

*В. Ю. Кузнецов, Х. А. Арсланов, В. Б. Козлов,
Ф. Е. Максимов, Л. А. Савельева, С. Б. Чернов, Н. Г. Баранова*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УРАН-ТОРИЕВОГО МЕТОДА НЕРАВНОВЕСНОЙ ГЕОХРОНОЛОГИИ ДЛЯ ДАТИРОВАНИЯ МЕЖЛЕДНИКОВЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ¹

Введение. Решение многих проблем четвертичной геологии и палеогеографии неразрывно связано с использованием надежных геохронологических методов датирования континентальных и океанических осадков. При изучении голоценовых и позднелайстоценовых отложений на континенте наибольшее применение нашел радиоуглеродный метод определения абсолютного возраста органических формаций (торф, гиттия, сапропель). На его основе были разработаны геохронологические шкалы, хроностратиграфические и климато-геохронологические схемы голоцена и второй половины позднего плейстоцена (последние 50–55 тыс. лет) [1, 2].

В последние десятилетия для датирования отложений минерального состава (пески, опесчаненные глины, минералы) с возрастом более 50–55 тыс. лет используются разные модификации термолюминисцентного (ТЛ) метода. Однако, как известно, данные ТЛ-датирования не всегда можно рассматривать как окончательные, так как они часто не совпадают с результатами других стратиграфических методов изучения плейстоценовых континентальных осадков. Поэтому вопрос об абсолютной геохронологии поздней и среднелайстоценовых формаций на континенте до настоящего времени остается открытым.

Известно, что для датирования океанических осадков, конкреций, кораллов и раковин моллюсков (из трансгрессивных морских отложений), возраст которых превышает 50–55 тыс. лет, применяются так называемые неравновесные методы ядерной геохронологии. Они основаны на установленном факте нарушения радиоактивного равновесия в урановом и актиноурановом природных рядах в океанической воде и соответственно в морских осадках и формациях [3, 4]. К этим методам относятся иониевый и протактиниевый, пределы датирования которых составляют около 300–350 и 150–200 тыс. лет соответственно, и их модификации. Радиоактивный распад избыточной активности дочерних радионуклидов ^{230}Th и ^{231}Pa над материнскими изотопами урана в колонке осадочной толщи используется для установления возраста донных осадков. Для определения возраста карбонатных отложений (раковин моллюсков, кораллов), наоборот, необходимо знать количество накопившегося к настоящему времени дочернего изотопа в сравнении с материнским ураном.

Датирование морских осадочных формаций по $^{230}\text{Th}_{изб}$ и $^{231}\text{Pa}_{изб}$ в сочетании с методами биостратиграфического, изотопно-кислородного, палеотемпературного, палеомагнитного и других видов анализов легло в основу обобщенной изотопно-кислородной шкалы океанических осадков и позволило выявить тесную корреляцию между колебаниями уровня и палеотемпературами Мирового океана, с одной стороны, и глобальными изменениями климата на Земле в плейстоцене — с другой [5–9]. Определение возраста уран-ториевым методом, а также методом электронно-парамагнитно-резонансной спектроскопии раковин моллюсков из трансгрессивных морских отложений дало возможность установить временные границы межледниковых уровней океана в позднем плейстоцене [10–13].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-05-64870) и ИНТАС (№ 01-0675).

© В. Ю. Кузнецов, Х. А. Арсланов, В. Б. Козлов, Ф. Е. Максимов, Л. А. Савельева, С. Б. Чернов, Н. Г. Баранова, 2003

В последнее время в Западной Европе находит применение уран-ториевый метод ядерной геохронологии для определения возраста континентальных органогенных отложений (погребенный торф), возраст которых достигает 300–350 тыс. лет. В отложениях погребенного торфа, как и в морских раковинах моллюсков, наблюдается нарушение радиоактивного равновесия в урановом ряду. При этом со временем из материнского урана, находящегося в органической фракции пробы в значительных количествах — $(10 - 100) \cdot 10^{-6}$ г/г, — накапливается дочерний ^{230}Th , а значение отношения $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ является мерой возраста образца. Первые результаты применения уран-ториевого датирования погребенных торфов опубликованы в 1980 г. [14]. В дальнейшем рядом исследователей проводилось изучение геохимического поведения изотопов урана и тория в отложениях погребенного торфа, разрабатывались основы и предпосылки уран-ториевого датирования этих формаций [15]. Однако возможности и ограничения уран-ториевого метода датирования до конца не проработаны, потому получаемые им датировки не всегда приводят к ожидаемым результатам, давая иногда искаженные возрастные данные.

В качестве объекта исследований был выбран разрез межледниковых микулинских отложений, представленных погребенным торфом и гиттией, и расположенный на территории Русской равнины (Смоленская обл., пос. Микулино). Эти осадки, изученные методами относительной геохронологии (палинологическим, палеокарпологическим и др.), исследователи относят ко времени последнего межледниковья, называемого микулинским в России и земским или рисс-вюрмским в Западной Европе, а разрез «Микулино» рассматривают как стратотип этого геологического периода. Возрастные границы данного межледниковья коррелируют с изотопно-кислородной стадией 5e, согласно геохронологической шкале океанических осадков, и составляют приблизительно 115–130 тыс. лет [5–7], или, по мнению ряда исследователей [12, 13], соответствуют всей стадии 5 (около 74–130 тыс. лет).

Основными целями настоящей работы являлись:

- 1) детальное изучение геохимического поведения изотопов урана и тория в вертикальном профиле отложений погребенного торфа из разреза «Микулино» для проработки основных предпосылок использования уран-ториевого метода датирования этих формаций;
- 2) получение первых в России значений абсолютного возраста погребенного торфа из стратотипического разреза микулинского межледниковья;
- 3) оценка возможностей применения уран-ториевого метода в геохронологических исследованиях верхне- и среднелейстоценовых межледниковых отложений.

Предпосылки создания уран-ториевого метода датирования погребенных торфов. Первые сведения о содержании изотопов урана и тория в погребенных торфяниках приведены в монографии В. В. Чердынцева [16]. Им было показано, что концентрация этих радионуклидов в торфах предположительно микулинского возраста обнаруживает заметное обогащение их как ураном ($\text{Th}/\text{U} = 0,33$), так и торием-230 ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} = 3,6$). Очень низкая способность живущих (растущих в настоящее время) растений концентрировать уран из грунтовых вод не может объяснить подобное насыщение ураном торфов. А. Шалаи [17] подсчитал, что производство 1 г сухого растительного материала требует 500 г воды, что приводит к обогащению ураном органической фазы в 500 раз (по отношению к грунтовой воде). Обычная концентрация урана в грунтовой воде составляет примерно несколько 10^{-9} г/г. Поэтому объяснить концентрацию урана в торфе порядка 10 – 100 ppm ($10 - 100 \cdot 10^{-6}$ г/г) таким путем не представляется возможным.

Некоторые авторы нашли, что продукты разложения органики в торфе имеют большую адсорбционную способность и играют главную роль в обогащении ураном торфяников [18]. Этот разложившийся органический материал содержит гуминовые и фульвокислоты, характеризуется наличием циклических ароматических структур и присутствием гидроксильных

и карбоксильных групп. При этом органические кислоты обладают очень высокой адсорбционной способностью по отношению к урану в уранил-форме, образуя очень стабильные уранил-органические комплексы [19]. Таким образом, включение в торф урана может идти двумя путями: а) образование нерастворимых органических комплексов и б) твердо-фазовое комплексобразование с гуматами, покрывающими поверхность глинистых частиц и материалов.

Более поздние работы подтвердили тот факт, что в торфе, как древнем, так и живом, наблюдаются высокие концентрации урана (от $25 \cdot 10^{-6}$ г/г и выше), что в принципе создает возможность для их датирования уран-ториевым методом [14, 18]. Действительно, в дальнейшем было установлено, что высокие содержания ^{230}Th в погребенных торфах обусловлены его накоплением из материнского урана органической фазы (содержание которой иногда достигает 80–90%) осадков, а величина отношения $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ может служить мерой возраста этих органических отложений [14, 15, 20].

Природные процессы, ответственные за формирование погребенного торфа, и геохимические пути поступления в эти отложения изотопов урана и тория схематически показаны на рис. 1 [15]. Из него видно, что поступление основной части урана (не считая минеральной, или детритной, составляющей) к отложениям торфа происходит по схеме: высвобождение нуклида из состава минеральных частиц (образующихся в результате эрозии подстилающих породобразующих минералов) с последующим окислением и растворением в воде — транспортировка в ионной форме (UO_2^{2+}) или в виде уранил-карбонатного комплекса $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ — закрепление в органическом субстрате торфа. Торий (^{232}Th), не имеющий в природе водорастворимых форм, может включаться в структуру формирующегося торфа только в составе минеральных (детритных) частиц за счет речного или эолового переноса.

Основные положения уран-ториевого метода датирования отложений погребенного торфа. В процессе настоящего исследования были тщательно проработаны основные предпосылки уран-ториевого датирования этих формаций [4, 14, 15]: 1) датируемый образец должен представлять собой закрытую геохимическую систему по отношению к изотопам урана и тория; 2) не должно быть детритных урана и тория в датируемой органической фракции торфа в начальный момент времени его образования; если же в датируемой фракции образца присутствуют незначительные количества этих радионуклидов, то необходима коррекция на детритные (привнесенные из минеральной фазы пробы) уран и торий.

Описание разреза «Микулино». Разрез «Микулино» расположен на юго-востоке Витебской возвышенности (рис. 2); платообразная поверхность которой расчленена системой валдайских ложбин ледникового выпаивания и размыва. Перепад высот между кровлей валдайской морены на водоразделе и ее подошвой в Микулинской ложбине составляет свыше 40 м.

Межледниковые гиттии и торфяники обнажаются в средней части склона Микулинской ледниковой ложбины, унаследованные р. Рутавсчью, и фиксируют собой положение дна межледникового водоема в микулинское время. Межледниковые осадки центральной части микулинского водоема были уничтожены в валдайское время при образовании ложбины. В результате эрозии и экзарации сохранились лишь краевые части межледникового озера на месте известных разрезов «Панская Гора» и «Мачеха» [21].

В 1998 г. были отобраны пробы из разреза озерно-болотных осадков микулинского межледниковья в селе Микулино Смоленской обл. (разрез «Панская Гора»). С целью детальных геохронологических исследований пробы отбирались через 5–10 см. Приведем описание разреза сверху вниз:

0,0–0,2 м — гумусированный суглинок с корнями деревьев;

0,2–0,3 м — торф темно-коричневый с вкраплениями песка;

0,3–1,3 м — торф темно-коричневый;



Рис. 1. Схема формирования погребенного торфа.

1,3–1,5 м — гиттия темно-серая, плитчатая; нижние 10 см являются водоносным горизонтом.

Экспериментальная часть. Для проведения радиохимических исследований использовались пробы высушенного торфа массой 3–5 г, отобранные из органогенной толщи в интервале глубин 0,2–1,3 м. Определение содержания, или, точнее, удельных активностей, изотопов урана и тория осуществлялось только в органической фракции образцов из 17 слоев торфа по



Рис. 2. Местоположение разреза «Микулино».

всему профилю разреза. Озоление проб производилось при 600°C в течение 24 ч. Остаток после прокаливания выщелачивался раствором 7 н. HNO_3 . После центрифугирования минеральный остаток отбрасывался (на этой стадии анализа в оставшийся раствор вводились индикаторы химического выхода изотопов урана — ^{232}U и тория — ^{234}Th); а урановая и ториевая фракции очищались и разделялись с помощью хроматографических колонок. Затем каждая фракция в отдельности осаждалась из спиртового раствора на Pt-диски. Альфа-спектрометрические измерения осуществлялись в течение нескольких дней [22].

Палинологические исследования проводились на материале 15 образцов, отобранных по всей мощности разреза из каждого 10-сантиметрового слоя. Предварительная обработка и подготовка образцов для спорово-пыльцевого анализа производились по стандартной методике [23]. При построении спорово-пыльцевой диаграммы за 100% принята сумма пыльцы древесной и травянистой растительности, исключая водные растения и споры.

Обсуждение полученных результатов. Стратиграфия отложений по данным спорово-пыльцевого анализа. По результатам палинологических исследований построена спорово-пыльцевая диаграмма (рис. 3). На основе изменения состава спорово-пыльцевых спектров удалось выделить 4 палинологические зоны, которые в соответствии с принятой схемой деления микулинского межледниковья можно отнести к зонам М5–М8 [24].

Зона М5 (глубина 1,4–1,2 м). В спектрах доминирует пыльца древесных пород, среди которой пыльца лещины (*Corylus*) и ольхи (*Alnus*) составляет 55 и 35% соответственно, что является максимальным количеством для всего разреза. Среди пыльцы широколиственных пород доминирует пыльца липы (*Tilia*) — около 10%, затем пыльца граба (*Carpinus*), дуба (*Quercus*) и вяза (*Ulmus*) — каждая не более 5%. Содержание пыльцы трав незначительно и колеблется от 2 до 8%. Споры растений представлены только спорами папоротников (*Polypodiaceae*) — от 5 до 50%.

Зона М6 (глубина 1,2–0,75 м). В спектрах преобладает пыльца *Alnus* (20–40%) и *Corylus* (15–20%). Наблюдается появление пыльцы сосны (*Pinus*); пыльца ели (*Picea*) присутствует в значительном количестве (10–35%). Характерным для этой зоны является высокое содержание пыльцы *Carpinus* (10–15%). Среди спорных по-прежнему доминируют споры *Polypodiaceae*. В этой зоне зафиксированы также споры чистоуста коричневого (*Osmunda cinnamomea*).

Результаты радиохимического

Образец	Глубина, см	Зольность, %	U, ppm	Th, ppm	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$	^{238}U , dpm	^{234}U , dpm
LU-4222	20-25	33,44	$56,4 \pm 2,4$	$3,74 \pm 0,04$	$15,08 \pm 0,65$	$40,6 \pm 1,7$	$42,8 \pm 1,8$
LU-4306	30-35	20,85	$7,36 \pm 0,26$	$1,04 \pm 0,04$	$7,08 \pm 0,38$	$5,3 \pm 0,2$	$5,7 \pm 0,2$
LU-4301	35-40	19,79	$4,86 \pm 0,29$	$1,30 \pm 0,10$	$3,74 \pm 0,37$	$3,3 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$
LU-4225	45-50	12,71	$2,92 \pm 0,15$	$1,26 \pm 0,04$	$2,32 \pm 0,14$	$2,0 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
LU-4311	55-60	17,03	$4,31 \pm 0,15$	$1,24 \pm 0,04$	$3,48 \pm 0,16$	$2,9 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$
LU-4302	60-65	10,58	$1,42 \pm 0,11$	$0,65 \pm 0,04$	$2,18 \pm 0,22$	$1,0 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$
LU-4310	65-70	11,20	$1,44 \pm 0,12$	$0,69 \pm 0,04$	$2,09 \pm 0,21$	$1,0 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$
LU-4304	70-75	10,25	$1,29 \pm 0,10$	$0,65 \pm 0,04$	$1,98 \pm 0,20$	$1,0 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$
LU-4226	75-80	8,09	$1,08 \pm 0,11$	$0,45 \pm 0,04$	$2,40 \pm 0,32$	$0,8 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$
LU-4308	80-85	9,50	$1,94 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,04$	$4,30 \pm 0,49$	$1,4 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$
LU-4305	85-90	9,33	$1,47 \pm 0,13$	$0,37 \pm 0,04$	$3,97 \pm 0,53$	$1,1 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$
LU-4232	90-95	10,16	$2,26 \pm 0,14$	$0,49 \pm 0,04$	$4,61 \pm 0,48$	$1,6 \pm 0,1$	$1,7 \pm 0,1$
LU-4309	95-100	10,05	$4,17 \pm 0,14$	$0,52 \pm 0,04$	$8,02 \pm 0,67$	$3,0 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$
LU-4227	100-105	10,48	$5,28 \pm 0,14$	$0,41 \pm 0,04$	$12,88 \pm 1,20$	$3,8 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,1$
LU-4307	105-110	9,83	$6,67 \pm 0,27$	$0,72 \pm 0,04$	$9,26 \pm 0,65$	$4,8 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$
LU-4303	110-115	10,43	$9,58 \pm 0,29$	$0,38 \pm 0,04$	$25,21 \pm 2,62$	$6,9 \pm 0,2$	$6,9 \pm 0,2$
LU-4228	125-130	14,15	$14,9 \pm 0,6$	$0,65 \pm 0,04$	$22,88 \pm 1,66$	$10,7 \pm 0,4$	$10,7 \pm 0,4$

Примечание. ppm — $n \cdot 10^{-6}$ г/г;

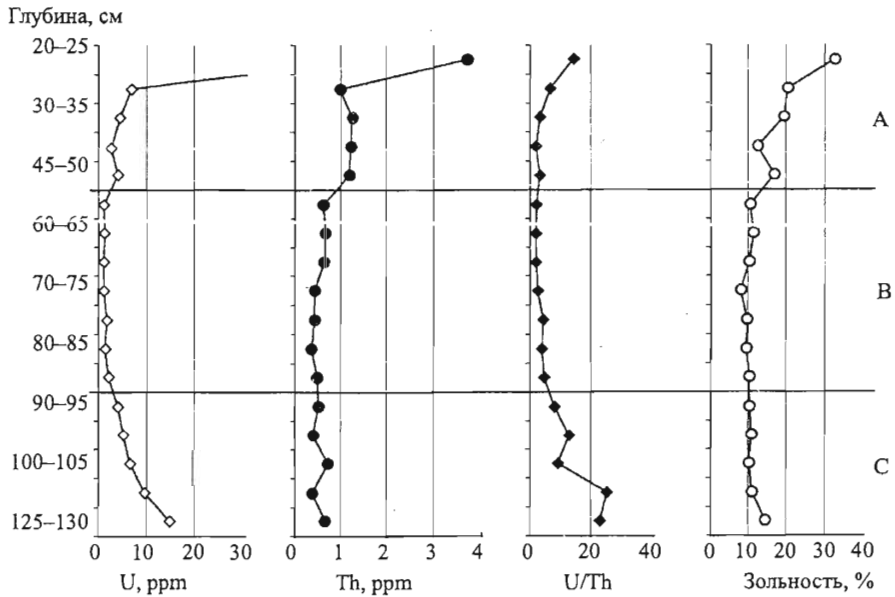


Рис. 4. Распределение содержаний ^{238}U , ^{232}Th , отношения $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ и зольности в вертикальном профиле разреза «Микулино».

обоих радиоэлементов — U и Th. На основании этих данных, а также согласно приведенному выше описанию разреза, можно заключить, что слой торфа А содержит большие количества детритного (минерального происхождения) урана и тория, поступивших в органическую фазу в процессе выщелачивания проб при анализе образцов. Высокие значения отношений U/Th,

анализа образцов торфа

^{230}Th , dpm	^{232}Th , dpm	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	Возраст, лет	Слой
4,15 ± 0,05	0,92 ± 0,01	1,06 ± 0,01	0,10 ± 0,01	4,51 ± 0,07	11 100 ± 500	А
1,78 ± 0,03	0,25 ± 0,01	1,07 ± 0,02	0,31 ± 0,01	6,96 ± 0,29	40 700 ± 2200	
1,61 ± 0,07	0,32 ± 0,03	1,06 ± 0,04	0,46 ± 0,03	5,01 ± 0,45	67 300 ± 6200	
1,16 ± 0,02	0,31 ± 0,01	1,02 ± 0,02	0,56 ± 0,02	3,72 ± 0,13	89 900 ± 4600	
1,32 ± 0,03	0,31 ± 0,01	1,06 ± 0,02	0,43 ± 0,02	4,31 ± 0,16	60 000 ± 3300	
0,61 ± 0,02	0,16 ± 0,01	1,05 ± 0,02	0,57 ± 0,02	3,91 ± 0,27	91 800 ± 5200	В
0,66 ± 0,02	0,17 ± 0,01	1,14 ± 0,05	0,56 ± 0,02	3,90 ± 0,26	89 000 ± 6200	
0,65 ± 0,02	0,16 ± 0,01	0,94 ± 0,04	0,73 ± 0,03	4,25 ± 0,39	143 000 ± 16 000	
0,45 ± 0,01	0,11 ± 0,01	1,01 ± 0,05	0,57 ± 0,03	4,05 ± 0,38	90 300 ± 7400	
0,90 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,01 ± 0,04	0,63 ± 0,03	8,31 ± 0,82	108 000 ± 9200	
0,69 ± 0,01	0,09 ± 0,01	1,07 ± 0,03	0,61 ± 0,02	7,64 ± 0,76	102 000 ± 6300	
0,96 ± 0,01	0,12 ± 0,01	1,01 ± 0,02	0,58 ± 0,02	8,03 ± 0,66	94 900 ± 4900	
1,43 ± 0,03	0,13 ± 0,01	1,01 ± 0,02	0,47 ± 0,02	11,22 ± 0,89	67 900 ± 3500	С
1,89 ± 0,03	0,10 ± 0,01	1,04 ± 0,03	0,48 ± 0,02	18,68 ± 1,68	70 500 ± 3800	
2,39 ± 0,05	0,18 ± 0,01	0,94 ± 0,02	0,54 ± 0,02	13,51 ± 0,80	83 100 ± 5600	
3,09 ± 0,04	0,09 ± 0,01	0,99 ± 0,02	0,45 ± 0,01	32,17 ± 3,23	65 000 ± 2800	
4,87 ± 0,10	0,16 ± 0,01	1,00 ± 0,01	0,45 ± 0,02	30,25 ± 1,97	65 100 ± 3400	

dpm — распады/мин·г.

достигающие 15,08, свидетельствуют, кроме того, о дополнительной поставке урана в составе грунтовых вод в слои торфа уже после их формирования и фиксации этого радионуклида органической составляющей образцов. Это связано, по-видимому, с тем, что верхние горизонты разреза располагались в относительной близости от грунтовых вод. Таким образом, можно заключить, что все горизонты из слоя А являются зоной открытой геохимической системы по отношению к урану.

Слой В. Здесь отчетливо прослеживается близость вертикального распределения зольности, отношений U/Th , концентраций урана и тория между собой. Кроме того, значения этих показателей во всех горизонтах практически постоянны и являются наименьшими для разреза в целом. Полученные нами результаты позволяют рассматривать внутреннюю (центральную) часть отложений торфа как закрытую геохимическую систему по отношению к U и Th . Однако обращает на себя внимание величина отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в слое 70–75 см, которая существенно меньше равновесного значения 1,0. Это может свидетельствовать о преимущественном выщелачивании ^{234}U по отношению к материнскому ^{238}U , так как он является атомом отдачи согласно «эффекту Чердынцева» [16]. С данных позиций такой слой торфа нельзя считать геохимической закрытой системой по отношению к урану. Потому только 6 образцов из слоя В можно признать пригодными для их датирования уран-ториевым методом.

Слой С. В нем содержание тория и значения зольности такие же, как в слое В. При этом распределение тория и зольности близки между собой и практически постоянны по глубине. Это может свидетельствовать об отсутствии значительного количества минерального детрита в нижней части разреза. Однако существенное повышение как концентрации урана (до 14,86 ppm), так и отношения U/Th (до 25,21) является, по-видимому, результатом дополнительной поставки урана в горизонты торфа уже после их формирования. Таким образом, слой С (располагающийся в достаточной близости от грунтовых вод, что подтверждается описанием разреза) можно рассматривать как открытую геохимическую систему в отношении урана.

Тщательное радиохимическое изучение отложений погребенного торфа из разреза «Микулино» показало, что слои А и С служат своеобразными фильтрами (или геохимическими барьерами), препятствующими обогащению ураном (и в некоторой степени торием в составе мельчайшего минерального детрита) внутренних горизонтов торфа (слой В) уже после их образования. Поэтому 6 центральных образцов из слоя В, которые ведут себя подобно закрытым геохимическими системам, могут быть использованы для их датирования уран-ториевым методом.

Датирование уран-ториевым методом. Результаты прямого датирования уран-ториевым методом органогенных отложений из разреза «Микулино» представлены в таблице. Из нее видно, что верхние и нижние части разреза содержат повышенные по сравнению со слоем В значения отношений U/Th . Это приводит к омоложению возраста образцов (исключая образец ЛУ-4225 с датировкой около 90 тыс. лет). Датирование образцов из центральной части разреза дает возраст в пределах 89–143 тыс. лет. Однако в таких образцах (в их органической фазе) присутствуют, как видно из рис. 4 и таблицы, незначительные количества ^{232}Th . Известно, что при растворении образцов торфа в процессе анализа из глинистой составляющей (детрита) в выщелат могут переходить некоторые количества ^{230}Th , ^{232}Th , ^{238}U , ^{234}U , что вызывает искажение значений отношений $^{230}Th/^{234}U$ и $^{234}U/^{238}U$ в датированной органической фракции проб. Факт привноса детритных урана и тория устанавливается по присутствию ^{232}Th в органогенной фазе образца, поскольку этот долгоживущий изотоп тория (родоначальник ториевого радиоактивного ряда) может находиться в отложениях торфа только в составе минерального детрита. Таким образом, чтобы получить истинный возраст отложений погребенного торфа, необходимо знать величину $^{230}Th/^{234}U$ (на сегодняшний день) в датированной органической фракции.

Коррекция полученных значений $^{230}Th/^{234}U$ и $^{234}U/^{238}U$ по методу изохрон. Поскольку не существуют химические и физические методики полного разделения органической и минеральной составляющих торфа, используется математическая коррекция прямых уран-ториевых датировок с применением метода изохрон [4, 15]. Суть этого метода заключается в том, что при растворении разновозрастных (в пределах ошибки) проб торфа изотопы урана и тория поступают в выщелат в одних и тех же соотношениях (при одинаковых условиях проведения эксперимента). Тогда полученные значения изотопных отношений сформируют прямую линию на графиках $^{234}U/^{232}Th - ^{238}U/^{232}Th$ и $^{230}Th/^{232}Th - ^{234}U/^{232}Th$ (см. рис. 4). Углы наклона построенных таким образом изохрон соответствуют скорректированным на детритный привнос значениям отношений $^{234}U/^{238}U$ и $^{230}Th/^{234}U$, которые и используются в дальнейшем при расчете истинного абсолютного возраста исследованных погребенных торфов по формуле

$$\frac{^{230}Th}{^{234}U} = \frac{^{238}U}{^{234}U} (1 - e^{-\lambda_0 t}) \left[\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda_4} \right) \left(1 - \frac{^{238}U}{^{234}U} \right) (1 - e^{(\lambda_4 - \lambda_0)t}) \right],$$

где λ_0 и λ_4 — постоянные радиоактивного распада ^{230}Th и ^{234}U ; $^{230}Th/^{234}U$ и $^{238}U/^{234}U$ — отношения активностей, рассчитанные по методу изохрон; t — возраст образца [4, 15].

Рассчитанный таким образом (с использованием 6 образцов из центральной части) скорректированный возраст внутренних горизонтов разреза «Микулино» (слой В) дает значение $113\,000 \pm 11\,000$ лет (рис. 5). Полученная абсолютная датировка микулинских отложений торфа (в пределах ошибки метода) вполне соответствует временным границам (порядка 115–130 тыс. лет [5–7]) изотопно-кислородной стадии океанических осад-

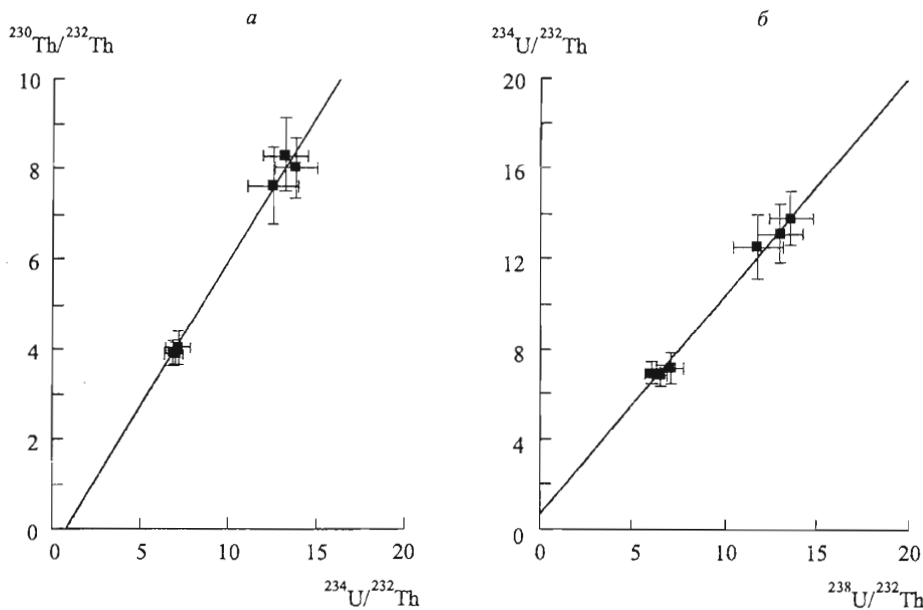


Рис. 5. Графики изохрон для внутренней части разреза «Микулино» (рассчитанный абсолютный возраст — $113\,000 \pm 11\,000$ лет).

$$a - y = 0,6478x - 0,5632, R^2 = 0,9893; \quad б - y = 0,9789x + 0,6186, R^2 = 0,9914.$$

ков 5е и согласуется с данными спорово-пыльцевого анализа, позволившими отнести исследованные органогенные осадки ко второй половине последнего межледникового.

Контрольное радиоуглеродное датирование одного образца (слой 25–40 см) показало возраст более 50 тыс. лет.

Аналогичные геохронологические исследования микулинских органогенных отложений из парастратотипического разреза «Нижняя Боярщина» (Смоленская обл.) на территории Русской равнины подтвердили возможность получения достоверных уран-ториевых датировок древних межледниковых осадков. Скорректированное значение абсолютного возраста внутренних слоев этого разреза также укладывается в рамки изотопно-кислородной стадии 5е и составляет $119\,500 \pm 11\,000$ лет.

До последнего времени не был решен вопрос об абсолютном возрасте погребенного торфа из разреза «Филевский парк», расположенного в г. Москве. Эти спорные в хроностратиграфическом отношении осадки исследователи относят как к микулинскому (изотопно-кислородная стадия 5), так и к одинцовскому (стадия 7, приблизительно 180–240 тыс. лет) времени. Применение уран-ториевого метода (в сочетании с палинологическим анализом) позволило получить скорректированное значение возраста внутренней части этого разреза — 89 ± 11 тыс. лет и установить принадлежность погребенного торфа из разреза «Филевский парк» микулинскому межледниковью [25].

Заключение. Проведены исследования, направленные на изучение и проработку основ (предпосылок) уран-ториевого метода датирования погребенных торфов. Особенности геохимического поведения урана и тория детально изучались на примере органогенных отложений из стратотипического разреза «Микулино» (Смоленская обл., пос. Микулино). Полученные результаты комплексных геохронологических исследований позволили сделать ряд выводов:

1) установлено, что верхние и нижние части разреза служат своеобразными геохимическими барьерами для изотопов урана и тория, тогда как внутренние слои отло-

жений можно рассматривать как геохимическую закрытую систему по отношению к этим радионуклидам; это дало возможность использовать уран-ториевый метод ядерной геохронологии для датирования центральной части разреза;

2) применение математической модели по методу изохрон позволило учесть внесенные количества детритного урана и тория и скорректировать полученные прямые датировки. Вычисленный таким образом абсолютный возраст внутренней части разреза «Микулино» составил 113000 ± 11000 лет и соответствует временным рамкам изотопно-кислородной стадии 5e;

3) результаты спорово-пыльцевого анализа осадков относят их ко второй половине микулинского межледникового, хорошо согласуются с данными предыдущих палинологических исследований отложений разреза «Микулино» и подтверждают полученное значение их абсолютного возраста.

Достоверные уран-ториевые датировки микулинских органогенных отложений открывают широкие перспективы использования этого метода ядерной геохронологии (в сочетании с термолюминесцентным, оптико-люминесцентным, палеоботаническими и палеофаунистическими анализами) для внесения ясности в проблему хроностратиграфии верхнего и среднего плейстоцена (вплоть до возрастных границ метода — 300–350 тыс. лет) на территории России. Тем самым появляются возможности для: 1) идентификации спорных в хроностратиграфическом отношении органогенных отложений и отнесения их к тому или иному межледниковью / межстадиалу; 2) установления хронологии формирования осадков в межледниковое время благодаря более детальному радиохимическому анализу мощных органогенных толщ (более 1 м) и выделению горизонтов в профиле разреза, отвечающим условиям закрытой геохимической системы; это позволит получить ряд последовательных скорректированных значений абсолютного возраста для внутренней части изучаемого профиля и продатировать слои торфа, относящиеся ко времени, близкому к началу и завершению того или иного межледникового/межстадиала, а также рассчитать возраст соответствующих оптимумов; 3) внесения существенного вклада в обоснование хроностратиграфии верхнего и среднего плейстоцена на территории России.

Summary

Kuznetsov V. Yu., Arslanov Kh. A., Kozlov V. B., Maksimov F. E., Savelyeva L. A., Chernov S. B., Baranova N. G. Perspectives of applying of U-Th method of disequilibrium geochronology for dating of interglacial terrestrial deposits.

A detailed radiochemical investigation of interglacial peat from the stratotypical "Mikulino" section (Smolensk province) was carried out. The geochemical behavior of U and Th isotopes in the samples were studied and prerequisites for using uranium-thorium method for dating of terrestrial organogenous deposits, whose age is beyond the scope of the radiocarbon dating method, were worked out. Determination of uranium and thorium contents was made in each 5-cm layer of peat with total thickness of 110 cm. It was found out that only 6 inner sections layers were closed geochemical systems with regard to U and Th and could be used for the uranium-thorium dating. This allowed us to estimate their direct absolute ages in the range from 89 ka to 108 ka. Applying of isochron method enabled additional contents of detrital U and Th to be taken into account as involved in the organic sample fractions during the radiochemical analysis. The age of the central section part corrected in this way yielded the dating of 113 ± 11 ka. A detailed palynological analysis of each 10-cm peat layer of the section was carried out. Spore pollen diagram was built and showed 4 pollen zones (M5–M8) in accordance with the adopted subdivision scheme of the Last Interglacial. The dated inner section layer corresponds to palynozones M6–M7. The results of a similarly comprehensive investigation of organogenous deposits from the parastratotypical section "Nizhnyaya Boyarshchina" (Smolensk province) and the section "Fili Park" (Moscow City) are also

given. The corrected ages of the inner section layers were $119,5 \pm 11,0$ ka and 89 ± 11 ka, respectively.

The perspectives of applying of $^{230}\text{Th}/\text{U}$ dating method for organogenous terrestrial deposits as old 300–350 ka were discussed.

Литература

1. Хотинский Н.А. Радиоуглеродная хронология и корреляция природных и антропогенных рубежей голоцена // Новые данные по геохронологии четвертичного периода / Под ред. Я.-М. К. Пунинга. М., 1987. 2. Arslanov Kh. A. Late Pleistocene geochronology of European Russia // Radiocarbon. 1992. Vol. 35, N 3. 3. Кузнецов Ю.В. Радиохронология океана. М., 1976. 4. Ivanovich M., Harmon R.S. (eds). Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine and environmental sciences. 2nd Edn. Oxford, 1992. 5. Morley J.J., Hays J.D. Towards a high-resolution global deep-sea chronology for the last 750000 years // Earth and Planet. Sci. Lett. 1981. Vol. 53, N 3. 6. Shackleton N.J., Opdyke N.D. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific Core V29-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 year scale // Quater. Res. 1973. Vol. 3, N 1. 7. Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D. et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy // Quater. Res. 1987. Vol. 27, N 1. 8. Арсланов Х.А., Бараш М.С., Кузнецов В.Ю. О геохронологии среднего и верхнего плейстоцена по данным изучения осадков Северной Атлантики // Океанология. 1988. Т. XXVIII, вып. 4. 9. Kuznetsov V.Yu., Arslanov Kh.A., Shilov V.V. et al. ^{230}Th -excess and ^{14}C dating of pelagic sediments from the hydrothermal zone of the North Atlantic // Geochronometria. 2002. Vol. 21. 10. Арсланов Х.А., Тертычный Н.И., Герасимова С.А., Локишин Н.В. К вопросу о датировании морских раковин моллюсков по отношению $\text{Th}^{230}/\text{U}^{234}$ // Геохимия. 1976. № 11. 11. Arslanov Kh.A., Ter-tychny N.I., Kuznetsov V.Yu. et al. Dating of Caspian, Barents, White and Black sea coast shell molluscs by uranium/uranium method // Geochronometria. 2001. Vol. 21. 12. Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Eustatic sea-level and climate changes over the last 600 ka as derived from mollusc-based ESR-chronostratigraphy and pollen evidence in Northern Eurasia // Sedimentary Geology. 2002. Vol. 150. 13. Болиховская Н.С., Молодьков А.Н. К корреляции континентальных и морских четвертичных отложений Северной Евразии по палинологическим данным и результатам ЭПР датирования // Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия / Под ред. Н. С. Болиховской, Л. В. Ровнина. М., 1999. 14. Vogel J., Kronfeld J. A new method for dating peat // South. Africa Sci. 1980. Vol. 76. 15. Heijnis H. Uranium/thorium dating of Late Pleistocene peat deposits in N.W. Europe. Groningen, 1995. 16. Чердынцев В.В. Уран-234. М., 1968. 17. Szalay A. Accumulation of uranium and other micrometals in coal and organic shales and the role of humic acids in these geochemical enrichments // Ark. Mineral. Geol. 1969. Vol. 5. 18. Halbach P., Von Borstel D., Gunderman K.-D. The uptake of uranium by organic substances in a peat bog environment on a granite // Chem. Geol. 1980. Vol. 29. 19. Borovec Z., Kribek B., Tolar V. Sorption of uranyl by humic acids // Chem. Geol. 1979. Vol. 27. 20. Van der Wijk A., El-Daoushy F., Arends A.R., Mook W.G. Dating peat with U/Th disequilibrium: Some geochemical considerations // Chem. Geology (Isotope Geoscience Section). 1986. Vol. 59. 21. Санько А.Ф. Неоплейстоцен северо-восточной Белоруссии и смежных районов РСФСР. Минск, 1987. 22. Кузнецов В.Ю., Арсланов Х.А., Шилов В.В. и др. Распределение урана и тория в металлоносных осадках гидротермальной зоны Северной Атлантики // Радиохимия. 2000. № 6. 23. Arslanov Kh.A., Saveljeva L.A., Gey V.A. et al. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of Northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene // Radiocarbon. 1999. Vol. 41, N 1. 24. Гривчук В.П. Ископаемые флоры как палеонтологическая основа стратиграфии четвертичных отложений // Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений Северо-Запада Русской равнины / Под ред. К. К. Маркова. М., 1961. 25. Kuznetsov V.Yu., Arslanov Kh.A., Alekseev M.N. et al. New age data of buried peat deposits from the site «Fili Park» (Moscow, Russia) by the uranium-thorium dating and palynological analysis and its stratigraphic significance // Geochronometria. 2002. Vol. 21.

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2002 г.