

УДК 550.384

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ДАТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА СКОРОСТИ РОСТА СПЕЛЕОТЕМА ПЕЩЕРЫ ВОРОНЦОВСКАЯ (КРАСНОДАРСКИЙ КРАЙ)

© 2023 г. Д. А. Гавришкин^{1,*}, Ф. Е. Максимов², А. М. Пасенко¹, Р. В. Веселовский¹

Представлено академиком РАН Л. Н. Когарко 03.07.2023 г.

Поступило 03.07.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принято к публикации 04.08.2023 г.

Спелеотемы являются уникальными архивами информации о климате, геомагнетизме и экологических обстановках прошлого и в последние два десятилетия успешно использовались для палеоклиматических и палеомагнитных исследований. Уникальность этих геологических объектов заключается в особенностях их формирования и сохранения широкого спектра геохимических, геологических и геофизических прокси, и в возможности получать временные ряды соответствующих характеристик с высоким разрешением, в частности, с использованием изотопно-геохронологических методов датирования и приростной хронологии. В настоящей работе представлены результаты определения возраста спелеотема Vor из Воронцовской пещеры (Краснодарский край), сохранившем запись геомагнитного экскурса, $^{230}\text{Th}/\text{U}$ (α -спектрометрия) и радиоуглеродным (^{14}C) методами датирования, а также оценка скорости и продолжительности роста спелеотема методом приростной хронологии. Подобные исследования в России выполнены впервые. Несмотря на ограничения использования методов изотопной геохронологии, удалось получить верхнее ограничение на возраст экскурса, который произошел, вероятно, не позднее 5.5–6 тыс. лет назад. Методом приростной хронологии с большой точностью определена продолжительность основной фазы экскурса Vor – 871 ± 16 лет.

Ключевые слова: спелеотемы, $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирование, ^{14}C -датирование, геомагнитный экскурс, приростная хронология, палеомагнетизм, вариации магнитного поля

DOI: 10.31857/S2686739723601436, **EDN:** SYDQWZ

ВВЕДЕНИЕ

Начало XXI столетия отмечено возрастающим вниманием мирового научного сообщества к окружающей среде и глобальным природным процессам, как современным, так и имевшим место в прошлом. Это выразилось в появлении и развитии междисциплинарных направлений исследований в науках о Земле и, в частности, в поисках новых объектов. Особенно активно в последние два десятилетия развивается наука о спелеотемах (speleothem science), включающая в себя несколько направлений, связанных с использованием натечных кальцитовых образований пещер (спелеотемов) в качестве архивов информации об изменениях окружающей среды в четвер-

тичном периоде. Наиболее успешно спелеотемы используют как объекты для палеоклиматических реконструкций [1] и палеомагнитных исследований, нацеленных на детальное изучение палеомагнитных вариаций геомагнитного поля [2]. Высокое временное разрешение палеомагнитных записей спелеотемов стало возможным во многом благодаря развитию методов датирования спелеотемов по изотомам урановых рядов на основе их масс-спектрометрического (TIMS, ICP-MS) определения, в том числе с использованием локального пробоотбора образцов (LA-ICP-MS). Эти методы позволяют определять возраст спелеотемов в интервале до 650 тыс. лет назад с погрешностью 0.5–3.0% (2 σ) [3].

Спелеотемы являются уникальным носителем палеомагнитной информации, поскольку: (а) магнитные частицы фиксируются в них по геологическим меркам мгновенно и не подвержены эффектам, свойственным другим осадочным породам и искажающим палеомагнитную запись, (б) они практически не подвержены перемагничивающим факторам ввиду стабильности окружающей

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dmitry.gavriushkin@gmail.com

среды пещер, (в) распространены по всему миру, что позволяет проводить глобальную корреляцию результатов, полученных по объектам одного возраста [2]. Указанные особенности спелеотемов, в совокупности с возможностью высокоточного определения возраста слоев сезонного нарастания, определяют их перспективность для детального изучения вековых геомагнитных вариаций и геомагнитных событий — экскурсов и инверсий, составляя, тем самым, фундаментальную основу для реконструкции эволюции и разработки моделей генерации магнитного поля Земли.

Недавно нами были получены первые данные о палеомагнетизме спелеотема Vor из пещеры Воронцовская (Краснодарский край), в котором обнаружена запись геомагнитного экскурса — событие Vor [4]. В настоящей работе представлены первые результаты определения возраста и продолжительности экскурса, записанного в спелеотеме Vor.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал для данного исследования был собран из карстовой пещеры Воронцовская, расположенной в Адлерском районе г.о. Сочи Краснодарского края на северо-восточном побережье Черного моря в 13 км от береговой линии. Вход в пещеру расположен на высоте 500 м н.у.м. Протяженность пещеры 10.4 км, амплитуда высот 240 м. Пещера заложена в верхнемеловых известняках, но местами врезана в подстилающие некарстовые отложения, представленные мергелями и алевролитами [5]. Пещера обводнена водами, поступающими из многочисленных поглощающих поноров в русле р. Кудепста. В пещере широко развиты обвальные, водные механические (галлика, полуокатанный щебень, песок, глина), а в некоторых залах — и натечные отложения.

Спелеотем Vor расположен в южной части пещеры в Очажном гроте и представляет собой натечную плотину (flowstone), образованную путем кристаллизации ионов Ca^{2+} и HCO_3^- при дегазации CO_2 из воды подземного ручья, стекающего с отвесного уступа высотой 4 м.

Из нижней части плотины были выбурены два керны — Vor14 и Vor15, диаметром 25 мм и длиной 236 и 296 мм соответственно. Предварительно от каждого керна была отрезана тонкая продольная пластинка для подсчета слоев годового прироста, после чего каждый керн был распилен поперек длинной оси на отдельные образцы толщиной 4–5 мм для последующих палеомагнитных и геохронологических исследований. На основе результатов палеомагнитных исследований [4], для датирования из каждого керна было отобрано по 6 образцов, которые соответствуют: (а) времени окончания роста спелеотема, (б) примерному

времени завершения экскурса, (в) времени максимальной фазы экскурса.

Для подсчета слоев годового прироста был изготовлен прозрачно-полированный шлиф из фрагмента керна Vor15, соответствующего образцам 53–57, сохранившим запись основной фазы экскурса.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

$^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирование. В настоящее время для определения возраста спелеотемов наиболее широко и успешно применяются изотопные методы датирования по радиевому (урановому) ряду (^{238}U — ^{234}U — ^{230}Th) с использованием различных типов масс-спектрометров (TIMS, ICP-MS) [3]. Однако на момент выполнения данного исследования (2022 г.), по данным авторов, методы масс-спектрометрического определения изотопного возраста карбонатных пород Th/U -методом в России не были реализованы, в связи с чем определение возраста образцов спелеотема Vor проводилось в лаборатории Геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана СПбГУ уран-ториевым ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$) методом неравновесной геохронологии с использованием α -спектрометрии [6]. Отметим, что $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирование пещерного карбоната выполнено в отечественной практике впервые.

Возможность использования $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -метода к спелеотемам связывается с соосаждением гидрогенного U с CaCO_3 в субэкральных средах без дочерних продуктов [7]. Соответственно, для прямого $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования этого природного материала (как и для других объектов) требуется выполнение двух основных предпосылок [8, 9]:

1) в момент образования CaCO_3 происходит включение в него изотопов U без дочернего изотопа ^{230}Th . Со временем из U в результате радиоактивного распада накапливается дочерний изотоп ^{230}Th ;

2) в постседиментационное время спелеотем остается закрытой геохимической (радиометрической) системой относительно U и Th .

При их выполнении возраст карбоната рассчитывается из экспериментальных отношений активностей $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ по уравнению Кауфмана и Брокера [8].

На практике достаточно часто в начальный момент времени в карбонатную формацию включается ^{230}Th в составе детритовых или коллоидных частиц и даже в виде карбонатных комплексов, осажденных из воды [7]. Степень изотопного загрязнения спелеотема ^{230}Th оценивается путем определения концентрации ^{232}Th и введения поправки на первичный ^{230}Th , исходя из начального

Таблица 1. Результаты радиохимического анализа изотопов урана и тория в образцах двух кернов Vor14 и Vor15 из Воронцовской пещеры

№ обр.	Глубина, мм	²³⁸ U	²³² Th	²³⁰ Th/ ²³² Th	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁴ U/ ²³⁸ U	Некоррект. возраст, тыс. лет	Коррект. возраст, тыс. лет
		расп/мин на г						
Керн Vor14								
1	2	0.138 ± 0.011	0.045 ± 0.006	0.714 ± 0.158	0.133 ± 0.024	1.737 ± 0.164	15 ± 3	Близко к современности
2	5	0.105 ± 0.015	0.071 ± 0.005	0.710 ± 0.112	0.268 ± 0.045	1.779 ± 0.294	33 ± 7/6	
38	146	0.198 ± 0.017	0.071 ± 0.009	0.786 ± 0.157	0.181 ± 0.031	1.563 ± 0.169	22 ± 4	7.8 ± 1.7*
39	150	0.229 ± 0.021	0.074 ± 0.008	0.850 ± 0.147	0.172 ± 0.026	1.591 ± 0.176	20 ± 3	7.8 ± 1.7*
46	208	0.257 ± 0.020	0.088 ± 0.008	0.828 ± 0.124	0.209 ± 0.029	1.346 ± 0.135	25 ± 4	7.8 ± 1.7*
47	219	0.311 ± 0.021	0.126 ± 0.012	0.783 ± 0.110	0.249 ± 0.031	1.276 ± 0.110	31 ± 5/4	7.8 ± 1.7*
Керн Vor15								
1	3	0.655 ± 0.056	0.110 ± 0.009	0.681 ± 0.087	0.098 ± 0.013	1.167 ± 0.126	11.2 ± 1.5	Близко к современности
2	7	0.242 ± 0.021	0.046 ± 0.007	0.758 ± 0.183	0.124 ± 0.026	1.164 ± 0.136	14 ± 3	
49	170	0.219 ± 0.026	0.065 ± 0.007	0.925 ± 0.166	0.174 ± 0.028	1.566 ± 0.223	21 ± 4	8.3 ± 2.4**
51	180	0.193 ± 0.020	0.089 ± 0.007	0.722 ± 0.088	0.219 ± 0.030	1.517 ± 0.206	27 ± 4	8.3 ± 2.4**
55	214	0.170 ± 0.013	0.139 ± 0.009	0.678 ± 0.069	0.320 ± 0.033	1.730 ± 0.165	41 ± 5	8.3 ± 2.4**
56	219	0.496 ± 0.049	0.100 ± 0.008	0.711 ± 0.102	0.092 ± 0.014	1.546 ± 0.203	10.5 ± 1.5	открытая система

* изохронный возраст, рассчитанный по 4 образцам керна Vor 14. ** изохронный возраст, рассчитанный по 3 образцам керна Vor 15.

соотношения активностей $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$. Величина этого соотношения может быть определена априорно (например, как среднее значение в земной коре), либо с применением изохронного приближения, которое заключается в анализе ряда одно-возрастных или близких по возрасту образцов [10].

Для анализа были использованы образцы кернов Vor14 и Vor15 с разных стратиграфических уровней (табл. 1), масса одного образца составляла 1.5–3.0 г. На первой стадии образцы подвергались нагреванию при температуре 500–600°C для разрушения органических веществ [9]. Далее образцы растворялись в 7Н HNO_3 [8]. Определение содержания изотопов U и Th в полученных растворах производилось с применением радиохимической методики [11].

^{14}C -датирование. Для проверки результатов $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -метода было также проведено радиоуглеродное датирование. Определение возраста спелеотема с использованием изотопа ^{14}C выполнялось в лаборатории Геоморфологических и палеографических исследований полярных регионов и Мирового океана СПбГУ с использованием жидкостно-сцинтилляционного метода счета β -частиц ^{14}C . Из CO_2 , полученного из CaCO_3 образца спелеотема, синтезировался бензол, из которого готовился жидкий сцинтиллятор [12]. Измерение активности ^{14}C бензола проводилось на ультра-низкофоновом сцинтилляционном спектрометре

Quantulus. Калибровка радиоуглеродного возраста осуществлялась по программе OxCal v4.4.4 [13] с использованием калибровочной кривой [14].

Из-за малого количества фактического материала для анализа были использованы две объединенные пробы из образцов разных кернов, близкие по своему стратиграфическому положению: Vor14-34 (129 мм) + Vor15-45 (145 мм) и Vor15-53 (205 мм) + Vor15-57 (228 мм).

Приростная хронология. Наряду с изотопными методами определения возраста спелеотемов на практике нередко применяется метод приростной хронологии (incremental chronology), который заключается в прямом подсчете слоев годичного прироста. Данный метод используется, в частности, для высокоточного определения продолжительности конкретных событий в записи спелеотемов и позволяет существенно снизить погрешности изотопных методов (см., например, [15] и ссылки там). В обзоре [15] авторы обсуждают годичную природу разных типов слоистости спелеотемов и делают вывод, что в регионах с выраженной сезонностью выпадения осадков видимая слоистость является следствием сезонных колебаний водного питания или состава пещерной атмосферы (влажность, концентрация CO_2) и представляет собой чередование относительно прозрачных слоев кальцита, образованных в более влажные сезоны, с тонкими непрозрачными слоями, сформированными в более засушливое

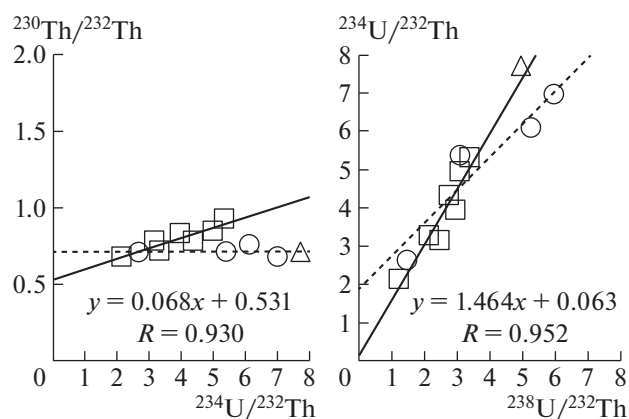


Рис. 1. Изохронные зависимости: проведенные через квадратики — образцы, относящиеся к глубинам 146–219 мм (Vor14) и 170–214 мм (Vor15), изохронный возраст 7.7 ± 1.4 тыс лет; проведенные через кружки — образцы, относящиеся к глубинам 2 и 5 мм (Vor14) и 3 и 7 мм (Vor15), возраст близок к современному; треугольник — образец Vor15-56.

время года. Поскольку Воронцовская пещера расположена в местности с выраженной сезонностью (среднегорье Западного Кавказа), где осадки выпадают преимущественно в осенне-весеннее время с относительно сухим летним периодом, это позволяет применить описанную методику для спелеотема Vor. В целях точного определения продолжительности экскурса Vor был выполнен подсчет слоев годовичного прироста во фрагменте керна Vor15, отвечающем образцам 53–57. Подсчет выполнен на основе изображения шлифа, полученного при помощи прямого оптического микроскопа при общем увеличении до $\times 1000$. Для подсчета изображения фрагмента было разбито вдоль простирания слойков на 3 участка, слои прироста считались в каждом участке отдельно по 3 раза — вдоль направления прироста по трем разным профилям, затем результаты подсчета по каждому участку усреднялись и складывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ

$^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирование. Аналитические данные (табл. 1) получены с достаточно высокими величинами погрешностей, что является следствием малых концентраций изотопов U и Th в карбонатах, а также небольших по массе навесок образцов. По всей глубине спелеотема выявляется весьма значительное загрязнение карбоната изотопами Th. Величина соотношения активностей $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ в образцах меньше 1, что может указывать на вероятное присутствие существенного количества детритного ^{230}Th во время образования карбоната, ставшего причиной значительного завышения отношения активностей $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ и,

соответственно, прямого (некорректированного) $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -возраста. Эти обстоятельства определили необходимость коррекции аналитических данных [16].

Обращают на себя внимание значения некорректированного возраста образцов Vor14-2 и Vor15-56, выпадающие из хронологической последовательности остальных некорректированных датировок. Завышение возраста образца в первом случае, вероятно, свидетельствует о более значительном детритном загрязнении Vor14-2 относительно других образцов. Тогда как явное занижение некорректированного возраста образца Vor15-56 может быть связано с аккумуляцией изотопов U в постседиментационное время и, соответственно, с нарушением второй предпосылки метода, по крайней мере, для этого слоя. Наблюдаются различия в значениях отношений активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в образцах каждого из кернов, а также между ними. К этому могли привести изменявшиеся во времени условия отложения карбоната, либо, опять-таки, нарушение второй предпосылки метода.

Для анализа образцов нами использовалась методика выщелачивания (L/L-модель), поэтому при частичном растворении некарбонатной фазы могло проявляться некоторое фракционирование изотопов U и Th. Тем не менее считается, что этот эффект уменьшается при сжигании образцов (как в нашем случае) и применение изохронного приближения не будет давать существенного искажения изохронно-корректированного возраста [10]. Мы применили изохронное приближение для трех образцов (керна Vor15 с глубин 170–214 мм), отвечающих экскурсу, и четырех образцов (керна Vor14 с глубин 146–219 мм) близких к нему стратиграфически и, соответственно, по возрасту. Согласно расчетам по методике [17] с использованием параметров линейных зависимостей, построенных по этим 7 образцам (рис. 1), изохронный возраст будет равен 7.7 ± 1.4 тыс. лет. Если для изохронного приближения использовать образцы отдельно для каждого керна, то возраст для четырех образцов Vor14 с глубин 146–219 мм составит 7.8 ± 1.7 тыс. лет, а для трех образцов керна Vor15 с глубин 170–214 мм — 8.3 ± 2.3 тыс. лет. Фактически изохронный возраст с учетом погрешностей по трем представленным вариантам расчета практически один и тот же.

В то же время образцы с поверхности спелеотема (или близко к ней) Vor14-1 и Vor14-2, Vor15-1 и Vor15-2 располагаются в координатах $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ — $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ фактически по горизонтали (рис. 1), что предполагает их недавнее образование (условно близко к “нулевому” возрасту). Образец Vor15-56 находится на этой же горизонтальной и далеко вне линейной зависимости по 7 образцам с возрастом 7.7 ± 1.4 тыс. лет (рис. 1), что

Таблица 2. Результаты подсчета слоев во фрагменте керна Vor15e

Участок	Мощность участка, мкм	Результаты подсчета слоев годовичного прироста			Среднее кол-во слоев по участку	Среднее по всему фрагменту	Средняя скорость роста (мкм/год)
		Результат 1	Результат 2	Результат 3			
15e_1	10887	247	252	260	253	871	43
15e_2	10546	287	297	296	292		36
15e_3	7843	321	323	330	325		24
Весь фрагмент	29276	855	872	886			34

свидетельствует об открытой радиометрической системе в слое керна Vor15 на глубине 219 мм в течение постседиментационного времени.

Таким образом, полученные $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -изохронные значения возраста изученных образцов находятся в пределах голоцена. Однако наличие признаков открытой системы в отдельных слоях не позволяет полностью исключить возможность нарушения второй предпосылки метода для всей карбонатной формации в постседиментационное время. Тем более, если учитывать возможные диagenетические процессы и вторичную мобилизацию изотопов U, которые иногда имеют место в пещерных карбонатах [18].

^{14}C -датирование. В результате проведенных исследований нами были получены следующие значения возраста по методу ^{14}C :

- 2610 ± 130 лет BP (калиброванный возраст – 2680 ± 170 лет calBP) для объединенного образца (Vor14-34 + Vor15-45);
- 2350 ± 130 лет BP (калиброванный возраст – 2410 ± 190 лет calBP) для объединенного образца (Vor15-53 + Vor15-57).

Сложность радиоуглеродного датирования таких объектов, как спелеотемы, обусловлена тем, что доля “мертвого” углерода, поступившего в спелеотем в прошлом (в начальный момент времени) в результате растворения известняка и деградации старого органического вещества почвы, неизвестна. Таким образом, прямые (некорректированные на “мертвый” углерод) радиоуглеродные оценки возраста, представленные с учетом калибровки, как правило должны быть больше $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -возраста. Подобный эффект наблюдался, например, при изучении сталагмитов в Европе [19].

Однако следует отметить и обратную ситуацию: в позднелейстоценовом сталагмите в пещере в Ботсване ^{14}C -возраст моложе значения возраста по $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -методу на 5–10 тыс. лет. Это объясняется условиями открытой системы, т.е. постседиментационным внесением в карбонатную формацию молодого ^{14}C [20]. Вероятно, это могло происходить при частичной перекристал-

лизации CaCO_3 . Касательно спелеотема Vor сделать вывод, в какую сторону мог отклониться ^{14}C -возраст, достаточно сложно; можно лишь предположить, что он в большей или меньшей степени является омоложенным.

Приростная хронология. В результате прямого подсчета установлено, что фрагмент керна Vor15, соответствующий образцам 53–57, включает 871 ± 16 пар слоев (табл. 2). Каждая пара представлена более толстым прозрачным и тонким непрозрачным слоями кальцита, образованными во влажные и относительно сухие сезоны соответственно (рис. 2). Таким образом, каждая пара соответствует одному календарному году, а весь фрагмент – 871 ± 16 годам.

Мощность слоев в нижней (более древней) части фрагмента меньше, чем в более молодой верхней, что указывает на увеличение скорости роста спелеотема на соответствующем временном промежутке. В нижней трети фрагмента скорость прироста составляла ~24 мкм/год, в то время как в верхней части ~43 мкм/год. В среднем по фрагменту скорость прироста составила ~34 мкм/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в предыдущем разделе, определения возраста, полученные по $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - и ^{14}C -методам, не следует считать однозначно надежными. Действительно, утверждать, что карбонатная формация (и ее отдельные слои) сохранялась в постседиментационное время как закрытая радиометрическая система (как по $^{230}\text{Th}/\text{U}$, так и по ^{14}C), весьма сложно. Также неизвестно начальное содержание в пробах изотопа ^{14}C . Наконец, в рамках $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования аналитические данные получены с большими погрешностями, что является следствием малого количества исследуемого материала. Таким образом, по данным изотопной геохронологии, можно лишь предположить, что геомагнитное событие Vor имело место в голоцене. Однозначное соотнесение его с известными геомагнитными экскурсами голоцена не представляется возможным.

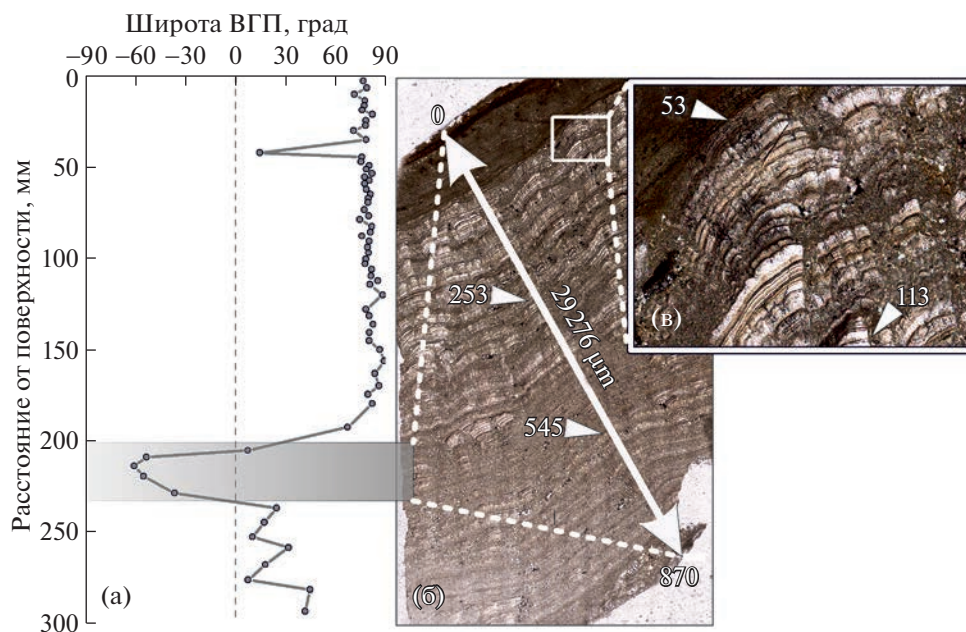


Рис. 2. (а) Кривая изменения широты виртуального геомагнитного полюса в зависимости от глубины по данным керна Vor15. Затененной серой областью показан интервал, соответствующий образцам 53–57 и изученный методом приростной хронологии; (б) микроизображение шлифа фрагмента керна Vor15, содержащего 871 ± 16 пар слоев; (в) участок того же шлифа в более крупном масштабе, демонстрирующий слои годичного прироста спелеотема.

В то же время метод приростной хронологии дает точную оценку продолжительности основной фазы события Vog, во время которой виртуальный геомагнитный полюс находился в южном полушарии — 871 ± 16 лет. Такая оценка согласуется с данными о продолжительности известных экскурсов, по крайней мере, последних 50 тыс. лет истории Земли. Скорость роста спелеотема в этом интервале глубин (235–205 мм) колебалась от 24 до 43 мкм/год со средним значением 34 мкм/год. Если допустить, что за время “жизни” спелеотема Vog скорость его роста не выходила за эти пределы и перерывы роста отсутствовали, то методом экстраполяции можно оценить продолжительность всей палеомагнитной записи (начиная от основной фазы экскурса на глубине 236 мм) в пределах от 5.5 до 9.8 тыс. лет, в среднем — 6.9 тыс. лет. Это довольно грубая оценка, но она позволяет предположить, что обнаруженный экскурс мог иметь место не позднее середины голоцена; в таком случае результаты определения возраста по ^{14}C — 2680 ± 170 и 2410 ± 190 лет calBP — следует рассматривать как значительно омоложенные. В то же время ранее приведенные оценки $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -изохронного возраста 8.3 ± 2.3 тыс. лет (для трех образцов керна Vor15 с глубин 170–214 мм), 7.8 ± 1.7 тыс. лет (для четырех образцов Vor14 с глубин 146–219 мм) и 7.7 ± 1.4 тыс. лет (совокупно для 7 этих образцов), хотя и представляются не вполне надежными, не противоречат данным приростной хронологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предпринята первая в отечественной практике попытка определения возраста спелеотема, сохранившего запись геомагнитного экскурса, с привлечением $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - и радиоуглеродного методов датирования, а также с использованием метода приростной хронологии (incremental chronology). Первые данные позволяют предположить, что геомагнитное событие Vog, наиболее вероятно, имело место в голоцене. Однако в целом фрагментарность аналитических данных, в совокупности с их большими погрешностями и признаками открытости изотопных систем по $^{230}\text{Th}/\text{U}$ и ^{14}C , не позволяет надежно обосновать полученные оценки возраста. Для решения этой задачи необходимо или значимое увеличение объема анализируемого вещества, или привлечение более высокоразрешающих методов датирования карбонатов.

Важным выводом данного исследования является выполненная методом приростной хронологии оценка скорости роста спелеотема и продолжительности основной фазы геомагнитного события Vog, которая составила 871 ± 16 лет. Данный результат имеет ключевое значение для понимания эволюции магнитного поля Земли, построения и тестирования моделей его генерации. На основе экстраполяции данных приростной хронологии на весь керн Vor15, в совокупности с результатами $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -изохронного датиро-

вания, предложено, что геомагнитное событие Vog могло произойти не позднее 5.5–6 тыс. лет назад.

Проведенные исследования подчеркивают перспективность натечных образований пещер — спелеотемов — как объектов для изучения тонкой структуры геомагнитного поля, а также необходимость совершенствования методов и подходов высокоточной оценки возраста карбонатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Виктории Бэртовне Ершовой за помощь в проведении микроскопических исследований и Алексею Николаевичу Диденко за внимательное рецензирование этой работы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00453 и на оборудовании ЦКП “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fairchild I.J., Smith C.L., Baker A., Fuller L., Spötl C., Matthey D., McDermott F. Modification and preservation of environmental signals in speleothems // *Earth-Science Reviews*. 2006. V. 75. № 1–4. P. 105–153. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.08.003>
2. Lasca I., Feinberg J.M. Speleothem magnetism // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30 (23–24). P. 3306–3320. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.08.004>
3. Dorale J.A., Edwards R.L., Alexander E.C., Shen C.C., Richards D.A., Cheng H. Uranium-Series Dating of Speleothems: Current Techniques, Limits, & Applications. In: Sasowsky, I.D., Mylroie, J. (eds) *Studies of Cave Sediments*. 2004. Springer. Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9118-8_10
4. Gavriushkin D.A., Pasenko A.M., Veselovskiy R.V., Rud'ko D.V. Geomagnetic Excursion Record Preserved in the Speleothem from Western Caucasus: First Data // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13 (2s), 0624. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0624>
5. Дублянский В.Н., Илюхин В.В. Крупнейшие карстовые пещеры и шахты СССР // Изд. Наука, 1982. 137 с.
6. Кузнецов В.Ю., Максимов Ф.Е. Методы четвертичной геохронометрии в палеогеографии и морской геологии. СПб.: Наука, 2012. 191 с.
7. Richards D.A., Dorale J.A. Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems / In B. Bourdon, G.M. Henderson, C.C. Lundstrom, S.P. Turner (Eds.), *Uranium-series geochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry*. Geochemical Society, Mineralogical Society of America. 2003. V. 52. P. 407–460.
8. Kaufman A., Wasserburg G.J., Porcelli D., Bar-Matthews M., Ayalon A., Halicz L. U-Th isotope systematics from the Soreq Cave, Israel, and climatic correlations // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 156. P. 141–155.
9. Labonne M., Hillaire-Marcel C., Ghaleb B., Goy J.-L. Multi-isotopic age assessment of dirty speleothem calcite: an example from Altamira Cave, Spain // *Quaternary Science Reviews*. 2002. V. 21. P. 1099–1110.
10. Bischoff J.L., Fitzpatrick J.A. U-series dating of impure carbonates: An isochron technique using total-sample dissolution // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 543–554.
11. Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Новая версия $^{230}\text{Th}/\text{U}$ датирования верхне- и среднелепестовых отложений // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2010. Серия 7. Вып. 4. С. 94–107.
12. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: Геохимия и геохронология. Л.: ЛГУ, 1987. 300 с.
13. Bronk Ramsey C. OxCal. “v4. 4.4. 2021” // *Scientific Reports*. 2022. 12. P. 60.
14. Reimer P.J., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. V. 62. № 4. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
15. Baker A., Smith C.L., Jex C., Fairchild I.J., Genty D., Fuller L. Annually Laminated Speleothems: a Review // *International Journal of Speleology*. 2008. 37 (3). P. 193–206.
16. Hellstrom J. U-Th dating of speleothems with high initial Th-230 using stratigraphical constraint // *Quaternary Geochronology*. 2006. V. 1. P. 289–295.
17. Максимов Ф.Е., Савельева Л.А., Попова С.С., Зюганова И.С., Григорьев В.А., Левченко С.Б., Петров А.Ю., Фоменко А.П., Панкратова Л.А., Кузнецов В.Ю. Хроностратиграфическое положение микулинских отложений (на примере опорного разреза у д. Нижняя Боярщина, Смоленская область) // *Известия РАН, серия географическая*. 2022. Т. 86. № 3. С. 447–469. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030116>
18. Scholz D., Tolzmann J., Hoffmann D.L., Jochum K.P., Spötl C., Riechelmann D. Diagenesis of speleothems and its effect on the accuracy of $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -ages // *Chemical Geology*. 2014. V. 387. P. 74–86.
19. Genty D., Massault M., Gilmour M., Baker A., Verheyden S., Kepens E. Calculation of past dead carbon proportion and variability by the comparison of AMS ^{14}C and TIMS U/Th ages on two Holocene stalagmites // *Radiocarbon*. 1999. V. 41. P. 251–270.
20. Holmgren K., Lauritzen S.E., Possnert G. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C dating of a Late Pleistocene stalagmite in Lobatse II cave – Botswana // *Quaternary Geochronology* (Quaternary Science Review). 1994. V. 13. P. 111–119.

FIRST RESULTS OF COMPLEX DATING AND GROWTH RATE ESTIMATION OF SPELEOTHEM FROM VORONTSOVSKAYA CAVE (KRASNODAR REGION, RUSSIA)

D. A. Gavriushkin^{a, #}, F. E. Maksimov^b, A. M. Pasenko^a, and R. V. Veselovskiy^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: dmitry.gavriushkin@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS L.N. Kogarko July 3, 2023

Speleothems are unique archives of information about climate, geomagnetism, and ecological conditions of past epochs of the Earth, and over the past two decades have been successfully used for paleoclimatic and paleomagnetic studies. The uniqueness of these geological objects lies in the peculiarities of their formation and preservation in them of a wide range of geochemical, geological and geophysical proxies, and, most importantly, in the ability to obtain time series of these proxies in an unprecedentedly accurate resolution using $^{230}\text{Th}/\text{U}$, ^{14}C and some other geochronological methods, as well as incremental chronology. This paper presents the first results of dating the Vor speleothem from the Vorontsovskaya Cave (Krasnodar region), which preserved a record of the geomagnetic excursion, obtained by $^{230}\text{Th}/\text{U}$ α -spectrometry, ^{14}C dating, and incremental chronology. Such studies have been carried out in Russia for the first time. Despite the limitations of using the methods of isotope geochronology, it was possible to obtain a limit on the age of the excursion, which probably occurred no earlier than 5500–6000 years ago. At the same time, the incremental chronology made it possible to determine with great accuracy the duration of the main phase of the excursion, which equals 871 ± 16 years, during which the virtual geomagnetic pole was in the southern hemisphere, and also to obtain the upper limit on the age of the excursion, which probably occurred no later than 5.5–6 thousand years ago.

Keywords: speleothems, $^{230}\text{Th}/\text{U}$ dating, ^{14}C dating, geomagnetic excursion, incremental chronology, paleomagnetism, variations of geomagnetic field