

Научная статья / Research Article

УДК 902.652

[https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(2\).-10](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(2).-10)

EDN: ELMPFN

²¹⁰Pb КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ ВЕРХНЕПАЛЕОЛИТИЧЕСКОГО ВОЗРАСТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОУГЛЕРОДНОГО ДАТИРОВАНИЯ

**Валерия Игоревна Цыганкова^{1*}, Глеб Константинович Данилов²,
Георгий Константинович Павлюков³, Денис Валерьевич Петров⁴,
Сергей Левонович Вартанян⁵**

¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
Магадан, Россия;

tsigankova.valeriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1695-5617>

²Музей Антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН, Санкт-Петербург, Россия;
gleb.danilov.spb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2816-320X>

³Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
Магадан, Россия;

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, Магадан, Россия;
georgiypavlyukov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7967-3134>

⁴Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
Магадан, Россия;

denispetrov@neisri.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7941-0841>

⁵Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
Магадан, Россия;

sergey-varpanyan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7806-4053>

*Автор, ответственный за переписку

Резюме. Экспериментально показано, что открытое хранение образцов древесного угля приводит к необратимому накоплению ²¹⁰Pb — долгоживущего продукта распада радона-222 (²²²Rn) — из-за высокой сорбционной способности пористого древесного угля. Накопленный ²¹⁰Pb вносит вклад в общую измеренную активность образца, что приводит к значительному занижению радиоуглеродного возраста. Эксперименты с хранением образцов в различных условиях (гранитный карьер, подвал, лаборатория) подтвердили рост удельной активности и последующее уменьшение рассчитанного возраста. Сделан вывод, что для получения достоверных радиоуглеродных дат по углям верхнего палеолита рекомендуется применение метода ускорительной масс-спектрометрии (AMS), поскольку на него не влияют изотопы с энергиями, близкими к ¹⁴C. В случае использования жидкостно-сцинтилляционного метода критически важно хранить образцы в герметичных условиях, исключающих контакт с окружающей средой.

Ключевые слова: радиоуглерод, свинец, радон, жидкостная сцинтилляция, древесный уголь, хранение угля, верхний палеолит

Благодарности: авторы признательны Ф.Е. Максимова, В.А. Григорьеву (СПбГУ), В.Е. Тумскому (Институт мерзлотоведения СО РАН), а также двум анонимным рецензентам за ценные комментарии, замечания и дополнения к тексту статьи.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ №25-28-01122 «Культурное и сакральное пространство крайнего северо-востока Азии: каменные и костяные конструкции позднего голоцена Чукотки», rscf.ru/project/25-28-01122/.

Для цитирования: Цыганкова В.И., Данилов Г.К., Павлюков Г.К., Петров Д.В., Вартанян С.Л. ^{210}Pb как источник загрязнения древесного угля верхнепалеолитического возраста и его влияние на результаты радиоуглеродного датирования // Теория и практика археологических исследований. 2026. Т. 38, №2. С. 214–227. [https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(2\).-10](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(2).-10)

^{210}Pb AS A SOURCE OF CONTAMINATION OF UPPER PALEOLITHIC CHARCOAL AND ITS IMPACT ON RADIOCARBON DATING RESULTS

Valeriya I. Tsygankova^{1*}, Gleb K. Danilov², Georgy K. Pavlyukov³, Denis V. Petrov⁴, Sergey L. Vartanyan⁵

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia; tsygankova.valeriya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1695-5617>

²Peter the Great Museum of Anthropology and Ethnography (Kunstkamera), Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia; gleb.danilov.spb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2816-320X>

³North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia; Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, Magadan, Russia; georgiypavlyukov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7967-3134>

⁴North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia; denispetrov@neisri.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7941-0841>

⁵North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia; sergey-vartanyan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7806-4053>

*Corresponding Author

Abstract. This study investigates the impact of the radionuclide Lead-210 (^{210}Pb) on the accuracy of radiocarbon dating of Upper Paleolithic charcoal using the Liquid Scintillation (LS) method. It is experimentally demonstrated that open storage of charcoal samples leads to irreversible accumulation of ^{210}Pb , a long-lived decay product of Radon-222 (^{222}Rn), due to the high sorption capacity of porous wood charcoal. The accumulated ^{210}Pb contributes to the total measured sample activity, leading to a significant underestimation of the radiocarbon age. Experiments involving sample storage in different environments (granite quarry, basement, laboratory) confirmed an increase in specific activity and a consequent reduction in the calculated age. It is concluded that to obtain reliable radiocarbon dates for Upper Paleolithic charcoal, the use of Accelerator Mass Spectrometry (AMS) is strongly recommended, as this method is not affected by interfering isotopes with energies similar to ^{14}C . If the LS method is used, it is critical to store samples in sealed conditions to prevent environmental exposure.

Keywords: Radiocarbon, Lead, Radon, Liquid Scintillation, Charcoal, Charcoal Storage, Upper Paleolithic

Acknowledgments: the authors are grateful to F.E. Maksimov, V.A. Grigoriev (St. Petersburg State University), and V.E. Tumskey (Melnikov Permafrost Institute) as well as to two anonymous reviewers, for their valuable comments, remarks, and additions to the text of the article.

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation, project No. 25-28-01122 “Cultural and Sacred Space of the Extreme Northeast of Asia: Stone and Bone Constructions of the Late Holocene of Chukotka”, rscf.ru/project/25-28-01122/.

For citation: Tsygankova V.I., Danilov G.K., Pavlyukov G.K., Petrov D.V., Vartanyan S.L. ²¹⁰Pb as a Source of Contamination of Upper Paleolithic Charcoal and its Impact on Radiocarbon Dating Results. *Teoriya i praktika arheologicheskikh issledovaniy = Theory and Practice of Archaeological Research*. 2026;38(2):214–227. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(2\).-10](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(2).-10)

Введение

Культурные напластования археологических памятников и палеоархивы широкого хронологического ряда часто содержат в своих контекстах древесные угли, которые считаются наиболее подходящим материалом для определения радиоуглеродного возраста (Арсланов, 1987, с. 119; Радиоуглеродная хронология..., 1997, с. 8). Угли благодаря своей пористой структуре обладают способностью адсорбировать вещества из окружающей среды. Степень их сорбционных свойств в основном определяется родом материала горения, условиями, при которых происходил этот процесс, а также факторами, которые способствовали завершению горения (Марьяндышев и др., 2015, с. 27).

Процесс сжигания древесины является многостадийным и представляет собой экзотермическую химическую реакцию с кислородом, в результате которой получают угли с различными физико-химическими свойствами. На начальном этапе нагрева происходит испарение влаги с внешних слоев древесины, затем высушенная часть обугливается, образуя внешний углеродный слой и золу. Внутренняя же часть претерпевает термическое разложение (пиролиз) с ограниченным доступом кислорода, образуя угольную массу и газообразные продукты. Под действием высокого давления газ диффундирует через внешние угольные слои, создавая в них поры и трещины. Затем, смешиваясь с воздухом, пиролизные газы воспламеняются, поддерживая температуру, необходимую для дальнейшего разложения внутренних слоев древесины. Основными компонентами выделяемых газов являются угарный газ, метан и углекислый газ, в состав которых входит углерод, поэтому в процессе горения концентрация данного элемента в массе образца уменьшается. После выгорания летучих компонентов процесс пиролиза переходит в стадию тления с образованием золы, при этом пористость угольного материала значительно снижается. Угли, полученные после пиролиза, обладают большим потенциалом к сорбции химических соединений в сравнении с углями, прошедшими все стадии горения (Bornemann, Kookana, Welp, 2007, p. 40; Wedler, Span, Richter, 2020, p. 5).

Пробоотбор углей производится, как правило, по стандартной методике, которая включает сушку образца (Зазовская, 2016, с. 156). В большинстве случаев это приводит к достаточно длительному хранению угля на открытом воздухе в полевых, камеральных, а потом и в лабораторных условиях. В течение этого времени уголь подвергается окислительным процессам и становится более реакционноспособным за счет образовавшихся кислородосодержащих функциональных групп на поверхности, что увеличивает способность к сорбции металлов (Кузнецов, 1999, с. 29; Петров и др., 2008, с. 161). В поры и трещины попадает вода из различных источников (в том числе из воздушной среды), содержащая тяжелые металлы и растворенные газы (Домрачева, Вещева, 2010, с. 137). Также угольный материал проявляет адсорбирующие свойства в отношении различных газов. Часть привнесенных химических элементов и их изотопов может искажать радиоуглеродные датировки, полученные методом жидкостной сцинтилляции (ЖС).

Радиоуглеродные исследования методом ЖС основаны на определении остаточной активности ¹⁴C. Известно, что радиоуглерод является низкоэнергетиче-

ским радионуклидом с периодом полураспада $T_{1/2} = 5730$ лет и энергией β -распада 2–154 кэВ. При распаде ^{14}C образуется β -частица, энергия которой, пройдя ряд преобразований, фиксируется составляющими элементами радиометра. По итогам измерений прибор выводит ^{14}C удельную активность образца ($A_{\text{обр}}$), выраженную в импульсах в минуту (имп/мин).

$$t = 8033 \ln \frac{A_{\text{ст}}}{A_{\text{обр}}} k$$

Расчетная формула также содержит известную удельную активность современного стандарта ($A_{\text{ст}}$) и постоянную k , включающую поправки на изотопное фракционирование образца и стандарта. Предполагается, что активность образца складывается только из импульсов распада ^{14}C , т.е. $A_{\text{обр}} = A_{^{14}\text{C}}$. Однако имеются другие радионуклиды с энергиями распадов, лежащими в пределах энергетического интервала ^{14}C или имеющими смежную с ним энергетическую область (рис. 1).

К основным низкоэнергетическим изотопам, способным оказывать влияние на $A_{\text{обр}}$, относятся ^{214}Pb , ^{210}Pb , ^3H . В табл. 1 представлены их основные характеристики.

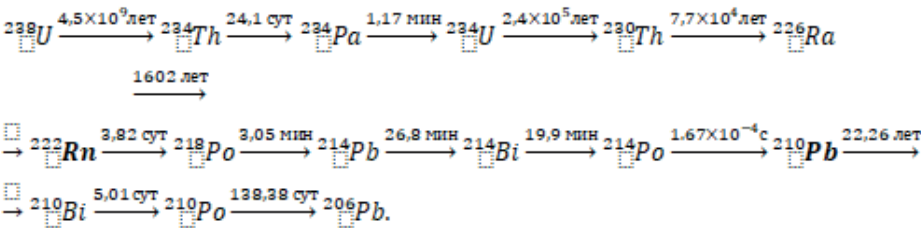
Таблица 1
Основные радионуклиды с энергиями, входящими в энергетический диапазон ^{14}C
Tab. 1

Main radionuclides interfering in the ^{14}C energy window

Изотопы	Период полураспада	Максимальная энергия распада, кэВ	Среда распространения
^{214}Pb	27,1 мин	1018	Вода, почва
^{210}Pb	22,3 года	64	Вода, почва
^3H	12,3 года	19	Вода

Распространение этих изотопов обусловлено как природными, так и техногенными факторами. Их содержание в образцах зависит от условий хранения после изъятия из вмещающих отложений.

Помимо радионуклидов, представленных в табл. 1, заметное влияние на радиоуглеродный счет оказывают продукты распада высокоэнергетического ^{222}Rn . Радон является природным источником ионизирующего излучения и образуется в результате распада элементов уранового ряда в почве:



Высвобождаясь с поверхности грунта, изотоп ^{222}Rn становится составляющим элементом воздуха, после чего распространяется воздушными потоками в приземной части атмосферы.

Еще одним радоновым источником являются компоненты строительных материалов, такие как гранит, глинозем, фосфогипс и т.д., поэтому в помещениях концентрация радона в воздухе может быть заметно выше. В особенности это касается подвальных и цокольных этажей, в которых, как правило, система принудительной вентиляции и естественной инфильтрации воздуха отсутствуют или сведена к минимуму (Черкасова, Углова, 2014, с. 27). Период полураспада ^{222}Rn составляет 3,8 суток, из-за чего его количество в закрытой системе значительно снижается уже через две недели. Однако помещения не являются герметичными, и приток радона осуществляется регулярно с потоками воздушных масс, что способствует накоплению продуктов его распада. Одним из таких продуктов является ^{210}Pb , который в силу длительного времени жизни ($T_{1/2}=22,3$ года) остается в материале после распада ^{222}Rn (табл. 1).

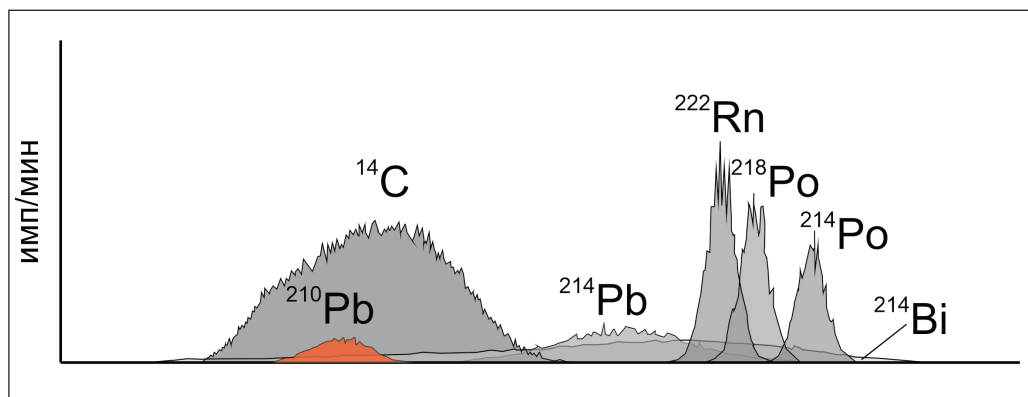


Рис. 1. Энергетические спектры распадов ^{222}Rn , его продуктов распада и спектра ^{14}C

Fig. 1. Energy spectra of decays of ^{222}Rn , its decay products, and of ^{14}C

^{210}Pb является радиоактивным и, претерпевая распад, оставляет энергетический след в спектре радиоуглерода (рис. 1). Таким образом, удельная активность образца для расчета радиоуглеродного возраста преобразуется:

$$A_{\text{обп}} = A_{^{14}\text{C}} + A_{^{210}\text{Pb}}$$

Увеличение дает изменение радиоуглеродной датировки в сторону ее уменьшения. Накопленный опыт датирования разновременных археологических памятников путем определения возраста образцов древесного угля методом ЖС демонстрирует не всегда хронологически и стратиграфически верную последовательность полученных значений, которую можно было бы объяснить лишь механизмом формирования отложений или ошибками пробоотбора (Пясецкий, 1991, с. 136; 1992, с. 113; Слободин, 1996, с. 92; Радиоуглеродная хронология..., 1997, с. 49–50; Косинская, 2004, с. 302–304; Городилов, Раззак, 2025, с. 216). Это побудило нас к проведению серии экспериментов, свя-

занных с накоплением радионуклидов, способных увеличить измеряемую активность угольных образцов.

В настоящей работе рассматривается, как кратковременное хранение угля, не содержащего ^{14}C , полученного методом пиролиза, в различных природных условиях и помещениях влияет на накопление ^{222}Rn и его долгоживущего продукта распада ^{210}Pb . Для каждого образца, выдержанного в разных условиях хранения, получена активность и рассчитан радиоуглеродный возраст.

Материалы и методы

Для исследования активности накопленных продуктов распада ^{222}Rn были выбраны угли древесных образцов, ранее датированных в радиоуглеродной лаборатории СВКНИИ ДВО РАН (Vartanyan et al., 2025, p. 6, tab. 1). Исходные образцы древесины отобраны из четвертичных отложений различного генезиса на северо-западной Чукотке в рамках комплексных палеогеографических исследований. Поскольку радиоуглеродные даты являются запредельными (табл. 2), мы предполагаем, что образцы не содержат ^{14}C , из чего следует, что любая повышенная активность относительно нулевых образцов (А-0, В-0) обусловлена содержанием дочерних радионуклидов радона.

Таблица 2

Описание исследуемого материала

Tab. 2

Description of the samples

Лабораторный индекс	Материал	Год пробоотбора	Дата получения угля	^{14}C дата	Индекс, присвоенный перед повторным исследованием	Удельная активность, имп/мин
МАГ-2422	Древесина березы	2022	Март, 2024	>46625	А-0	0,018±0,011
МАГ-2122		2016	Октябрь, 2016	>50790	В-0	0,012±0,007

До получения первичных датировок (с индексом МАГ) древесный материал проходил стандартный радиоуглеродный цикл очистки и синтеза счетной формы (бензола) (Арсланов, 1987, с. 163). Для удаления комплекса гуминовых кислот, способных привести к омоложению радиоуглеродного возраста, каждый образец подвергался предварительной химической обработке, которая заключается в последовательном кипячении в 3% соляной кислоте (HCl) и 1% растворе едкого натра (NaOH). После обработки, используя метод пиролиза, образцы преобразовали в угли крупной фракции. Затем от каждого были отобраны трехграммовые навески, по которым получены радиоуглеродные даты, представленные в табл. 2. Оставшийся материал для дальнейших исследований был упакован в фольгу и оставлен на хранение в лабораторном помещении.

Для оценки воздействия окружающей среды на скорость накопления дочерних радионуклидов ^{222}Rn в углях было решено один образец в течение суток выдержать в природных условиях, а второй — в подвальном помещении здания СВКНИИ

ДВО РАН. Основным условием для определения места проведения эксперимента являлось повышенное содержание радона в приземном слое воздуха, способствующее увеличению концентрации накапливаемых дочерних продуктов распада за короткие промежутки времени. Поэтому для хранения образцов А-1/2 был выбран гранитный карьер, расположенный в окрестностях г. Магадана (59,56° с.ш., 150,93° в.д.). В данном случае повышение радонового фона связано с наличием изотопов уранового ряда в позднемеловых гранитоидных породах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Акинин, Миллер, 2011, с. 270). Во втором эксперименте повышенная концентрация радона обусловлена слабой циркуляцией воздуха в подвальном помещении здания СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан).

Перед началом исследований образцы углей для улучшения сорбционных свойств были измельчены до фракции 1–2 мм. Далее отобраны навески, по которым была определена их удельная активность после длительного хранения в лабораторных условиях на 1-м этаже здания СВКНИИ (А-1, В-1). Оставшиеся части были разделены поровну и помещены в пластиковые контейнеры. Образец А-2 экспонировался на гранитном карьере в течение суток при относительной влажности воздуха 95–97% с сопутствующими атмосферными осадками. Спустя неделю уголь А-3 был помещен в это же место, но хранение осуществлялось при отсутствии осадков с относительной влажностью 81–83%. Образец В-2 в течение недели выдерживался в подвальном помещении здания института. При проведении экспериментов контейнеры не закрывались крышками, для того чтобы сорбирующая поверхность углей имела контакт с окружающим воздухом.

Синтез бензола и измерения на радиометре с целью расчета удельной активности проводились в день окончания экспериментальной части. Спустя 30 суток, после распада промежуточных изотопов в цепочке $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ и, как следствие, спада общей активности, были проведены повторные измерения бензола и по полученным данным рассчитан радиоуглеродный возраст (табл. 3).

Пробоподготовка образцов и синтез счетной формы производились на химической установке КЛП С14. Одним из этапов химического цикла является вакуумный пиролиз, в процессе которого исследуемый образец спекается под вакуумом с металлическим литием при температуре 750 °С. При этом происходит процесс десорбции, т.е. уголь восстанавливается как сорбент. Это позволяет избежать воздействий современного ^{14}C , который привносится в поры углеродного материала посредством адсорбции с углеродосодержащими газами и различными органическими соединениями (Tlili, Grévillet, Vallières, 2009, p. 519). Кроме того, что ^{222}Rn является компонентом воздуха, данный газ имеет высокий коэффициент растворимости (Жук, Гусак, Хакимов, 2023, с. 83) и может быть привнесен в образцы углей не только в процессе их хранения, но и в момент получения счетной формы через небольшие порции воды, которые поступают в бензол при его синтезе. Чтобы избежать «радоновых» воздействий через воду, бензол проходил очистку серной кислотой путем выдерживания смеси на водяной бане в течение 3 часов.

Измерения бензола проводились на ультранизкофоновом радиометре Quantulus 1220 производства PerkinElmer. Приведенные данные активностей сформированы про-

граммой EASY View Spectrum Analysis Program и относятся к диапазону энергий ^{14}C . Радиоуглеродный возраст рассчитывался относительно удельной активности вторичного стандарта ($A_{\text{ст}}$), разработанного в радиоуглеродной лаборатории СВКНИИ ДВО РАН (Цыганкова и др., 2017, с. 20).

Результаты и обсуждение

Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что удельная активность в первый день измерений значительно выше значений, полученных спустя 30 дней после синтеза бензола. Такое повышение связано с фиксированием приборных импульсов, возникших в результате распадов короткоживущих изотопов ^{214}Bi и ^{214}Pb . Через месяц остаточная активность образцов обусловлена распадами ^{210}Pb . Поскольку в данной работе рассматривается влияние активности ^{210}Pb на расчет радиоуглеродного возраста, для дальнейшего анализа были использованы значения, полученные на 30-е сутки. Так как угли А-0 и В-0 получены сразу после проведения предварительной обработки древесины, будем считать, что данные образцы являются исходными для рассмотрения отклонений удельных активностей А-1/2/3 и В-1/2.

Таблица 3

Данные исследования порций углей А-0 и В-0

Tab. 3

Characteristics of charcoal portions A-0 and B-0

Индекс образца	Условия хранения	Длительность эксперимента	Дата отбора	Удельная активность, имп/мин (1-й день после отбора)	Удельная активность, имп/мин (30-й день после отбора)	^{14}C дата (1σ)	^{14}C дата (2σ)
А-1	Лабораторное помещение	1,5 года	24.07.2025	0,464±0,046	0,050±0,042	45640±10015	>32590
А-2	Гранитный карьер (высокая влажность, осадки)	Сутки (исходный А-1)	24.07.2025	0,502±0,047	0,049±0,042	45775±10680	>32695
А-3	Гранитный карьер (низкая влажность, без осадков)	Сутки (исходный А-1)	30.07.2025	0,421±0,077	0,089±0,073	40422±9315	>28120
В-1	Лабораторное помещение	9 лет	30.08.2025	0,210±0,029	0,081±0,026	37100±2670	38795±6100
В-2	Подвальное помещение	1 неделя (исходный В-1)	30.08.2025	0,349±0,073	0,171±0,069	31360±3455	34925±9055

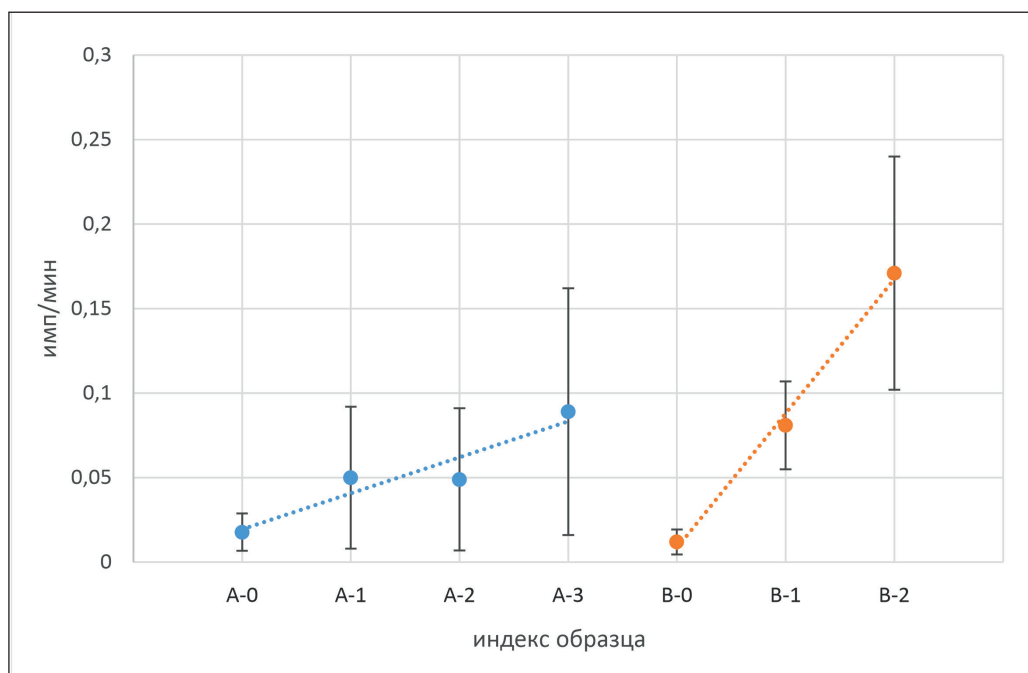


Рис. 2. Удельные активности образцов группы А и В со статистической ошибкой σ

Fig. 2. Specific activities of samples from groups A and B with the statistical error σ

Значения образцов группы А сходимы в пределах статической ошибки (рис. 2), что может указывать на приблизительно одинаковое содержание вышеупомянутых изотопов. Однако линия тренда, построенная по средним значениям активностей, показывает тенденцию к их увеличению. Рассматривая процесс накопления по усредненным данным, следует отметить возрастание активностей всех образцов группы А. Средняя активность образцов А-1 и А-2 в результате хранения в лабораторных условиях выросла на 178%. Максимальное среднее значение принадлежит образцу А-3, что, вероятно, говорит о наибольшей концентрации присутствующих радиоактивных изотопов, накопленных в процессе проведения эксперимента. Мы предполагаем, что разница в средних активностях образцов А-2 и А-3 обусловлена наличием дождевой воды в углях А-2, которая проникает в поры адсорбента, блокируя доступ к воздуху и, как следствие, может привести к снижению интенсивности накопления продуктов распада ^{222}Rn . Увеличение средней удельной активности образца А-3 составило 394%.

В образцах группы В наблюдаются отклонения данных не в пределах статистической ошибки. Значительный рост удельной активности отмечен у всех образцов. В результате длительного хранения в лабораторных условиях среднее значение активности угля В-1 увеличено на 575%. Активность образца В-2 возросла на 1325%.

Полученные радиоуглеродные даты по двум группам углей свидетельствуют о присутствии в них β -активных изотопов ^{210}Pb . Максимальное увеличение концентрации данного изотопа для образцов группы А и В составило $4,1 \times 10^{-16}$ г и $9,2 \times 10^{-16}$ г

на грамм образца соответственно. Такое увеличение дает рост общей активности и, как следствие, снижение радиоуглеродного возраста. Для образцов группы А хранение в разных условиях было менее длительным, что привело к «некритичному» омоложению материала. Датировки являются конечными в пределах 1σ и запредельными в 2σ . Радиоуглеродные даты группы В являются конечными в диапазоне 2σ , что указывает на присутствие повышенной концентрации ^{210}Pb .

Заключение

Из результатов поставленных экспериментов следует, что уголь, полученный из древесного материала методом пиролиза, является эффективным адсорбентом в отношении ^{222}Rn . Установлено, что открытое хранение угольного материала, не содержащего ^{14}C , и его хранение в негерметичной упаковке приводит к накоплению ^{210}Pb (продукта распада ^{222}Rn). Возрастание скорости накопления наблюдается при открытом хранении образцов с пониженной влажностью воздуха. При увеличении длительности эксперимента регистрируется повышенная β -активность исследуемых образцов в энергетической области ^{14}C , что, вероятно, является следствием повышенного содержания ^{210}Pb . В свою очередь, рост активности приводит к уменьшению радиоуглеродного возраста образцов, измеренных на ЖС спектрометрах.

Ввиду необратимого накопления ^{210}Pb в древесном угле при длительном хранении, на наш взгляд, единственным способом получения достоверного радиоуглеродного возраста является использование метода ускорительной масс-спектрометрии (AMS), поскольку он основывается на количественном счете радиоуглерода и исключает влияние распадов изотопов с энергиями, близкими по значениям энергии ^{14}C . При датировании ЖС методом необходимо соблюдать условия хранения угля, а именно предотвращать контакт образцов с окружающей средой. Это касается угольного материала, чей радиоуглеродный возраст превышает 30 тыс. лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. Т. 19, №3. С. 249–290.

Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л. : Изд-во ЛГУ, 1987. 300 с.

Городилов А.Ю., Раззак М.А. Хронология памятников неолита — эпохи бронзы юго-восточного берега Финского залива по данным радиоуглеродного датирования // Stratum Plus. 2025. №2. С. 213–231. <https://doi.org/10.55086/sp252213231>

Домрачева В.А., Вещева Е.Н. Модифицирование углеродных сорбентов для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из сточных вод и техногенных образований // iPolytech Journal. 2010. №4. С. 134–138.

Жук И.В., Гусак К.В., Хакимов Д.А. Использование метода гамма-спектрометрии для определения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2023. Т. 68, №1. С. 82–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-82-88>

Зазовская Э.П. Радиоуглеродное датирование — современное состояние, проблемы, перспективы развития и использование в археологии // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2016. Т. 32. №1. С. 156–157. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2016-32-1-151-164>

Косинская Л.Л. Проблемы хронологии западносибирского неолита (к вопросу о роли радиоуглеродного датирования) // Проблемы хронологии и этнокультурных взаимодействий в неолите Евразии. СПб. : Изд-во ИИМК РАН, 2004. С. 301–307.

Кузнецов Б.Н. Синтез и применение углеродных сорбентов // Соросовский образовательный журнал. 1999. Т. 6, №12. С. 29.

Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Попова Е.И., Любов В.К. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина // Современные наукоемкие технологии. 2015. №5. С. 26–31.

Петров Л.А., Юрьев Ю.Л., Гиндулин И.К., Еранкин С.В. Свойства древесного окисленного угля // Лесной вестник. 2008. №3. С. 161–162.

Пясецкий В.К. Палеолитическое местонахождение Жорнов: верхний культурный слой // Советская Археология. 1991. №2. С. 131–147.

Пясецкий В.К. Мустьерский культурный слой палеолитического местонахождения Жорнов и некоторые вопросы стратиграфии палеолита // Российская археология. 1992. №3. С. 113–126.

Радиоуглеродная хронология палеолита Восточной Европы и Северной Азии. Проблемы и перспективы / ред.: А.А. Синицын, Н.Д. Праслов. СПб. : АкадемПринт, 1997. 142 с. (Археологические изыскания. Вып. 52)

Слободин С.Б. Стоянки каменного века Оханджийского археологического района // Археологические исследования на Севере Дальнего Востока. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1996. С. 77–115.

Цыганкова В.И., Вартанян С.Л., Данилов Г.К., Скрипкин В.В. О возможности применения хлопковой целлюлозы в качестве вторичного радиоуглеродного стандарта // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2017. №2. С. 20–23.

Черкасова О.А., Угланова В.З. Экологическая диагностика безопасности жилых помещений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2014. Т. 14, №1. С. 25–31.

Bornemann L.C., Kookana R.S., Welp G. Differential Sorption Behaviour of Aromatic Hydrocarbons on Charcoals Prepared at Different Temperatures from Grass and Wood. *Chemosphere*. 2007;67(5):1033–1042. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.052>

Tlili N., Grévillet G., Vallières C. Carbon Dioxide Capture and Recovery by Means of TSA and/or VSA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2009;3(5):519–527. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.04.005>

Vartanyan S., Danilov G., Gromyko D., Maksimov F., Oskolski A., Solovyeva D., Tsigankova V. Treeline History in Northwestern Chukotka during the Last Interglacial and Holocene. *Quaternary International*. 2025;718:109666. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2025.109666>

Wedler C., Span R., Richter M. Comparison of Micro-and Macropore Evolution of Coal Char during Pyrolysis. *Fuel*. 2020;275:117845. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117845>

REFERENCES

- Akinin V.V., Miller E.L. Evolution of Calc-Alkaline Magmas of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt. *Petrologiya = Petrology*. 2011;19(3):249–290. (In Russ.)
- Arslanov Kh.A. Radiocarbon: Geochemistry and Geochronology. Leningrad : Izd-vo LGU, 1987. 300 p. (In Russ.)
- Gorodilov A.Yu., Razzak M.A. Chronology of Neolithic — Bronze Age Sites on the Southeastern Coast of the Gulf of Finland Based on Radiocarbon Dating. *Stratum Plus*. 2025;2:213–231. (In Russ.). <https://doi.org/10.55086/sp252213231>
- Domracheva V.A., Veshcheva E.N. Modifying Carbon Sorbents to Increase the Efficiency of Extracting Heavy Metals from Wastewater and Technogenic Formations. *iPolytech Journal*. 2010;4:134–138. (In Russ.)
- Zhuk I.V., Gusak K.V., Khakimov D.A. Using the Gamma-Spectrometry Method to Determine Radon Concentration in Mineral Radon Water Samples. *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical and Technical Series*. 2023;68(1):82–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-82-88>
- Zazovskaya E.P. Radiocarbon Dating — Current State, Problems, Development Prospects, and Use in Archaeology. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii = Bulletin of Archaeology, Anthropology and Ethnography*. 2016;32(1):156–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2016-32-1-151-164>
- Kosinskaya L.L. Problems of the West Siberian Neolithic Chronology (On the Role of Radiocarbon Dating). In: Problems of Chronology and Ethnocultural Connections in Neolithic of Eurasia. Saint Petersburg : Izd-vo IIMK RAN, 2004. Pp. 301–307. (In Russ.)
- Kuznetsov B.N. Synthesis and Application of Carbon Sorbents. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal = Soros Educational Journal*. 1999;6(12):29. (In Russ.)
- Mar'yandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. Thermogravimetric Study of the Thermal Decomposition and Combustion Process of Wood Fuel, Coals, and Hydrolytic Lignin. *Sovremennye naukoemkie tehnologii = Modern High Technologies*. 2015;5:26–31. (In Russ.)
- Petrov L.A., Yur'ev Yu.L., Gindulin I.K., Erankin S.V. Properties of Oxidized Wood Charcoal. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*. 2008;3:161–162. (In Russ.)
- Pyasetskij V.K. The Zhornov Paleolithic Site: The Upper Cultural Layer. *Sovetskaya Arheologiya = Soviet Archaeology*. 1991;2:131–147. (In Russ.)
- Pyasetskij V.K. The Mousterian Cultural Layer of the Zhornov Paleolithic Site and Some Questions of Paleolithic Stratigraphy. *Rossiyskaya arheologiya = Russian Archaeology*. 1992;3:113–126. (In Russ.)
- Sinit syn A.A., Praslov N.D. (Ed.). Radiocarbon Chronology of the Paleolithic of Eastern Europe and Northern Asia. Problems and Perspectives. Saint Petersburg : AcademPrint, 1997. 142 p. (Archaeological Investigations. Vol. 52) (In Russ.)
- Slobodin S.B. Stone Age Sites of the Okhandzhiya Archaeological District. In: Archaeological studies in North Far East. Magadan : SVKNII DVO RAN, 1996. Pp. 77–115. (In Russ.)
- Tsygankova V.I., Vartanyan S.L., Danilov G.K., Skripkin V.V. On the Possibility of Using Cotton Cellulose as a Secondary Radiocarbon Standard. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo*

centra DVO RAN = *Bulletin of the North-East Scientific Center of the FEB RAS*. 2017;2:20–23. (In Russ.)

Cherkasova O.A., Uglanova V.Z. Ecological Diagnostics of Living Quarters Safety. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika = Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics*. 2014;14(1):25–31. (In Russ.)

Bornemann L.C., Kookana R.S., Welp G. Differential Sorption Behaviour of Aromatic Hydrocarbons on Charcoals Prepared at Different Temperatures from Grass and Wood. *Chemosphere*. 2007;67(5):1033–1042. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.052>

Tlili N., Grévillet G., Vallières C. Carbon Dioxide Capture and Recovery by Means of TSA and/or VSA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2009;3(5):519–527. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.04.005>

Vartanyan S., Danilov G., Gromyko D., Maksimov F., Oskolski A., Solovyeva D., Tsigankova V. Treeline History in Northwestern Chukotka during the Last Interglacial and Holocene. *Quaternary International*. 2025;718:109666. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2025.109666>

Wedler C., Span R., Richter M. Comparison of Micro- and Macropore Evolution of Coal Char during Pyrolysis. *Fuel*. 2020;275:117845. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117845>

ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Цыганкова В.И.: идея исследования, авторство эксперимента, сбор полевого материала, пробоподготовка, анализ измерений, создание иллюстраций, написание текста статьи.

V.I. Tsygankova: research concept, experiment design, field material collection, sample preparation, measurement analysis, literature review, illustration creation, writing the first draft of the article.

Данилов Г.К.: сбор полевого материала, подбор литературы, редакция текста.

G.K. Danilov: field material collection, literature review, text editing.

Павлюков Г.К.: сбор полевого материала, анализ измерений, редакция текста.

G.K. Pavlyukov: field material collection, measurement analysis, text editing.

Петров Д.В.: сбор полевого материала, подбор литературы, создание иллюстраций, редакция текста.

D.V. Petrov: field material collection, literature review, illustration creation, text editing.

Вартанян С.Л.: сбор полевого материала, редакция текста.

S.L. Vartanyan: field material collection, text editing.

Конфликт интересов отсутствует / There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Цыганкова Валерия Игоревна, младший научный сотрудник лаборатории геологии кайнозоя и палеомагнетизма Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, Магадан, Россия.

Valeriya I. Tsygankova, Junior Researcher, Laboratory of Cenozoic Geology and Paleomagnetism, North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia.

Данилов Глеб Константинович, младший научный сотрудник лаборатории музейных технологий Музея Антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН (Кунсткамера), Санкт-Петербург, Россия.

Gleb K. Danilov, Junior Researcher, Laboratory of Museum Technologies, Peter the Great Museum of Anthropology and Ethnography (Kunstkamera), Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia.

Павлюков Георгий Константинович, младший научный сотрудник лаборатории геологии кайнозоя и палеомагнетизма Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, Магадан, Россия; младший научный сотрудник лаборатории мониторинга экосистем Арктики и Субарктики Института биологических проблем Севера ДВО РАН, Магадан, Россия.

Georgy K. Pavlyukov, Junior Researcher, Laboratory of Cenozoic Geology and Paleomagnetism, North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia; Junior Researcher, Laboratory of Arctic and Subarctic Ecosystem Monitoring, Institute of Biological Problems of the North, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia.

Петров Денис Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории геологии кайнозоя и палеомагнетизма Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, Магадан, Россия.

Denis V. Petrov, Junior Researcher, Laboratory of Cenozoic Geology and Paleomagnetism, North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia.

Вартанян Сергей Леонович, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии кайнозоя и палеомагнетизма Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, Магадан, Россия.

Sergey L. Vartanyan, Leading Researcher, Laboratory of Cenozoic Geology and Paleomagnetism, North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia.

*Статья поступила в редакцию 09.12.2025;
одобрена после рецензирования 20.04.2026;
принята к публикации 18.05.2026.
The article was submitted 09.12.2025;
approved after reviewing 20.04.2026;
accepted for publication 18.05.2026.*