

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ТЮМЕНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**ВЕСТНИК АРХЕОЛОГИИ, АНТРОПОЛОГИИ
И ЭТНОГРАФИИ**

Сетевое издание

**№ 2 (69)
2025**

ISSN 2071-0437 (online)

Выходит 4 раза в год

Главный редактор:

Зах В.А., д.и.н., ТюмНЦ СО РАН

Редакционный совет:

Молодин В.И., председатель совета, академик РАН, д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН;
Добровольская М.В., чл.-кор. РАН, д.и.н., Ин-т археологии РАН;
Бауло А.В., д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН;
Бороффка Н., PhD, Германский археологический ин-т, Берлин (Германия);
Епимахов А.В., д.и.н., Ин-т истории и археологии УрО РАН;
Кокшаров С.Ф., д.и.н., Ин-т истории и археологии УрО РАН; Кузнецов В.Д., д.и.н., Ин-т археологии РАН;
Лахельма А., PhD, ун-т Хельсинки (Финляндия); Матвеева Н.П., д.и.н., ТюмГУ;
Медникова М.Б., д.и.н., Ин-т археологии РАН; Томилов Н.А., д.и.н., Омский ун-т;
Хлагула И., Dr. hab., ун-т им. Адама Мицкевича в Познани (Польша); Хэнкс Б., PhD, ун-т Питтсбурга (США);
Чикишева Т.А., д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН

Редакционная коллегия:

Дегтярева А.Д., зам. гл. ред., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Костомарова Ю.В., отв. секретарь, ТюмНЦ СО РАН;
Пошехонова О.Е., отв. секретарь, ТюмНЦ СО РАН; Лискевич Н.А., отв. секретарь, к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;
Агапов М.Г., д.и.н., ТюмГУ; Адаев В.Н., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;
Бейсенов А.З., к.и.н., НИЦИА Бегазы-Тасмола (Казахстан); Валь Й., PhD, О-во охраны памятников
Штутгарта (Германия); Зимина О.Ю., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Ключева В.П., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;
Крийска А., PhD, ун-т Тарту (Эстония); Крубези Э., PhD, проф., ун-т Тулузы (Франция);
Кузьминых С.В., к.и.н., Ин-т археологии РАН; Перерва Е.В., к.и.н., Волгоградский ун-т;
Печенкина К., PhD, ун-т Нью-Йорка (США); Пинхаси Р., PhD, ун-т Дублина (Ирландия);
Рябогина Н.Е., к.г.-м.н., ун-т Гетеборга; Слепченко С.М., к.б.н., ТюмНЦ СО РАН;
Ткачев А.А., д.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Хартанович В.И., к.и.н., МАЭ (Кунсткамера) РАН

Утвержден к печати Ученым советом ФИЦ Тюменского научного центра СО РАН

Сетевое издание «Вестник археологии, антропологии и этнографии»
зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций; регистрационный номер: серия Эл № ФС77-82071 от 05 октября 2021 г.

Адрес: 625008, Червишевский тракт, д. 13, e-mail: vestnik.ipos@inbox.ru

Адрес страницы сайта: <http://www.ipdn.ru>

© ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, 2025

**FEDERAL STATE INSTITUTION
FEDERAL RESEARCH CENTRE
TYUMEN SCIENTIFIC CENTRE
OF SIBERIAN BRANCH
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

VESTNIK ARHEOLOGII, ANTROPOLOGII I ETNOGRAFII

ONLINE MEDIA

**№ 2 (69)
2025**

ISSN 2071-0437 (online)

There are 4 numbers a year

Editor-in-Chief

Zakh V.A., Doctor of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Editorial Council:

Molodin V.I. (Chairman of the Editorial Council), member of the RAS, Doctor of History,
Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)
Dobrovolskaya M.V., Corresponding member of the RAS, Doctor of History,
Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)
Baulo A.V., Doctor of History, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)
Boroffka N., PhD, Professor, Deutsches Archäologisches Institut (German Archaeological Institute) (Berlin, Germany)
Chikisheva T.A., Doctor of History, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)
Chlachula J., Doctor hab., Professor, Adam Mickiewicz University in Poznan (Poland)
Epimakhov A.V., Doctor of History, Institute of History and Archeology Ural Branch RAS (Yekaterinburg, Russia)
Koksharov S.F., Doctor of History, Institute of History and Archeology Ural Branch RAS (Yekaterinburg, Russia)
Kuznetsov V.D., Doctor of History, Institute of Archeology of the RAS (Moscow, Russia)
Hanks B., PhD, Professor, University of Pittsburgh (Pittsburgh, USA)
Lahelma A., PhD, Professor, University of Helsinki (Helsinki, Finland)
Matveeva N.P., Doctor of History, Professor, University of Tyumen (Tyumen, Russia)
Mednikova M.B., Doctor of History, Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)
Tomilov N.A., Doctor of History, Professor, University of Omsk

Editorial Board:

Degtyareva A.D., Vice Editor-in-Chief, Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Kostomarova Yu.V., Assistant Editor, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Poshekhonova O.E., Assistant Editor, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Liskevich N.A., Assistant Editor, Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Agapov M.G., Doctor of History, University of Tyumen (Tyumen, Russia)
Adaev V.N., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Beisenov A.Z., Candidate of History, NITSIA Begazy-Tasmola (Almaty, Kazakhstan),
Crubezy E., PhD, Professor, University of Toulouse (Toulouse, France)
Kluyeva V.P., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Kriiska A., PhD, Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)
Kuzminykh S.V., Candidate of History, Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)
Khartanovich V.I., Candidate of History, Museum of Anthropology and Ethnography RAS Kunstkamera
(Saint Petersburg, Russia)
Pechenkina K., PhD, Professor, City University of New York (New York, USA)
Pererva E.V., Candidate of History, University of Volgograd (Volgograd, Russia)
Pinhasi R., PhD, Professor, University College Dublin (Dublin, Ireland)
Ryabogina N.Ye., Candidate of Geology, Göteborgs Universitet (Göteborg, Sweden)
Slepchenko S.M., Candidate of Biology, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Tkachev A.A., Doctor of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)
Wahl J., PhD, Regierungspräsidium Stuttgart Landesamt für Denkmalpflege
(State Office for Cultural Heritage Management) (Stuttgart, Germany)
Zimina O.Yu., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Address: Chervishevskiy trakt, 13, Tyumen, 625008, Russian Federation; mail: vestnik.ipos@inbox.ru

URL: <http://www.ipdn.ru>

СЕЛЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВОЗРАСТА ЧЕЛОВЕКА (НА ПРИМЕРЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОБЛИТЕРАЦИИ ШВОВ ЧЕРЕПА)

Оценки возраста скелетов часто подвержены искажению из-за различий между возрастными составами исследуемой выборки и референтной группы, на анализе изменчивости которой основывается конкретный метод. На примере серии из 130 черепов с задокументированным возрастом, исследованных по методике Меиндла — Лавджоя, сравнивается эффективность нескольких различных алгоритмов оценки возраста, опирающихся на обучающие выборки с разным демографическим профилем. Показана зависимость оценок среднего возраста исследуемой серии от среднего возраста референтной группы. Предложен новый алгоритм, который включает в себя несколько регрессионных моделей, каждая из которых обучается на референтной группе со специфическим возрастным составом. При выборе подходящей модели в каждом конкретном случае алгоритм учитывает предварительную оценку возраста скелета, при этом сама модель не использует последнюю. Показана относительно высокая точность алгоритма по сравнению как с фазовым методом Меиндла — Лавджоя, так и с рядом современных методик. Оценки алгоритма, основанные на первичных данных разных авторов, обнаружили хороший уровень межисследовательской согласованности.

Ключевые слова: палеодемография, регрессионный анализ, референтная группа, биологический возраст, календарный возраст.

Ссылка на публикацию: Широбоков И.Г. Селективный подход к оценке возраста человека (на примере методов оценки облитерации швов черепа) // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2025. 2. С. 147–158. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2025-69-2-13>

Введение

Оценка возраста является одним из первых этапов антропологического исследования при работе со скелетными останками. В судебной антропологии она необходима для определения биологического профиля индивида и его идентификации, а в физической антропологии предоставляет важную информацию для палеодемографических исследований, а также является значимой переменной при изучении патологий и физической активности человека. При этом точная оценка возраста взрослого человека зачастую оказывается невозможной. Изменения в скелетных признаках, используемых в качестве маркеров возраста, вызваны не течением времени как таковым, а суммой биомеханических и физиологических процессов, которые не связаны напрямую с календарным возрастом [Nawrocki, 2010; Seguy, Buchet, 2013; Boldsen et al., 2022]. Неизбежные расхождения в оценках биологического и календарного возраста усугубляются несовершенством методик, искусственным характером балловых шкал, предназначенных для оценки признаков, и не всегда релевантным подбором референтных серий, результаты изучения возрастной изменчивости которых использовались при разработке конкретной методики.

На протяжении уже более сорока лет в антропологии ведется обсуждение одного из важнейших последствий неполной корреляции между скелетными признаками и календарным возрастом — проблемы возрастной мимикрии выборки. Демографический профиль референтной группы, результаты изучения изменчивости которой лежат в основе конкретной методики, влияет на оценки возраста в целевой выборке, смещая его в свою сторону [Bocquet-Appel, Masset, 1982; Konigsberg, Frankenberg, 1992]. В частности, мимикрия находит выражение в положительной корреляции между средним возрастом индивидов в референтной и целевой группах [Zambano, 2005; Nikita, Nikitas, 2019; Navitainuck et al., 2022].

Стараясь минимизировать влияние расхождений между биологическим и календарным возрастом, исследователи прибегают к двум разным типам стратегий повышения эффективности методов оценки возраста. Авторы одних методик пытаются обойти проблему возрастной мимикрии за счет применения сложных статистических моделей, обучаемых на коллекциях с широким возрастным интервалом [Milner et al., 2020; Navega et al., 2022; Constantinou et al.,

2023; и др.]. Предполагается, что многие методы машинного обучения, позволяющие обнаруживать нелинейные зависимости между признаками, помогают минимизировать ожидаемую величину ошибки в оценках, особенно при условии, что референтная группа включает большое число наблюдений и имеет равномерное (или близкое к нему) распределение возрастных групп.

Другие исследователи, обратившиеся к проблеме напрямую, в качестве опорной точки используют информацию об априорном распределении возрастных групп, которое затем корректируется согласно наблюдаемому в конкретной выборке распределению признаков. Иногда соответствующие методы даже не требуют получения индивидуальных оценок возраста и ориентированы на получение демографической характеристики всей серии [Caussinus, Courgeau, 2010; Seguy, Buchet, 2013]. В других случаях априорное распределение учитывается именно при индивидуальной оценке возраста, при расчете вероятности, что скелет, находящийся на конкретной стадии развития признака, может быть отнесен к некоторому возрастному интервалу [Sakaue, 2015; Boldsen et al., 2002]. Такие методики разрабатываются в рамках байесовского подхода, хотя и не всегда являются байесовскими в строгом смысле. Кроме того, исследователи продолжают искать подходы для снижения эффекта возрастной мимикрии в рамках регрессионных моделей, где ожидаемое распределение учитывается либо непосредственно при подборе состава референтной группы, либо в качестве соответствующих весовых коэффициентов в модели, применяемой к конкретной серии скелетов [Nikita, Nikitas, 2019; Navitainuck et al., 2022].

Редким примером того, как авторы, занимающиеся разработкой методик, переходят от одной стратегии к другой, является серия программ «Transition analysis». Версии TA2 (ADBOU) и TA3 объединяет только название. В первой версии программы при оценке вероятности того, что скелет с наблюдаемым комплексом признаков относится к конкретному возрасту, учитывается априорное распределение (пользователю предлагается выбрать один из двух вариантов) [Boldsen et al., 2002]. Однако последняя версия (TA3) полностью ориентирована на получение оценок возраста без учета какой-либо предварительной информации, путем применения одного из методов машинного обучения — случайной обобщенной линейной модели. Причем модель обучается на большой референтной выборке (более 1600 чел.) и включает в себя большой набор дискретных признаков [Milner et al., 2020]. Позволяет ли переход от одного анализа к другому действительно получать более точные оценки, исследователям еще предстоит выяснить. Первые результаты тестирования бета-версии программы, по признанию самих авторов, носят противоречивый характер. С другой стороны, результаты, полученные с использованием байесовских подходов, зачастую не превосходят по своей точности результаты, полученные с использованием традиционных методов линейной регрессии [Jooste et al., 2022] или регрессионных моделей с настраиваемым составом референтной серии [Nikita, Nikitas, 2019]. К сожалению, осознание важности учета ожидаемого распределения выборки само по себе еще не гарантирует, что такое распределение будет рассчитано или выведено из внешних источников с высокой степенью надежности. Однако, как увидим далее, если авторы метода игнорируют проблему референтной серии, то внедрение нейросетей не позволяет приблизиться к решению проблемы, а напротив, приводит к еще большему искажению оценок.

Среди исследователей, как учитывающих проблему возрастной мимикрии, так и игнорирующих ее, по-прежнему популярны методы, основанные на анализе степени облитерации швов черепа, исторически принадлежащие к числу наиболее ранних методов оценки возраста скелетов. Облитерация швов является редким примером возрастных изменений в скелете взрослого человека, которые не относятся к числу дегенеративных, и степень ее выраженности на разных участках, по-видимому, может иметь функциональное значение [Di Ieva et al., 2013; White et al., 2021]. Возможно, поэтому корреляция между степенью зарастания швов и календарным возрастом имеет, как правило, умеренную величину, и даже у людей пожилого возраста нередко со стороны внешнего свода фиксируются полностью открытые швы [Key et al., 1994; Di Ieva et al., 2013]. Некоторые исследователи отрицают целесообразность использования оценки степени облитерации швов для индивидуальных оценок [Brooks, 1955; Boldsen et al., 2022], тогда как другие продолжают применять соответствующие методики, часто в комплексе с другими методиками [Seguy, Buchet, 2013; Navega et al., 2022; Constantinou et al., 2023]. Вероятно, доля последних особенно высока среди антропологов, работающих со скелетными останками из материалов археологических раскопок. Кости свода черепа обычно хорошо сохраняются, в том числе в условиях, когда использование методов, основанных на изменениях суставных поверхностей костей, оказывается невозможным из-за неудовлетворительной сохранности.

Ранее некоторые исследователи, изучавшие возрастную изменчивость облитерации швов в рамках традиционного подхода, предлагали селективный подход к анализу возрастного состава скелетных серий [Key et al., 1994; Perizonius, 1984]. Так, В. Перизониус, изучивший коллекцию черепов Амстердамского университета, обнаружил, что корреляции между показателями облитерации швов в группе индивидов моложе 50 лет заметно выше, чем у пожилых индивидов [Perizonius, 1984]. Исследователь предложил разные методы оценки возраста для индивидов, входящих в разные возрастные группы, но не указал способа для их разделения. Впоследствии К. Ки с соавторами предложили свой способ оценки возраста отдельно для двух групп взрослых — старше и моложе 50 лет. При этом сама процедура отнесения к одной из двух групп также основывается на оценке степени облитерации швов на отдельных участках [Key et al., 1994].

Идея селективного подхода к оценке возраста взрослых людей не получила широкого признания среди исследователей. Вполне очевидно, что в дополнение к невысокой точности оценок, основанных на степени облитерации швов, такой подход несет в себе риски заметных ошибок уже на этапе установления исходной принадлежности индивидов к одной из возрастных групп, разделяемых по условной границе. И все же эта идея несомненно содержит рациональное зерно¹. В настоящей статье предлагается новый, гибкий алгоритм оценки возраста, основанный на селективном подходе. В нем учитывается как проблема возрастной мимикрии, так и невозможность строгого отнесения индивидов к определенной возрастной группе. Алгоритм объединяет несколько статистических моделей, каждая из которых обучается на собственной референтной серии. Возрастной состав серий формируется с учетом ожидаемого возрастного интервала, в котором находится реальный возраст индивида. Такой интервал может быть рассчитан различными способами, но должен быть достаточно широким, с тем чтобы минимизировать вероятность ошибки при подборе референтной группы. Например, референтные группы могут формироваться путем исключения из исходной обучающей выборки пожилых индивидов при оценке возраста индивидов, возраст которых предварительно оценивается как молодой, и молодых индивидов при оценке возраста пожилых людей. Минимальные изменения вносятся в состав группы для оценки возраста людей предположительно зрелого возраста, календарный возраст которых может отличаться в сторону как завышения, так и занижения от предварительно установленного исследователем. Алгоритм применяет соответствующие статистические модели к отдельным индивидам, а затем объединяет полученные оценки и рассчитывает общее возрастное распределение в серии.

Теоретически новый метод может оказаться полезным в условиях, когда: 1) исследователь имеет дело с неполными скелетами; 2) набор доступных признаков, коррелирующих с возрастом, заметно ограничен, а сами корреляции имеют умеренную величину. Главной целью такого подхода является минимизация величины систематической ошибки в оценках возраста во всех возрастных группах. В настоящей статье эффективность описанного подхода протестирована на примере методик оценки возраста по степени облитерации швов, фиксируемых в соответствии с методикой Меиндла — Лавджоя [Meindl, lovejoy, 1985].

Материалы и методы

Материалы, использованные в исследовании, делятся на две основные группы. Состав и возрастное распределение групп представлены в табл. 1 и на рис. 1. В первую группу вошли 130 черепов с задокументированным полом и возрастом смерти, находящиеся в фондах МАЭ РАН. В дальнейшем эта группа называется тестовой выборкой. Основу выборки составили черепа, переданные в Кунсткамеру из Военно-медицинской академии К.З. Яцутой в 1910-х гг. В МАЭ РАН они зарегистрированы в составе коллекций 1830, 1831, 1989, 1994, 2222, 2223, 2282 и 2303. Черепа принадлежали жителям различных регионов Европейской России, преимущественно русским, а также немцам, финнам и полякам. Кроме того, в выборку вошли 13 черепов из раскопок кладбищ Куркиеки и Суйстамо в Карелии, исследованных В.И. Хартановичем ([Хартанович, 1986, 1990]; коллекции 6843, 6930), а также череп Н.Н. Миклухо-Маклая (коллекционный номер 6499-1).

Вторую группу составили литературные и архивные данные различных авторов, использованные в качестве обучающей выборки для двух регрессионных моделей, предложенных автором. В общей сложности были учтены оценки облитерации швов, установленные в соответствии с методикой Меиндла — Лавджоя на черепах нескольких сотен человек разного пола и

¹ В действительности при работе со скелетными сериями каждый антрополог использует именно селективный подход, поскольку оперирует разными методами оценки при установлении возраста индивидов, предварительно отнесенных к группам детей, подростков и взрослых.

происхождения. Методы, основанные на объединенных выборках, на практике оказываются чаще более эффективными, чем методы, предназначенные для анализа некоторых подгрупп, выделяемых по полу и/или происхождению [Nawrocki, 2010; Sgheiza, Liversidge, 2023]. Важнейшую роль играет возможность учета как можно большего числа наблюдений для каждой возрастной группы в обучающей выборке, поскольку доля индивидуальной изменчивости в общей возрастной изменчивости признаков, по всей видимости, заметно превышает доли, обусловленные их межпопуляционной и межполовой вариативностью.



Рис. 1. Исходный возрастной состав обучающей и тестовой выборки.

Процедура изменения демографического профиля обучающей выборки описана в тексте.

Fig. 1. Initial age-at-death distribution of the training and test samples. The procedure for changing the demographic profile of the training sample is described in the text.

Таблица 1

Информация о коллекциях скелетов (черепов) с задокументированным возрастом, данные которых были использованы в настоящем исследовании

Table 1

Information on the collections of skeletons with documented ages, the data of which were used in this study

Название коллекции	Число индивидов	Мин. и макс. возраст (лет)	Источник индивидуальных данных	Роль коллекции в исследовании
Коллекция Р.Дж. Терри Смитсоновского института, США	791	14-102	W.L. Konigsberg и D. Wescott (http://faculty.las.illinois.edu/lylek/)	Обучающая выборка
Коллекция У. Басса Центра судебной антропологии Университета Теннесси, коллекция Р.Дж. Терри; Смитсоновского института, США	309	16-98	Hardin, 1999	Обучающая выборка
Кладбища и судебно-медицинские учреждения Боготы, Колумбия	100	14-89	Ramos Gaitán, 2003	Обучающая выборка
Коллекция Афинского университета, Греция	12	26-78	Constantinou et al. 2023 (https://github.com/cconsta1/age-estimation-notebook)	Обучающая выборка
Коллекция К.З. Яцуты МАЭ РАН, Россия	116	18-70	Неопубликованные данные автора	Тестовая выборка
Кладбища Куркиеки и Суйстамо, МАЭ РАН, Россия	13	21-81	Неопубликованные данные автора	Тестовая выборка
Череп Н.Н. Миклухо-Маклая, МАЭ РАН, Россия	1	42	Неопубликованные данные автора	Тестовая выборка

В объединенном наборе данных были учтены оценки разных исследователей, в том числе установленные на группе одних и тех же черепов из коллекции Р.Дж. Терри Смитсоновского института США, поэтому общее число наблюдений (1212) выше реального числа черепов. Объединение данных является сознательным решением автора. Хорошо известно, что при использовании даже строго формализованных методик неизбежно возникают некоторые расхождения при оценке признаков разными исследователями, что влияет и на точность окончательных оценок возраста. Нередко авторы публикаций рассчитывают показатели согласованности оценок, однако фактически наблюдаемые расхождения в дальнейшем никак не учитываются. Одни признаки хуже поддаются точной оценке, чем другие, а воспроизводимость оценок, к сожалению, лишь косвенно связана с их вкладом в модель определения возраста². Включение в обучающую выборку данных разных авторов представляется хорошим способом минимизировать влияние неизбежных (но, как правило, не подлежащих точной оценке) расхождений между исследователем и автором конкретного метода в оценках исходных признаков. Такой подход, вероятно, приведет к некоторому занижению корреля-

² Например, относительно высокая популярность метода Меиндла и Лавджоя объясняется большей легкостью оценки степени облитерации швов с внешней поверхности, хотя все исследователи признают, что облитерация начинается со стороны эндокрана и нередко даже у пожилых людей не охватывает внешнюю поверхность. Однако оценка швов со стороны эндокрана часто затруднена при работе с целыми черепами из-за загрязненности останков из археологических раскопок и потенциально более высоких рисков межисследовательских расхождений.

ций между признаками и календарным возрастом вследствие роста статистического шума, однако он позволяет избегать завышения ожидаемой точности алгоритма.

Исследование проводилось автором в три этапа. На первом этапе для каждого индивида из тестовой выборки была определена общая визуально-субъективная оценка возраста. Для этой цели без фиксации конкретных признаков оценивались степень стертости зубов, степень облитерации швов со стороны эндокрана, а также общее состояние костей (относительная плотность кости, атрофические изменения верхней и нижней челюстей, состояние суставных поверхностей). Спустя месяц автор провел повторной осмотр черепов и дал новые оценки возраста. Первоначально такая двойная оценка проводилась для решения задач, которые выходят за рамки данного исследования и будут предметом отдельной публикации. В настоящем исследовании усредненные показатели используются в качестве предварительных оценок возраста индивидов, учитываемых в рамках одного из описанных ниже алгоритмов.

На втором этапе автор провел оценку степени облитерации швов на внешней поверхности той же серии черепов в соответствии с методикой Меиндла — Лавджоя. Облитерация швов оценивалась по четырехбалльной шкале на 10 участках черепа протяженностью 1 см каждый (см. подробности в: [Meindl, Lovejoy, 1985]). Баллы, установленные для парных участков, усреднялись.

На третьем этапе полученные данные использовались для тестирования точности нескольких различных алгоритмов оценки возраста, в основе каждого из которых лежит методика Меиндла — Лавджоя:

- исходная методика Меиндла — Лавджоя, основанная на вычислении среднего возраста, стандартного отклонения и возрастного диапазона индивидов, суммарный показатель облитерации швов которых соответствует некоторой величине [Meindl, Lovejoy, 1985];

- уравнения линейной регрессии С. Навроцки, рассчитанные для мужчин и женщин европейского происхождения [Nawrocki, 1998]³;

- регрессионная модель и нейросеть, реализованные в веб-приложении AgeEST, которое было создано группой греческих исследователей по результатам работы с коллекцией скелетов Афинского университета [Constaninou et al., 2023];

- регрессионная модель, основанная на методе опорных векторов (SVM-1), обученная на референтной серии с заданным средним возрастом и близким к равномерному распределению;

- алгоритм, включающий в себя несколько регрессионных моделей (SVM-2), каждая из которых использует метод опорных векторов и была обучена на собственной референтной серии с близким к равномерному возрастным распределением, настроенным с учетом ожидаемой оценки возраста индивидов.

Последние два алгоритма были созданы автором. При обработке данных, обучении и тестировании моделей были использованы программы, написанные на Python (библиотека scikit-learn) [Pedregosa et al., 2011]. Первоначальный код программ был написан при помощи ChatGPT (версии 3.5 и 4o) и затем по необходимости редактировался автором. Модели обучались на данных референтных серий, сформированных на основе описанной выше обучающей выборки. Для модели SVM-1 использовалась референтная серия с возрастным диапазоном от 14 до 101 года и средним возрастом, примерно соответствующим среднему возрасту индивидов в тестовой выборке (45 и 43 года соответственно). При обучении моделей SVM-2 использовались несколько референтных серий с разными возрастными диапазонами, учитывающими ожидаемый возраст индивидов.

Ожидаемый возраст устанавливался следующим образом. Изначально автор оценил возраст большинства индивидов в 10- и 15-летних интервалах либо использовал открытый интервал (обычно «старше 55 лет»). Очевидно, что реальный календарный возраст может заметно отличаться от этих оценок. Об этом свидетельствуют результаты методического воркшопа, проходившего в стенах МАЭ РАН в 2014 г. Тогда участники-антропологи независимо друг от друга оценили пол и возраст 15 случайно отобранных черепов из коллекции К.З. Яцуты возрастом от 25 до 68 лет. Обнаружилось, что среднее отклонение точечных оценок (середины интервала) от реального возраста составило 8.4 года, а отклонения 95 % оценок находились в пределах 19 лет.

Автор исходил из консервативной оценки, согласно которой ожидаемый возраст индивида находится в пределах 20 лет от границ первоначально установленного интервала. То есть, если возраст индивида изначально автором был оценен в интервале 40–50 лет, алгоритмом ожидаемый

³ Выбор именно этих уравнений обусловлен набором используемых признаков, поскольку большинство уравнений С. Навроцки требует изучения зарращения швов на дополнительных участках. В данном случае лишь в уравнении для женщин возникла необходимость включить данные по облитерации на среднем участке сагиттального шва со стороны эндокрана.

возраст оценивался в 20–70 лет. Соответствующая референтная группа включала в себя индивидов, возраст которых находился в пределах этого диапазона. Для оценок с открытым интервалом (старше 50 лет) отбирались индивиды старше 30 лет, но верхняя граница не устанавливалась.

На первый взгляд может показаться, что такой подход к формированию референтных групп не дает особых преимуществ алгоритму, потому что возрастной диапазон все равно остается довольно широким. Однако, поскольку хорошо известно, что корреляция между календарным возрастом и показателями облитерации швов, как правило, невелика, использование нескольких референтных групп, незначительно отличающихся по возрастному составу, позволяет избавиться от наиболее серьезных ошибок в оценках, а также снизить эффект регрессии к среднему (завышения возраста молодых взрослых и его занижения у пожилых).

Относительная эффективность алгоритмов оценивалась путем сопоставления величин средней абсолютной ошибки (MAE — mean absolute error) и средней систематической ошибки (bias), рассчитываемых для отдельных возрастных групп (10-летних когорт). Первая рассчитывалась как средняя абсолютная разница между установленным и задокументированным возрастом, вторая — как средняя разница между установленным и задокументированным возрастом (т.е. с учетом направления расхождений).

Для оценок, полученных в рамках регрессионных моделей SVM-1 и SVM-2, рассчитывались доверительные интервалы. Границы последних устанавливались с учетом распределения 95 % отклонений предсказанных оценок от реального возраста индивидов в обучающей серии (по результатам кросс-валидации).

Межисследовательские расхождения

Тот факт, что в рамках одного из алгоритмов (SVM-2) учитываются предварительные исследовательские оценки возраста, может вызвать сомнения в воспроизводимости и сопоставимости итоговых оценок. Однако следует подчеркнуть, что такие оценки учитываются только при выборе алгоритмом подходящей модели, но не используются в качестве независимой переменной. Кроме того, как указано выше, алгоритм выстроен таким образом, что при подборе референтной группы с определенным возрастным составом точность предварительных оценок воспринимается им как незначимая. Теоретически различия в оценках между исследователями должны носить действительно кардинальный характер, чтобы повлиять на окончательные результаты.

Для проверки этого утверждения были дополнительно привлечены оценки других исследователей. Согласованность оценок устанавливалась при помощи коэффициента внутриклассовой корреляции (ICC (2, k)) [Shrout, Fleiss, 1979]. Тест проводился в двух вариантах. В первом варианте использовались оценки возраста, независимо полученные четырьмя исследователями при работе с черепами из коллекции К.З. Яцуты. Опыт работы со скелетными останками среди участников варьирует от начального до 18 лет. Во втором варианте использовались как предварительные оценки возраста, так и балловые оценки, вынесенные в соответствии с методикой Меиндла — Лавджоя двумя исследователями при работе с 47 черепами из коллекции К.З. Яцуты (№ 1830).

Таблица 2

Коэффициенты внутриклассовой корреляции между оценками возраста, полученными разными исследователями непосредственно при осмотре черепов и при помощи модели SVM-2 (тестовая выборка)

Table 2

Intraclass correlation coefficients between age estimates obtained by different researchers directly from skull examination and using the SVM-2 model (test sample)

Вариант анализа	Согласованность предварительных оценок возраста	Согласованность оценок возраста, установленных моделью SVM-2
Независимые оценки возраста черепов из коллекции К.З. Яцуты (Е.В. Пугачева, М.И. Самохина, Е.Н. Учанева, И.Г. Широбоков)	0.83 CI 95% = 0.77–0.88	0.96 CI 95% = 0.95–0.97
Независимые оценки возраста и степени облитерации швов черепов из коллекции МАЭ РАН № 1830 (Е.В. Пугачева, И.Г. Широбоков)	0.77 CI 95% = 0.54–0.88	0.89 CI 95% = 0.80–0.94

Как и ожидалось, окончательные оценки моделей, учитывающих предварительные оценки возраста, вынесенные разными исследователями, но основанных на одном и том же наборе балловых значений признаков (оцененных автором), оказались более близкими между собой, чем сами предварительные оценки (табл. 2). Но большую согласованность обнаруживает и второй вариант теста, полностью соответствующий условиям применения метода на практике. В этом случае коэффициент внутриклассовой корреляции для оценок модели также оказался

Селективный подход к оценке возраста человека (на примере методов оценки облитерации швов черепа)

заметно выше, чем для предварительных оценок. Косвенно этот результат подтверждает, что включение в обучающую выборку наборов данных с балловыми оценками, вынесенными разными исследователями, оказалось правильной стратегией.

Основные результаты

Основные результаты исследования приведены в табл. 3. По сравнению с уравнениями С. Навроцки и моделями AgeEst исходный метод Меиндла — Лавджоя и обе предложенные автором регрессионные модели характеризуются меньшей величиной как абсолютной, так и систематической ошибки в большинстве возрастных групп. При этом регрессионная модель SVM-2 отличается в целом наименьшими значениями систематических ошибок.

Таблица 3

Средняя величина ошибки, рассчитанная для различных методов оценки возраста скелета, основанных на системе оценки облитерации швов Меиндла — Лавджоя [1985]

Table 3

Average error values calculated for different skeletal age estimation methods based on the suture obliteration scoring system from Meindl, Lovejoy, 1985

Возрастная группа	Ошибка	Исходный метод (свод / латерально-передние участки)	Nawrocki, уравнения 7 и 8	AgeEST: регрессионная модель / нейросеть	SVM-1	SVM-2
≤29	MAE *	9,9 / 10,8	17,3	25,1 / 25,2	7,6	8,8
	bias	9,9 / 10,8	16,4	25,1 / 25,0	5,4	4,5
30–39	MAE	4,9 / 6,2	20,7	21,9 / 22,7	11,9	11,4
	bias	3,0 / 2,9	18,3	21,9 / 22,7	5,2	4,3
40–49	MAE	7,9 / 6,3	18,8	15,5 / 15,6	10,3	11,0
	bias	-6,8 / -5,8	11,3	11,4 / 12,4	-3,5	-0,7
50–59	MAE	13,3 / 12,1	15,7	9,3 / 11,6	10,5	9,0
	bias	-13,3 / -12,1	3,0	7,8 / 8,7	-9,3	-0,1
60–70	MAE	—	9,1	3,4 / 6,5	12,7	8,3
	bias	—	3,8	-1,0 / -0,1	-12,7	-5,7
70+	MAE	—	12,7	7,7 / 13,3	20,5	9,7
	bias	—	4,3	-7,7 / -10,9	-20,5	-9,7

* MAE — средняя абсолютная ошибка, bias — средняя систематическая ошибка.

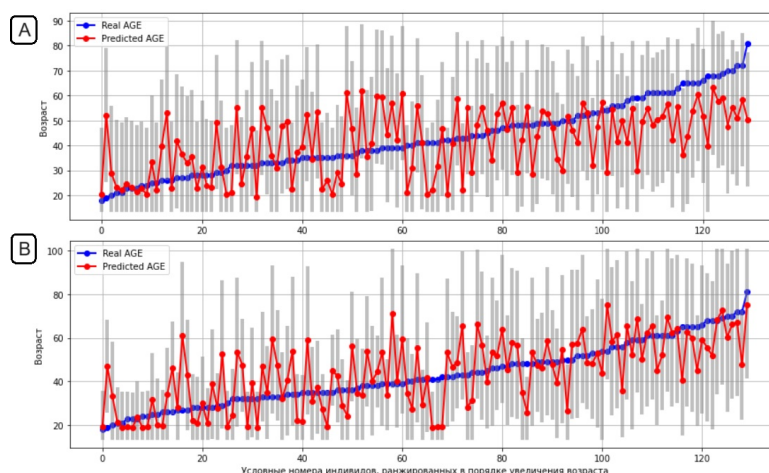


Рис. 2. Точечные оценки возраста и 95%-ные доверительные интервалы (серые столбики), рассчитанные для индивидов тестовой выборки по результатам применения регрессионных моделей SVM-1 (A) и SVM-2 (B).

Fig. 2. Point estimates of age and 95% confidence intervals (grey bars) calculated for individuals in the test sample from the SVM-1 (A) and SVM-2 (B) regression models results.

Отчасти эти результаты обусловлены различиями в среднем возрасте индивидов в референтных группах (табл. 4). В недавнем исследовании, авторы которого применяли разные методы оценки возраста к одной и той же выборке, было показано, что различия в оценках среднего возраста популяций могут объясняться именно возрастной мимикрией [Navitainuck et al., 2022]. Теоретически можно было бы ожидать, что важное влияние оказывают различия в балловых шкалах и типах признаков, используемых в разных методиках. Новые данные подтверждают, что основная причина расхождений кроется именно в возрастном составе референтных групп.

Средний возраст индивидов в референтной и тестовой выборках

Table 4

Average age of individuals in the reference and test samples

Метод	Средний возраст в референтной группе	Прогнозируемый средний возраст в тестовой выборке	Разница между реальным и прогнозируемым средним возрастом
Исходный метод Меиндла — Лавджоя *	41,7	38,7	4,3
Nawrocki, 1998	53,7	54,9	-11,9
AgeEST	55,7	57,2	-14,2
SVM-1	45,1	39,3	3,7
SVM-2	45,3 (42,5) **	41,4	1,6

* Средний возраст согласно приблизительным расчетам, приведенным в [Navitainuck et al., 2022, Appendix S6].

** Средний возраст зависит от предварительной исследовательской оценки. В ячейке приведен возраст, рассчитанный как среднее взвешенное средних значений возраста четырех референтных групп, используемых моделью (в скобках приведено среднее невзвешенное значение).

Возраст большинства индивидов находится в пределах доверительных интервалов, предсказанных моделями SVM-1 и SVM-2 (96.9 и 93.1 % соответственно) (рис. 2). При этом возраст 94.6 % индивидов оказался в пределах возрастной изменчивости тех референтных групп, на которых происходило обучение моделей, что свидетельствует о приемлемой оценке расхождений между предварительными оценками возраста и его реальными индивидуальными значениями.

Обсуждение

Существует множество различных методов оценки возраста, включая сложные статистические алгоритмы, овладение которыми требует от исследователей больших усилий и временных затрат. Традиционные способы оценки возраста отличаются большей притягательностью в силу как относительной простоты, так и наглядности. Пользуясь схемой «стадия развития признака А соответствует возрастному интервалу В», исследователь полагает, что обладает прямым контролем над процессом оценки (но, как показывает проблема возрастной мимикрии, это не так), однако чувство контроля утрачивается, как только он переходит к использованию нейросетей или любых байесовских моделей. Полученные результаты демонстрируют, что методы оценки возраста независимо от степени сложности статистического аппарата могут быть не слишком эффективны, если в алгоритме не учитываются возможные различия в составе исследуемой и референтной групп.

Средний возраст индивидов в тестовой выборке, установленный при помощи классического метода Меиндла — Лавджоя, достаточно близок к реальному. Отчасти это объясняется близостью первого к среднему возрасту в референтной серии, изученной авторами метода. Однако рассчитанные величины ошибок свидетельствуют о его низкой точности при оценке возраста молодых и пожилых взрослых, не говоря уже о том, что фазовый метод вообще не предполагает сколько-нибудь точной оценки возраста людей старше 50–55 лет.

Низкие и сопоставимые результаты уравнений С. Навроцки и моделей AgeEST подтверждают, что важность выбора статистического метода анализа данных не так велика, как подбор релевантной обучающей выборки. Авторы опирались на анализы небольших референтных серий, проведенные в одном случае при помощи простой линейной регрессии, а в другом — методов машинного обучения. Но в обоих случаях модели показали максимально низкие результаты точности — во многом по причине расхождений в величине среднего возраста референтной и тестовой серий. Разработчики AgeEST протестировали множество методов машинного обучения, прежде чем остановиться на выбранных моделях и настроить их гиперпараметры для достижения максимально высокой точности [Constantinou et al., 2023]. Однако такой подход привел к чрезвычайному завышению реальной эффективности модели. При этом проблема референтной группы упоминалась авторами метода, но никак не учитывалась в исследовании. (Следует оговориться, что программа позволяет учитывать признаки не только черепа, но и тазовых костей, — и в случае объединения данных точность методики, вероятно, будет несколько выше.)

Регрессионная модель SVM-1, возраст референтной группы которой примерно соответствует возрасту в тестовой выборке, показала более высокую степень эффективности. И все же она демонстрирует относительно высокую систематическую ошибку при оценке возраста в группах старше 60 лет. Отчасти этот результат обусловлен регрессией к среднему. Неважно, используем ли мы методом линейной регрессии или сложным методом машинного обучения, при неидеальной корреляции оценки возраста будут смещаться к средним значениям. Корреляции между степенью облитерации швов и возрастом имеют умеренную величину. Следовательно, в референт-

Селективный подход к оценке возраста человека (на примере методов оценки облитерации швов черепа)

ную группу необходимо включать не только индивидов, возраст которых соответствует ожидаемому в исследуемой выборке, но и тех, возраст которых заметно выходит за пределы ожидаемого интервала. Поэтому в референтную группу следует включать подростков, даже несмотря на то что мы не пытаемся путем оценки степени облитерации швов оценить возраст в этой когорте.

Кроме того, проблема заключается в том, что ожидаемый средний возраст в выборке, с которой работает исследователь, не всегда может быть оценен адекватно — преимущественно из-за ограничений классических методик в оценке возраста пожилых индивидов. Эту проблему в какой-то степени позволяет решить алгоритм SVM-2. Относительно низкая для методов, основанных на анализе степени облитерации швов, величина абсолютной и систематической ошибок возрастает только в финальной для тестовой выборки когорты индивидов старше 70 лет. Для повышения точности, вероятно, при предварительной оценке возраста можно было бы выделить группу не только пожилого, но и старческого возраста. Дегенеративные возрастные изменения скелета в этом случае должны быть выражены столь заметно, что для референтной группы соответствующей модели можно было бы с уверенностью исключить индивидов моложе 50 лет. Надежность выделения такой дополнительной категории при работе с черепами еще предстоит выяснить в дальнейшем.

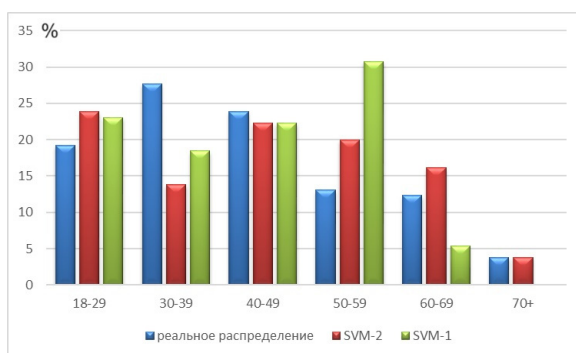


Рис. 3. Реальное распределение возрастных групп в тестовой выборке и варианты распределений, основанные на индивидуальных точечных оценках регрессионных моделей SVM-1 и SVM-2.

Fig. 3. Actual age-at-death distribution in the test sample and variants of distributions based on individual point estimates of the SVM-1 and SVM-2 regression models.

Формы распределения долей возрастных групп в тестовой выборке подтверждают большую точность алгоритма, использующего несколько референтных групп, по сравнению с моделью, средний возраст которой настроен на возраст в тестовой выборке (рис. 3). Наиболее существенные отклонения обнаруживаются в оценке доли индивидов 30–39 лет. Представленные распределения выстроены на основании точечных оценок возраста. Можно ожидать, что при расчетах, основанных на учете ожидаемых отклонений индивидуальных оценок в границах рассчитанных доверительных интервалов, оба модельных распределения имели бы более гладкую форму.

Заключение

Корректный подбор референтной группы имеет принципиальное значение для надежной оценки возраста в выборках скелетов с неизвестными или недостоверно установленными половозрастными характеристиками, в том числе в выборках, полученных при раскопках археологических памятников. Авторы некоторых современных исследований признают важным подбирать состав референтной выборки таким образом, чтобы средний возраст индивидов или ее возрастной состав максимально точно соответствовали таковым в целевой выборке. Однако у исследователей часто недостаточно внешних источников информации для принятия хорошей гипотезы об априорном распределении возрастных групп. Недостаток такой информации особенно очевиден в случае работы с небольшими сериями скелетов, возрастной состав которых может оказаться нерепрезентативным по отношению к населению исследуемой территории.

В настоящей статье показана перспективность применения альтернативного подхода к построению алгоритмов оценки возраста. В рамках этого подхода состав референтной группы ставится в зависимость не от предполагаемого состава всей исследуемой серии, а от предварительных индивидуальных оценок возраста, выносимых исследователем на основании скелетных признаков. Такие предварительные оценки могут быть вынесены как «по общему визуальному впечатлению», так и по результатам применения конкретных формализованных методов. Селективный подход к оценке воз-

раста в выборке, разбитой на возрастные подгруппы, и использование нескольких референтных групп для обучения моделей помогают снизить величину как абсолютных, так и систематических ошибок.

Автор сознательно не касался вопроса о подборе оптимального метода статистической оценки возраста, ограничившись описанием результатов, полученных при помощи метода опорных векторов, и не уделив внимания обоснованию его применения. Последний не является принципиальной частью предложенного алгоритма⁴. Безусловно, необходимы дополнительные исследования в этой области, как необходимы и поиски наиболее корректных методов расчета доверительного интервала и вероятностного распределения, в котором находится истинный (календарный) возраст индивида.

Несмотря на важность проблема референтной группы, к сожалению, пока не является предметом обсуждения антропологов в России. Даже если предложенный подход не найдет отклика среди коллег, автор надеется, что он положит начало такой дискуссии на страницах отечественных журналов. Прежде всего на данном этапе автору представляется необходимым внедрение в исследовательскую практику фиксации и публикации данных индивидуальных значений конкретных признаков, на которые опираются выносимые антропологами оценки пола и возраста,— независимо от выбранных методов оценки. В отличие от субъективных интервальных оценок (как и оценок, выносимых в рамках возрастных категорий), такие данные, независимо от выбранной системы фиксации и анализируемой части скелета, будут иметь непреходящее значение, особенно при отсутствии возможности повторно исследовать скелетную серию. Именно и только такие «исходные данные» могут быть в дальнейшем использованы для повышения точности оценок возрастного состава скелетных серий и в конечном счете — для приближения антропологических реконструкций к исторической и биологической реальности.

Благодарности. Автор выражает признательность участникам проекта Е.В. Пугачевой, М.И. Самохиной и Е.Н. Учаневой за участие в независимой оценке возраста черепов из коллекции К.З. Яцуты, вошедших в состав тестовой выборки.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ, проект № 24-28-01050 «В поисках эффективных методов оценки пола и возраста по черепу».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Хартанович В.И. Краниология карел // Антропология современного и древнего населения Европейской части СССР. Л.: Наука, 1986. С. 63–120.

Хартанович В.И. К краниологии населения северо-западного Приладожья XIX — начала XX в. // Балты, славяне, финны: Этногенетические процессы. Рига: Зинатне, 1990. С. 216–229.

Bocquet-Appel J.P., Masset C. Farewell to paleodemography // *Journal of Human Evolution*. 1982. Vol. 11. P. 321–333.

Boldsen J.L., Milner G.R., Konigsberg L.W., Wood J.W. Transition analysis: A new method for estimating age from skeletons // *Paleodemography: Age distributions from skeletal samples*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. P. 73–106.

Boldsen J.L., Milner G.R., Ousley S.D. Paleodemography: From archaeology and skeletal age estimation to life in the past // *Amer. Journal of Biol. Anthropology*. 2022. Vol. 178. P. 115–150. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24462>

Brooks S.T. Skeletal age at death: The reliability of cranial and pubic age indicators // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 1955. Vol. 13 (4). P. 567–597. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330130403>

Caussinus H., Courgeau D. Estimating age without measuring it: A new method in paleodemography // *Population*. 2010. Vol. 65. P. 117–144.

Constantinou C., Chovalopoulou M.-E., Nikita E. AgeEst: An open access web application for skeletal age-at-death estimation employing machine learning // *Forensic Science International: Reports*. 2023. Vol. 7. 100317. <https://doi.org/10.1016/j.fsr.2023.100317>

Di Ieva, A., Bruner, E., Davidson, J., Pisano P., Haider T., Stone S.S., Cusimano M.D., Tschabitscher M., Grizzi F. Cranial sutures: A multidisciplinary review // *Childs Nervous System*. 2013. Vol. 29. P. 893–905. <https://doi.org/10.1007/s00381-013-2061-4>

Jooste N., Pretorius S., Steyn M. Performance of three mathematical models for estimating age-at-death from multiple indicators of the adult skeleton // *Intern. Journal of Legal Medicine*. 2022. Vol. 136. P. 739–751. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02727-4>

Key C.A., Aiello L., Molleson T. Cranial suture closure and its implications for age estimation // *Intern. Journal of Osteoarchaeology*. 1994. Vol. 4. P. 193–207. <https://doi.org/10.1002/oa.1390040304>

Konigsberg L.W., Frankenberg S.R. Estimation of age structure in anthropological demography // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 1992. Vol. 89. P. 235–256. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330890208>

Meindl R.S., Lovejoy C.O. Ectocranial suture closure: A revised method for the determination of skeletal age at death based on the lateral-anterior sutures // *Amer. Journal of Phys. Anthropology*. 1985. Vol. 68. P. 57–66. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330680106>

⁴ Например, сейчас у читателей есть возможность самостоятельно протестировать метод, основанный на том же принципе, но использующий алгоритм случайного леса. Для этого можно воспользоваться программой, доступной по ссылке: <https://github.com/igshirobokov/multirefage>.

- Navega D., Costa E., Cunha E. Adult skeletal age-at-death estimation through deep random neural networks: A new method and its computational analysis // *Biology* (Basel). 2022. Vol. 11 (4). 532. <https://doi.org/10.3390/biology11040532>
- Navitainuck D.E., Vach W., Pichler S.L., Alt K.W. Age-at-death estimation in archaeological samples: Differences in population means resulting from different aging methods can be predicted from the mean ages of method-specific reference samples // *Intern. Journal of Osteoarchaeology*. 2022. Vol. 32. P. 1226–1237. <https://doi.org/10.1002/oa.3157>
- Nawrocki S.P. Regression formulae for estimating age at death from cranial suture closure // *Forensic Osteology*. Springfield: CC Thomas Publisher LTD, 1998. P. 276–292.
- Nawrocki S.P. The nature and sources of error in the estimation of age at death from the skeleton // *Age estimation of the human skeleton*. Springfield, 2010. P. 79–101.
- Nikita E., Nikitas P. Skeletal age-at-death estimation: Bayesian versus regression methods // *Forensic Science International*. 2019. Vol. 297. P. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.01.033>
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
- Perizonius W.R.K. Closing and non-closing sutures in 256 crania of known age and sex from Amsterdam (A.D. 1883–1909) // *Journal of Human Evolution*. 1984. Vol. 13 (2). P. 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0047-2484\(84\)80065-2](https://doi.org/10.1016/S0047-2484(84)80065-2)
- Sakaue K. A Bayesian approach to age estimation from cranial suture closure in Japanese people // *Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series D, Anthropology*. 2015. Vol. 41. P. 1–11.
- Seguy I., Buchet L. Handbook of palaeodemography. INED Population Studies. Vol. 2. Cham: Springer, 2013.
- Sgheiza V., Liversidge H.M. The effect of reference sample composition and size on dental age interval estimates // *Amer. Journal of Biol. Anthropology*. 2023. Vol. 182 (1). P. 82–92. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24790>
- Shrout P.E., Fleiss J.L. Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability // *Psychol. Bulletin*. 1979. Vol. 86 (2). P. 420–428.
- White H.E., Goswami A., Tucker A.S. The intertwined evolution and development of sutures and cranial morphology // *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2021. Vol. 9. 653579. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.653579>

ИСТОЧНИКИ

- Hardin C.S. Ectocranial suture closure: A revisit of Meindl and Lovejoy: Master's Thesis. Univ. of Tennessee, 1999.
- Milner G.R., Boldsen J.L., Ousley S.D., Getz S.M., Weise S., Tarp P. TA3 Installation and Software User Guide: Version 0.16.2020. URL: <https://www.statemachine.net/software/TA3/>.
- Ramos Gaitán A.M. Estimación de edad a través del grado de obliteración de las suturas craneales: Aplicabilidad del método Meindl y Lovejoy en Bogotá. Bogotá: Univ. de Los Andes, 2003.
- Zambrano C.J. Evaluation of regression equations used to estimate age at death from cranial suture closure: Master's Thesis. Indianapolis: Univ. of Indianapolis, 2005.

Shiobokov I.G.

Peter the Great Museum of Anthropology and Ethnography, RAS
Universitetskaya nab., 3, St. Petersburg, 199034, Russian Federation
E-mail: ivansmith@bk.ru

A selective approach to human age estimation: a case study of cranial suture closure methods

Age estimation of skeletal remains is often biased due to differences between the age structure of the target sample and that of the reference population on which a particular method is based. This study analyzes a documented series of 130 skulls using the Meindl-Lovejoy method to compare of several age estimation algorithms trained on reference samples with varying demographic profiles. The results demonstrate that the estimated mean age of the test series systematically depends on the mean age of individuals in the reference group. A new algorithm is proposed that incorporates multiple regression models, each trained on a reference group with a specific age distribution. The algorithm selects the most appropriate model for each case based on a preliminary age estimate of the skeleton; however, this estimate is not used as an explicit predictor in the final model. The proposed method shows relatively high accuracy compared to both the phase-based Meindl-Lovejoy approach and several modern techniques. Estimates generated by the algorithm from primary data collected by different researchers also show a good level of interobserver agreement.

Keywords: age estimation, paleodemography, suture obliteration, regression analysis, reference group.

Funding. The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant, project No. 24-28-01050 “In search of effective methods for sex and age estimation from the skull”.

REFERENCES

- Bocquet-Appel, J.P., Masset, C. (1982). Farewell to paleodemography. *Journal of Human Evolution*, (11), 321–333.
- Boldsen, J.L., Milner, G.R., Konigsberg, L.W., Wood, J.W. (2002). Transition analysis: A new method for estimating age from skeletons. In: Hoppa R.D., Vaupel J.W. (Eds.). *Paleodemography: Age distributions from skeletal samples*. Cambridge: Cambridge University Press, 73–106.

- Boldsen, J.L., Milner, G.R., Ousley, S.D. (2022). Paleodemography: From archaeology and skeletal age estimation to life in the past. *American Journal of Biological Anthropology*, 178, 115–150. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24462>
- Brooks, S.T. (1955). Skeletal age at death: The reliability of cranial and pubic age indicators. *American Journal of Physical Anthropology*, 13(4), 567–597. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330130403>
- Caussinus, H., Courgeau, D. (2010). Estimating age without measuring it: a new method in paleodemography. *Population*, 65, 117–144.
- Constantinou, C., Chovalopoulou, M.-E., Nikita, E. (2023). AgeEst: An open access web application for skeletal age-at-death estimation employing machine learning. *Forensic Science International: Reports*, 7, 100317. <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2023.100317>
- Di Ieva, A., Bruner, E., Davidson, J., Pisano, P., Haider, T., Stone, S.S., Cusimano, M.D., Tschabitscher, M., Grizzi, F. (2013). Cranial sutures: A multidisciplinary review. *Childs Nervous System*, 29, 893–905. <https://doi.org/10.1007/s00381-013-2061-4>
- Jooste, N., Pretorius, S., Steyn, M. (2022). Performance of three mathematical models for estimating age-at-death from multiple indicators of the adult skeleton. *International Journal of Legal Medicine*, 136, 739–751. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02727-4>
- Key, C.A., Aiello, L., Molleson, T. (1994). Cranial suture closure and its implications for age estimation. *International Journal of Osteoarchaeology*, 4, 193–207. <https://doi.org/10.1002/oa.1390040304>
- Khartanovich, V.I. (1986). Craniology of the Karelians. In: *Antropologiya sovremennogo i drevnego naseleniya Evropeyskoy chasti SSSR*. Leningrad: Nauka, 63–120. (Rus.).
- Khartanovich, V.I. (1990). On the craniology of the population of Northwestern Priladozhie in the 19th — early 20th centuries. In: *Balty, slavyane, finny: Etnogeneticheskie protsessy*. Riga: Zinatne, 216–229. (Rus.).
- Konigsberg, L.W., Frankenberg, S.R. (1992). Estimation of age structure in anthropological demography. *American Journal of Physical Anthropology*, 89, 235–256. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330890208>
- Meindl, R.S., Lovejoy, C.O. (1985). Ectocranial suture closure: A revised method for the determination of skeletal age at death based on the lateral-anterior sutures. *American Journal of Physical Anthropology*, 68, 57–66. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330680106>
- Navega, D., Costa, E., Cunha, E. (2022). Adult skeletal age-at-death estimation through deep random neural networks: A new method and its computational analysis. *Biology (Basel)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/biology11040532>
- Navitainuck, D.E., Vach, W., Pichler, S.L., Alt, K.W. (2022). Age-at-death estimation in archaeological samples: Differences in population means resulting from different aging methods can be predicted from the mean ages of method-specific reference samples. *International Journal of Osteoarchaeology*, 32, 1226–1237. <https://doi.org/10.1002/oa.3157>
- Nawrocki, S.P. (2010). The nature and sources of error in the estimation of age at death from the skeleton. *Age estimation of the human skeleton*, Springfield, 79–101.
- Nawrocki, S.P. (1998). Regression formulae for estimating age at death from cranial suture closure. In: Reichs K.J. (Ed.). *Forensic Osteology*. Springfield: CC Thomas Publisher LTD, 276–292.
- Nikita, E., Nikitas, P. (2019). Skeletal age-at-death estimation: Bayesian versus regression methods. *Forensic Science International*, 297, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.01.033>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Perizonius, W.R.K. (1984). Closing and non-closing sutures in 256 crania of known age and sex from Amsterdam (a.d. 1883–1909). *Journal of Human Evolution*, 13(2), 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0047-2484\(84\)80065-2](https://doi.org/10.1016/S0047-2484(84)80065-2)
- Sakaue, K. (2015). A Bayesian approach to age estimation from cranial suture closure in Japanese people. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series D, Anthropology*, 41, 1–11.
- Seguy, I., Buchet, L. (2013). *Handbook of palaeodemography*. INED Population Studies, 2. Cham: Springer.
- Sgheiza, V., Liversidge, H.M. (2023). The effect of reference sample composition and size on dental age interval estimates. *American Journal of Biological Anthropology*, 182(1), 82–92. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24790>
- Shrout, P.E., Fleiss, J.L. (1979). Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin*, 86(2), 420–428.
- White, H.E., Goswami, A., Tucker, A.S. (2021). The intertwined evolution and development of sutures and cranial morphology. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.653579>

Широбоков И.Г., <https://orcid.org/0000-0002-3555-7509>

Сведения об авторе: Широбоков Иван Григорьевич, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, Музей антропологии и этнографии им. Петра Великого (Кунсткамера) РАН, Санкт-Петербург.

About the author: Shirobokov, I.G., Candidate of Historical Sciences, Senior Researcher, Peter the Great Museum of Anthropology and Ethnography, RAS, St. Petersburg.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Accepted: 21.11.2024

Article is published: 15.06.2025