

УДК 551.89+550.93

НОВЫЙ ПОДХОД К ГЕОХРОНОЛОГИИ МЕЖЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РУССКОЙ РАВНИНЫ НА ОСНОВЕ УРАН-ТОРИЕВОГО МЕТОДА ДАТИРОВАНИЯ ПОГРЕБЕННОГО ТОРФА

© 2003 г. В. Ю. Кузнецов, Ф. Е. Максимов

Представлено академиком А.П. Лисицыным 09.04.2003 г.

Поступило 25.04.2003 г.

Хроностратиграфия голоценовых и позднелейстоценовых отложений на континенте базируется на широком применении радиоуглеродного метода определения абсолютного возраста органических формаций (торф, гиттия, сапрпель). На основе этого метода 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 термолюминесцентного (ТЛ) метода. Однако, как известно, данные ТЛ-датирования не всегда можно рассматривать как окончательные, так как они зачастую не совпадают с результатами других стратиграфических методов изучения плейстоценовых континентальных осадков. Поэтому вопрос об абсолютной геохронологии верхне- и среднелейстоценовых формаций на континенте до сих пор 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. В последнее время один из этих методов – уран-ториевый ($^{230}\text{Th}/\text{U}$) – находит применение за рубежом также для определения возраста континентальных органических отложений (погребенный торф), возраст которых достигает 300–350 тыс. лет [3]. В отложениях погребенного торфа, как и в морских раковинах моллюсков, наблюдается нарушение радиоактив-

ного равновесия в урановом ряду. При этом со временем из материнского урана, находящегося в органической фракции пробы в значительных количествах ($10\text{--}100 \cdot 10^{-6}$ г/г), накапливается дочерний ^{230}Th , а величина отношения $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ является мерой возраста образца.

Первые результаты применения уран-ториевого датирования погребенных торфов опубликованы в 1980 г. [4]. В дальнейшем ряд исследователей проводили изучение геохимического поведения изотопов урана и тория в отложениях погребенного торфа, разрабатывали основы $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования этих формаций [5, 6].

Первые исследования в этом направлении в России начаты нами несколько лет назад в целях изучения возможностей и ограничений использования уран-ториевого метода для датирования верхне- и среднелейстоценовых континентальных осадков. В качестве объектов исследования были выбраны разрезы межледниковых органических (торф, гиттия) отложений на территории Русской равнины: стратотипический и парастратотипический разрезы осадков микулинского времени из обнажений “Микулино” и “Нижняя Боярщина” (оба расположены в Смоленской области) и спорный в хроностратиграфическом отношении разрез “Филевский парк” в г. Москве (детальное стратиграфическое описание разрезов приведено в [7–9]).

Известно, что возрастныe границы микулинского межледниковья (разрезы “Микулино” и “Нижняя Боярщина”) коррелируют с изотопнокислородной стадией океанических осадков 5e, протяженность которой установлена в пределах ~115–130 тыс. лет [10], или, по мнению ряда исследователей [11, 12], соответствуют всей стадии 5 (~74–130 тыс. лет). До последнего времени не решен вопрос об абсолютном возрасте погребенного торфа из разреза “Филевский парк”. Эти спорные в хроностратиграфическом отношении осадки исследователи относят как к микулинскому, так и к одинцовскому времени (стадия 7,

*Научно-исследовательский институт географии
Санкт-Петербургского государственного
университета*

~180–240 тыс. лет). Таким образом, основными целями проведенной нами работы являлись:

1) детальное изучение геохимического поведения изотопов урана и тория в вертикальном профиле органогенных осадков из разрезов “Микулино”, “Нижняя Боярщина” и “Филевский парк” для проработки основных предпосылок, а также возможностей и ограничений уран-ториевого метода датирования этих формаций;

2) детальное палинологическое исследование этих отложений для их биостратиграфической идентификации;

3) получение первых в России значений абсолютного возраста межледниковых органогенных осадков Русской равнины, возраст которых превышает пределы радиоуглеродного датирования (50–55 тыс. лет).

В настоящей работе приводятся первые результаты проведенных исследований и рассматриваются перспективы применения уран-ториевого метода в решении проблемы хроностратиграфии верхне- и среднеледниковых межледниковых континентальных осадков.

В 1998 г. нами отобраны пробы из указанных выше разрезов. Для проведения радиохимического и палинологического анализов осадков пробы отбирались в каждом 5–10-сантиметровом слое по всей мощности органогенных отложений. Выделение изотопов урана и тория осуществлялось из органической фракции образцов торфа (гиттии) по разработанной нами аналитической методике [7, 8]. Суть этого метода заключается в следующем: озоление при 600°C доведенных до постоянной массы навесок образцов (10–15 г); растворение органической фазы 7 N азотной кислотой (минеральный остаток отбрасывается); хроматографическое разделение и очистка урана и тория от примесей; электроосаждение радионуклидов на платиновые диски и альфа-спектрометрическое измерение активностей выделенных изотопов ^{232}Th , ^{230}Th , ^{234}U и ^{238}U на анализаторе импульсов АИ-1024. Предварительная обработка и подготовка образцов для спорово-пыльцевого анализа производились по стандартной методике [13]. При построении спорово-пыльцевой диаграммы за 100% принята сумма пыльцы древесной и травянистой растительности, исключая водные растения и споры.

В процессе исследований были тщательно проработаны основные предпосылки практического использования уран-ториевого датирования органогенных отложений [3, 6]:

1) датированный образец должен представлять собой закрытую геохимическую систему по отношению к изотопам урана и тория;

2) не должно быть детритных урана и тория в датированной органической фракции торфа в на-

чальный момент времени его образования; если же в датированной фракции образца присутствуют незначительные количества этих радионуклидов, то необходима коррекция на детритные (привнесенные из минеральной фазы пробы) уран и торий.

Результаты радиохимического анализа отложений, представленные в табл. 1, мы приводим на примере детального изучения погребенного торфа из разреза “Микулино” [7, 8]. Известно, что изотопы урана и тория входят в состав как органической, так и минеральной составляющей торфа. Поэтому при выщелачивании проб азотной кислотой в ходе анализа в раствор полностью переходят U и Th органического происхождения и какая-то их часть из минеральной фазы. Как видно из табл. 1, увеличение зольности торфа (или, иначе, степени его минерализованности) в слое А приводит к росту концентрации этих радионуклидов в выщелатах. Однако повышение (по сравнению со слоем В) величины отношения U/Th в слое А свидетельствует о дополнительном приносе урана в составе грунтовых вод в верхние горизонты отложений уже после их формирования, где этот нуклид и фиксируется органической фракцией торфа. Подобная картина наблюдается и в слое С, в котором отчетливо заметна дополнительная поставка урана и повышение величины отношения U/Th (в сравнении со слоем В) при практически постоянном для этого слоя значении зольности. С этих позиций оба слоя А и С можно рассматривать как геохимические открытые системы по отношению к урану, что противоречит предпосылкам применения уран-ториевого метода. В слое В, в отличие от верхних и нижних горизонтов торфа, концентрации U и Th, значения отношения U/Th и зольности практически постоянные по всей его мощности и наименьшие для всего разреза. Иными словами, эти внутренние горизонты вполне соответствуют условиям геохимической закрытой системы для изотопов урана. Исключение составляет слой 70–75 см, в котором величина отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ существенно меньше равновесного значения 1.0. Это может свидетельствовать о возможном преимущественном выведении грунтовыми водами ^{234}U из образца во время его формирования, что связано с большей подвижностью этого изотопа (в сравнении с материнским ^{238}U), являющегося “атомом отдачи” (согласно “эффекта Чердынцева” [14]). С этих позиций горизонт 70–75 см нельзя рассматривать как геохимическую закрытую систему по отношению к урану. Поэтому только 6 образцов из слоя В можно считать пригодными для их датирования уран-ториевым методом.

Определение абсолютного возраста образцов из центральной части разреза дает прямые датировки в пределах 89–143 тыс. лет (табл. 1). Однако известно, что в процессе растворения проб

Таблица 1. Результаты радиохимического анализа образцов торфа (ppm – $n \times 10^{-6}$ г/г, dpm – распады/мин · г)

№ обр.	Глубина, см	Зольность, %	U, ppm	Th, ppm	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$	Слой
LU-4222	20–25	33.44	56.4 ± 2.4	3.74 ± 0.04	15.08 ± 0.65	А
LU-4306	30–35	20.85	7.36 ± 0.26	1.04 ± 0.04	7.08 ± 0.38	
LU-4301	35–40	19.79	4.86 ± 0.29	1.30 ± 0.10	3.74 ± 0.37	
LU-4225	45–50	12.71	2.92 ± 0.15	1.26 ± 0.04	2.32 ± 0.14	
LU-4311	55–60	17.03	4.31 ± 0.15	1.24 ± 0.04	3.48 ± 0.16	
LU-4302	60–65	10.58	1.42 ± 0.11	0.65 ± 0.04	2.18 ± 0.22	В
LU-4310	65–70	11.20	1.44 ± 0.12	0.69 ± 0.04	2.09 ± 0.21	
LU-4304	70–75	10.25	1.29 ± 0.10	0.65 ± 0.04	1.98 ± 0.20	
LU-4226	75–80	8.09	1.08 ± 0.11	0.45 ± 0.04	2.40 ± 0.32	
LU-4308	80–85	9.50	1.94 ± 0.14	0.45 ± 0.04	4.30 ± 0.49	
LU-4305	85–90	9.33	1.47 ± 0.13	0.37 ± 0.04	3.97 ± 0.53	
LU-4232	90–95	10.16	$2.26 \pm 0/14$	0.49 ± 0.04	4.61 ± 0.48	С
LU-4309	95–100	10.05	4.17 ± 0.14	0.52 ± 0.04	8.02 ± 0.67	
LU-4227	100–105	10.48	5.28 ± 0.14	0.41 ± 0.04	12.88 ± 1.20	
LU-4307	105–110	9.83	6.67 ± 0.27	0.72 ± 0.04	9.26 ± 0.65	
LU-4303	110–115	10.43	9.58 ± 0.29	$0.38 \pm 0/04$	25.21 ± 2.62	
LU-4228	125–130	14.15	14.9 ± 0.6	0.65 ± 0.04	22.88 ± 1.66	

Глубина, см	^{238}U , dpm	^{234}U , dpm	^{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
20–25	40.6 ± 1.7	42.8 ± 1.8	4.15 ± 0.05	0.92 ± 0.01	1.06 ± 0.01	0.10 ± 0.01	4.51 ± 0.07	$11\,100 \pm 500$	А
30–35	5.3 ± 0.2	5.7 ± 0.2	1.78 ± 0.03	0.25 ± 0.01	1.07 ± 0.02	0.31 ± 0.01	6.96 ± 0.29	$40\,700 \pm 2200$	
35–40	3.3 ± 0.2	3.5 ± 0.2	1.61 ± 0.07	0.32 ± 0.03	1.06 ± 0.04	0.46 ± 0.03	5.01 ± 0.45	$67\,300 \pm 6200$	
45–50	2.0 ± 0.1	2.1 ± 0.1	1.16 ± 0.02	0.31 ± 0.01	1.02 ± 0.02	0.56 ± 0.02	3.72 ± 0.13	$89\,900 \pm 4600$	
55–60	2.9 ± 0.1	3.1 ± 0.1	1.32 ± 0.03	0.31 ± 0.01	1.06 ± 0.02	0.43 ± 0.02	4.31 ± 0.16	$60\,000 \pm 3300$	
60–65	1.0 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.61 ± 0.02	0.16 ± 0.01	1.05 ± 0.02	0.57 ± 0.02	3.91 ± 0.27	$91\,800 \pm 5200$	В
65–70	1.0 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.66 ± 0.02	0.17 ± 0.01	1.14 ± 0.05	0.56 ± 0.02	3.90 ± 0.26	$89\,000 \pm 6200$	
70–75	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.65 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.94 ± 0.04	0.73 ± 0.03	4.25 ± 0.39	$143\,000 \pm 16\,000$	
75–80	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.45 ± 0.01	0.11 ± 0.01	1.01 ± 0.05	0.57 ± 0.03	4.05 ± 0.38	$90\,300 \pm 7400$	
80–85	1.4 ± 0.1	1.4 ± 0.1	0.90 ± 0.03	0.11 ± 0.01	1.01 ± 0.04	0.63 ± 0.03	8.31 ± 0.82	$108\,000 \pm 9200$	
85–90	1.1 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.69 ± 0.01	0.09 ± 0.01	1.07 ± 0.03	0.61 ± 0.02	7.64 ± 0.76	$102\,000 \pm 6300$	
90–95	1.6 ± 0.1	1.7 ± 0.1	0.96 ± 0.01	0.12 ± 0.01	1.01 ± 0.02	0.58 ± 0.02	8.03 ± 0.66	$94\,900 \pm 4900$	С
95–100	3.0 ± 0.1	3.1 ± 0.1	1.43 ± 0.03	0.13 ± 0.01	1.01 ± 0.02	0.47 ± 0.02	11.22 ± 0.89	$67\,900 \pm 3500$	
100–105	3.8 ± 0.1	4.0 ± 0.1	1.89 ± 0.03	0.10 ± 0.01	1.04 ± 0.03	0.48 ± 0.02	18.68 ± 1.68	$70\,500 \pm 3800$	
105–110	4.8 ± 0.2	4.5 ± 0.2	2.39 ± 0.05	0.18 ± 0.01	0.94 ± 0.02	0.54 ± 0.02	13.51 ± 0.80	$83\,100 \pm 5600$	
110–115	6.9 ± 0.2	6.9 ± 0.2	3.09 ± 0.04	0.09 ± 0.01	0.99 ± 0.02	0.45 ± 0.01	32.17 ± 3.23	$65\,000 \pm 2800$	
125–130	10.7 ± 0.4	10.7 ± 0.4	4.87 ± 0.10	0.16 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.45 ± 0.02	30.25 ± 1.97	$65\,100 \pm 3400$	

торфа в ходе анализа из глинистой составляющей (детрита) в выщелат переходят некоторые количества ^{230}Th , ^{232}Th , ^{238}U , ^{234}U , что приводит к искажению значений отношений $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в датируемой органической фракции проб. Поэтому полученные прямые датировки нельзя рассматривать как истинные значения возраста этих горизонтов. Факт привноса детритных урана и то-

рия устанавливается по присутствию ^{232}Th в органической фазе образца (см. табл. 1), 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 современные значения

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в датируемой органической фракции. В этих целях используется математическая коррекция прямых уран-ториевых датировок с применением метода изохрон [3, 6]. Суть этого метода заключается в том, что при растворении одновозрастных (в пределах ошибки) проб торфа изотопы урана и тория (из минеральной фракции) поступают в выщелат в одних и тех же соотношениях (при одинаковых условиях проведения эксперимента). Тогда полученные значения изотопных отношений сформируют прямую линию на графиках $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th} - ^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ и $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} - ^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (рис. 1). Углы наклона построенных таким образом изохрон соответствуют скорректированным на детритный привнос значениям отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, которые и используются в дальнейшем при расчете истинного абсолютного возраста исследованных погребенных торфов по формуле:

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

где λ_0 и λ_4 – постоянные радиоактивного распада ^{230}Th и ^{234}U ; $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ и $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$ – отношения активностей (на сегодняшний день), рассчитанные по методу изохрон; t – возраст образца [3, 6].

Рассчитанный таким образом (с использованием 6 центральных образцов) скорректированный возраст внутренней части разреза “Микулино” (слой В) дает значение $113\,000 \pm 11\,000$ лет (рис. 1). Эта датировка вполне соответствует (в пределах ошибки метода) временным границам ~115–130 тыс. лет [10] изотопно-кислородной стадии океанических осадков 5е. Она же согласуется с полученными нами данными спорово-пыльцевого анализа, соответствующими принятой в настоящее время схеме деления микулинского межледниковья [15], с одной стороны, и позволившими отнести исследованные органогенные осадки ко второй его половине [7, 8], с другой.

Аналогичные геохронологические исследования микулинских органогенных отложений из парастратотипического разреза “Нижняя Боярщина” 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 [8].

Применение уран-ториевого метода (в сочетании с палинологическим анализом) позволило получить скорректированное значение возраста внутренней части спорного в хроностратиграфи-

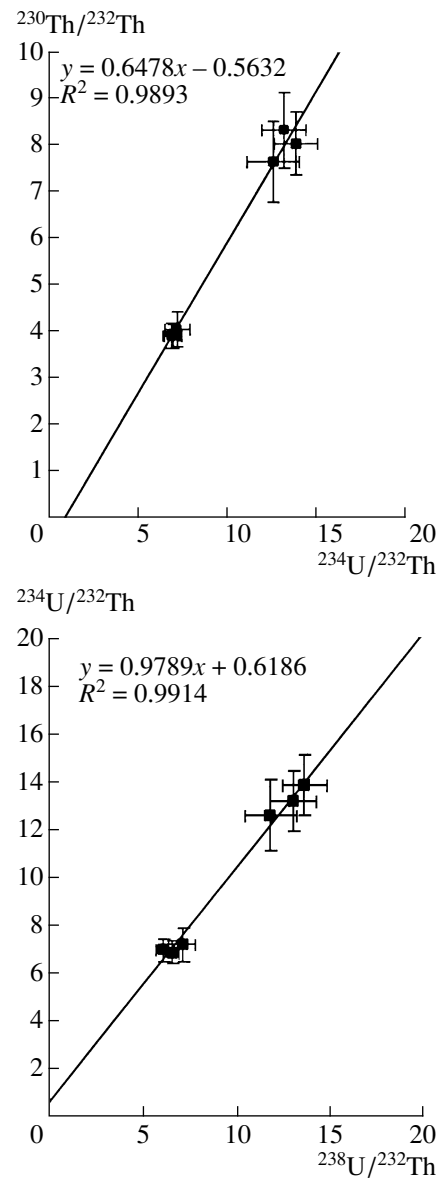


Рис. 1. Графики изохрон для внутренней части разреза “Микулино”; рассчитанный абсолютный возраст $113\,000 \pm 11\,000$ лет.

ческом отношении разреза “Филевский парк” – $89\,000 \pm 11\,000$ лет и установить принадлежность погребенного торфа из этих отложений к микулинскому межледниковью [7].

Полученные нами достоверные уран-ториевые датировки органогенных отложений микулинского времени 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 Русской равнины (вплоть до возрастных границ метода – 300–350 тыс. лет). Тем самым появляются возмож-

ности: а) идентификации спорных в хроностратиграфическом отношении органогенных отложений и отнесения их к тому или иному межледниковью/межстадиалу; б) установления хронологии формирования осадков в межледниковое время с использованием более детального радиохимического анализа мощных органогенных толщ (более 1 м). Это позволит разделить внутреннюю часть разреза на ряд одновозрастных (в пределах ошибки метода) слоев, отвечающих условиям закрытой геохимической системы, и получить тем самым несколько последовательных скорректированных значений абсолютного возраста. Таким образом, могут быть продатированы слои торфа, относящиеся ко времени, близкому к началу и завершению того или иного межледниковья/межстадиала, а также установлены значения возраста соответствующих оптимумов. И наконец, в) внести существенный вклад в обоснование хроностратиграфии верхнего и среднего плейстоцена на территории России.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 01-05-64870) и INTAS (проект 01-0675).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хотинский Н.А. В сб.: Новые данные по геохронологии четвертичного периода. М.: Наука, 1987. С. 39–45.
2. Arslanov Kh.A. // Radiocarbon. 1992. V. 35. № 3. P. 421–427.
3. Uranium-Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences / M. Ivanovich, R.S. Harmon Eds. Oxford: Clarendon Press, 1992. 910 p.
4. Vogel J., Kronfeld J. // South. Afr. Sci. 1980. V. 76. P. 557–558.
5. Van der Wijk A., El-Daoushy F., Arends A.R., Mook W.G. // Chem. Geol. (Isotope Geosci. Sect.). 1986. V. 59. P. 283–292.
6. Heijnis H. Uranium/thorium dating of Late Pleistocene peat deposits in N.W. Europe. Groningen, 1995. 149 p.
7. Kuznetsov V.Yu., Arslanov Kh.A., Alekseev M.N. et al. // Geochronometria. 2002. V. 21. P. 41–48.
8. Кузнецов В.Ю., Арсланов Х.А., Козлов В.Б. и др. В сб.: Материалы III Всерос. совещ. по изучению четвертич. периода, 2–8 сентября 2002 г. Смоленск. Т. 1. С. 135–136.
9. Санько А.Ф. Неоплейстоцен северо-восточной Белоруссии и смежных районов РСФСР. Минск, 1987. 178 с.
10. Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D. et al. // Quatern. Res. 1987. V. 27. № 1. P. 1–30.
11. Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. // Sedimen. Geol. 2002. V. 150. P. 185–201.
12. Болиховская Н.С., Молодьков А.Н. В сб.: Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия. М., 1999. С. 25–53.
13. Arslanov Kh.A., Saveljeva L.A., Gey V.A. et al. // Radiocarbon. 1999. V. 41. № 1. P. 25–45.
14. Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1968. 308 с.
15. Гричук В.П. В кн.: Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений Северо-Запада Русской равнины. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 25–71.