paleopathology of children: Identification of pathological conditions in the human skeletal remains of non-adults*. London: Academic Press, 2017. 300 p.

Ortner D.J. *Identification of pathological conditions in human skeletal remains*. San Diego, Calif.: Academic press, 2003. 608 p.

Papa V., Galassi F.M., Varotto E., Gori A., Vaccarezza M. The Evolution of Diagnostic Techniques in the Paleopathology of Tuberculosis: A Scoping Review. *Pathogens and Immunity*, 2023, 8 (1), pp. 93-116. <https://doi.org/10.20411/pai.v8i1.597>

Pedersen D.D., Milner G.R., Kolmos H.J., Boldsen J.L. The association between skeletal lesions and tuberculosis diagnosis using a probabilistic approach. *International Journal of Paleopathology*, 2018, 27, pp. 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2019.01.001>

Pedersen D.D., Milner G.R., Kolmos H.J., Boldsen J.L. Tuberculosis in medieval and early modern Denmark: A paleoepidemiological perspective. *International Journal of Paleopathology*, 2019, 27, pp. 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2018.11.003>

R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna: Austria, 2025. URL: <https://www.R-project.org/>.

Roberts C.A., Buikstra J.E. The history of tuberculosis from earliest times to the development of drugs. In: *Clinical tuberculosis*. CRC Press, 2021, pp. 3-15.

Sabin S., Herbig A., Vågene Å. J., Ahlström T., Bozovic G., Arcini C., Bos K. I.A seventeenth-century Mycobacterium tuberculosis genome supports a Neolithic emergence of the Mycobacterium tuberculosis complex. *Genome biology*, 2020, 21 (1), pp. 201. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02112-1>

Severinov K., Kuprikova K., Berezina N., Tsedilina T., Ivanova A., Botsmanov E., Klimuk E., Buzhilova A., Kritsky A. Highly accurate and efficient diagnostics of tuberculosis in ancient human remains. In: *Abstract book of the 11th International Symposium on Biomolecular Archaeology*, 2025, pp. 210.

Spekker O., Hunt DR., Berthon W., Molnár E., Pálfi G. Insights into the diagnostic efficacy and macroscopic appearance of endocranial bony changes indicative of tuberculous meningitis: Three example cases from the Robert J. Terry Anatomical Skeletal Collection. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2022, 32 (2), pp. 444-456. <https://doi.org/10.1002/oa.3079>Digital Object Identifier

Spekker O., Hunt D.R., Berthon W., Paja L., Molnár E., Pálfi G., Schultz M. Tracking down the White Plague. Chapter three: Revision of endocranial abnormally pronounced digital impressions as paleopathological diagnostic criteria for tuberculous meningitis. *Plos one*, 2021, 16(3), pp. E0249020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249020>

Spekker O., Hunt D.R., Paja L., Molnár E., Pálfi G., Schultz M. Tracking down the White Plague: The skeletal evidence of tuberculous meningitis in the Robert J. Terry Anatomical Skeletal Collection. *Plos one*, 2020a, 15 (3), pp. E0230418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230418>

Spekker O., Schultz M., Paja L., Váradi O.A., Molnár E., Pálfi G., Hunt D.R. Tracking down the White Plague. Chapter two: The role of endocranial abnormal blood vessel impressions and periosteal appositions in the paleopathological diagnosis of tuberculous meningitis. *Plos one*, 2020b, 15 (9), pp. E0238444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238444>

van Doren T.P. Biocultural perspectives of infectious diseases and demographic evolution: Tuberculosis and its comorbidities through history. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 2023, 32 (2), pp. 100–117. <https://doi.org/10.1002/evan.21970>

White T.D., Black M.T., Folkens P.A. Human osteology. Academic press, 2011. 591 p.

WHO <https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/tuberculosis> appeal 12/21/2025

## Информация об авторах/ Information about the authors

Куприкова Ксения Юрьевна, НИИ и Музей антропологии, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация  
[mintdoughnut@yandex.ru](mailto:mintdoughnut@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-7168-1160>

Бужилова Александра Петровна, д.и.н., НИИ и Музей антропологии, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация  
[albu\\_pa@mail.ru](mailto:albu_pa@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-6398-2177>

Kuprikova Ksenia Yurievna, Anuchin Research Institute and Museum of Anthropology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
[mintdoughnut@yandex.ru](mailto:mintdoughnut@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-7168-1160>

Buzhilova Alexandra Petrovna, Dr. Sc., Anuchin Research Institute and Museum of Anthropology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation  
[albu\\_pa@mail.ru](mailto:albu_pa@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-6398-2177>

---

Поступила в редакцию 13.03.2026.  
Получена после доработки 16.04.2026.  
Принята к публикации 16.04.2026.

Received 13.03.2026.  
Revised 16.04.2026.  
Accepted 16.04.2026.