

УДК 556.11:504.4.064

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
МЕТОДОМ АЛЬФА-СПЕКТРОСКОПИИ ^{210}Po** **Т.В. СЕМИЖОН, канд. биол. наук, доц. Н.В. ГОНЧАРОВА****(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова)****д-р физ. наук, проф. Э. КЛЕМТ****(Fachhochschule Ravensburg-Weingarten University of Applied Sciences)**

Путем исключения этапа добавления конкурирующих ионов и снижения температуры выделения радионуклида из образца модифицирован метод определения неравновесного ^{210}Pb в донных отложениях. Такой подход улучшает энергетическое разрешение и увеличивает суммарную эффективность данного метода, по сравнению с ^{210}Pb -методом. Проведена сравнительная оценка двух методов по скорости седиментации донных отложений реки Енисей. Показано, что оба метода хорошо согласуются при наибольшей эффективности ^{210}Pb -метода, что позволяет использовать его для датирования речных и озерных отложений, в отсутствие процессов постседиментационной миграции.

Введение. В связи с широким применением радионуклидов во всевозможных областях науки и техники все большее теоретическое и практическое значение приобретает изучение возможностей уже существующих и разработка новых методов датирования с использованием радиоактивных элементов естественного происхождения [1].

В настоящее время проблема определения возраста отдельных слоев донных отложений, например озёрных, а также хронологии поступления техногенных радионуклидов в донные отложения представляет большой интерес [2, 3]. Для решения этой задачи используется метод датирования возраста осадков по неравновесному ^{210}Pb . Метод основан на нарушении радиоактивного равновесия в ряду ^{238}U . Равновесие нарушается за счет эманации ^{222}Rn , который через ряд короткоживущих нуклидов превращается в атмосфере в ^{210}Pb и с глобальными выпадениями попадает в водоемы, тем самым накапливаясь в донных отложениях.

Вследствие поступления техногенных радионуклидов в речные донные отложения использование стандартного ^{210}Pb -метода датирования донных отложений невозможно. В частности, в донных отложениях реки Енисей присутствует радионуклид ^{152}Eu . Перекрывание гамма-линии свинца линией рентгеновского излучения европия затрудняет детектирование ^{210}Pb гамма-спектрометрическим методом.

Данная работа вносит вклад в развитие нового ^{210}Po -метода определения возраста речных и озерных донных отложений. Главной идеей этого метода является экстрагирование ^{210}Po из анализируемых проб донных отложений, после того как радиоактивное равновесие между ^{210}Pb и его дочерним радионуклидом ^{210}Po достигнуто. Дальнейшее определение радиоактивности неравновесного ^{210}Po происходит методом альфа-спектрометрии.

1. Методы исследования

В течение долгого времени ^{238}U очень медленно распадается до ^{234}U , за которым следуют такие промежуточные продукты распада, как $^{234\text{m}}\text{Th}$ и ^{226}Ra . В свою очередь ^{226}Ra обуславливает небольшую радиоактивность донных отложений и присутствует примерно в том же количестве, что и ^{238}U вследствие того, что между ними достигается радиоактивное равновесие. Таким образом, ^{226}Ra содержится во всех донных отложениях в малом и практически неизменном количестве.

Радиоактивный элемент ^{226}Ra распадается в свою очередь до инертного газа ^{222}Rn . Прежде чем произойдет распад ^{222}Rn до следующего радионуклида, возможно его эманация в атмосферу. Затем ^{222}Rn через ряд короткоживущих нуклидов превращается в атмосфере в ^{210}Pb , который затем с глобальными выпадениями попадает в водоемы и накапливается в донных отложениях (рис. 1).

Отсюда можно заключить, что ^{210}Pb присутствует в донных отложениях в двух формах: равновесной и неравновесной. Равновесная форма ^{210}Pb относится к той части, которая находится в радиоактивном равновесии со всеми предшествующими его радиоактивными элементами семейства ^{238}U . Таким образом, равновесный ^{210}Pb является продуктом распада ^{226}Ra , который был непосредственно вымыт в водную систему как часть разрушенного материала материнской породы.

Происхождение неравновесного ^{210}Pb связано с ^{222}Rn , который попадает из осадков в атмосферу, где и распадается до ^{210}Pb с последующим его связыванием с аэрозольными частицами и сухим осаждением либо выпадением вместе с осадками на поверхность донных отложений. Более того, неравновесный ^{210}Pb может непосредственно выпасть или осесть в более позднее время и в другом месте на донные отложения [4].

В обоих случаях активность неравновесного ^{210}Pb , осажденного и связанного с седиментами, является функцией его первоначального количества и периода полураспада. Таким образом, ^{210}Pb -метод позволяет датировать возраст кернов донных отложений посредством измерения активности неравновесного ^{210}Pb нижежащих слоев донных отложений, сравнивая их с активностью верхних слоев седиментов.

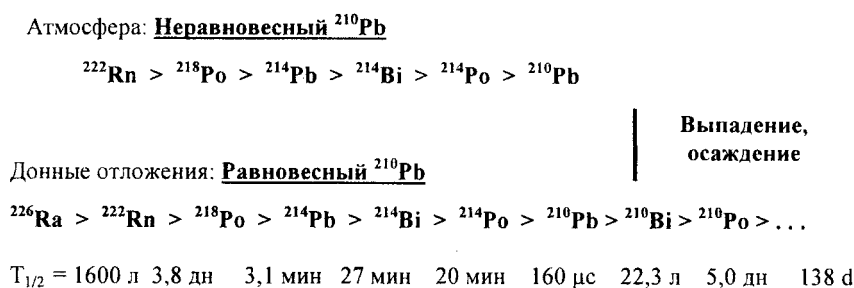


Рис. 1. Схема радиоактивного распада ^{222}Rn в атмосфере и ^{226}Ra в донных отложениях [4]

Существует два альтернативных метода определения активности неравновесного ^{210}Pb в исследуемых образцах седиментов: гамма- и альфа-спектрометрический методы.

1.1. Гамма-спектрометрия. Как показано на рис. 1, радиоактивные элементы, являющиеся промежуточными продуктами распада ^{222}Rn , эманированного в атмосферу, до ^{210}Pb , имеют короткие периоды полураспада (^{214}Pb имеет самый длинный период $T_{1/2} = 27 \text{ мин}$). Поэтому является очевидным, что в течение нескольких минут происходит множество радиоактивных распадов, в результате которых образуется ^{210}Pb , который затем осаждается на донных отложениях. Наиболее приемлемыми кандидатами являются ^{214}Bi и ^{214}Pb с их главными гамма-линиями 609,3 кэВ и 351,9 кэВ соответственно. По причине того, что ^{214}Bi испускает многократные каскадные гамма-лучи, совпадение отдельных пиков будет заметно в спектре (сумма индивидуальных гамма-энергий), что затем приведет к более низким амплитудам пиков [5]. Вследствие этого определение равновесного ^{210}Pb заключается в измерении активности ^{214}Pb в донных отложениях. Активность неравновесного ^{210}Pb рассчитывается путем вычитания равновесного ^{210}Pb из суммарной активности ^{210}Pb , определяемого по его характерной гамма-линии 46,5 кэВ.

С целью достижения радиоактивного равновесия между ^{222}Rn и ^{214}Pb образцы седиментов были однородно смешаны с парафином в соотношении 1:10, спрессованы в таблетки, завернуты в алюминиевую фольгу и хранились в течение 30 дней (что эквивалентно 5 периодам полураспада ^{222}Rn). В случае постоянного потока неравновесного ^{210}Pb в донные отложения и неизменной скорости седиментации в рассматриваемый промежуток времени неизменно наблюдается экспоненциальная зависимость активности ^{210}Pb от глубины.

1.2. Альфа спектроскопия. Радиоизотоп ^{210}Pb , осажженный на водную поверхность из атмосферы, в течение следующих нескольких месяцев адсорбируется на частицах донных отложений. Он распадается до ^{210}Bi ($T_{1/2} = 5 \text{ дней}$) и впоследствии до ^{210}Po ($T_m = 138 \text{ дней}$), который в конечном счете распадается до нерадиоактивной формы свинца. После периода пяти полураспадов ^{210}Pb (примерно 2 года) как ^{210}Po , так и ^{210}Pb находятся в радиоактивном равновесии.

Дочерний радионуклид ^{210}Pb испускает альфа-частицу с энергией 5304,4 кэВ. Этот распад может быть детектирован с помощью альфа-спектрометрии.

Донные отложения реки Енисей содержат ^{152}Eu , который испускает рентгеновские лучи 46,6 кэВ. Вследствие того, что активность ^{152}Eu достаточно высокая (около 100... 1000 Бк/кг), точное определение активности ^{210}Pb невозможно, потому что его гамма-линия перекрывается ^{152}Eu . Таким образом, было принято решение определять неравновесный ^{210}Pb с использованием альфа-спектроскопии ^{210}Po .

Пробоподготовка образца. Правильная подготовка образца является самым важным этапом для достижения качественных результатов в альфа-спектрометрии. Пробоподготовка заключается в превращении образца в химически выделенную тонкослойную форму (источник), которая может быть помещена в спектрометр и измерена с минимальными интерференцией пиков и потерями на самопоглощение [6, 7]. Превращение исходного образца в форму, удовлетворяющую требованиям альфа-спектрометрии, - длительный многоэтапный процесс.

Пробоподготовка для альфа-спектрометрии включает три основных этапа:

- предварительную обработку;
- химическое разделение;
- изготовление образца.

Предварительная обработка – гомогенизация и консервация образца, а также подготовка его к последующей химической обработке. Для образцов донных отложений типичная предварительная обработка состоит из сублимационной сушки и растирания в керамической ступке.

Стадия химического разделения начинается с операции добавления к образцу изотопного индикатора. С целью получения хороших статистических результатов измерения радиоактивности ^{210}Po и ^{208}Po к 10 г сухих седиментов добавляли 4 мл изотопного индикатора – трессера.

Активность трессера определяется исходя из уравнения радиоактивного распада:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где A_0 – активность радиоизотопного индикатора в начальный момент времени.

Так как все изотопы одного и того же элемента химически ведут себя одинаково, то доля метки, потерянной в химических процессах, равна доле потерянного образца (предполагается, что изотопная метка гомогенно смешана с образцом и находится в нем в состоянии химического равновесия). Это позволяет оценить полную эффективность (для процедур пробоподготовки и измерения образца) и определить активность неравновесного ^{210}Po из установленного соотношения ^{210}Po к ^{208}Po .

Метод перевода исследуемого радионуклида в растворенную форму (с последующим извлечением ее из образца) включает обработку азотной и соляной кислотами с последующим выпариванием.

Это начальное «вымывание» радионуклидной фракции является первичной стадией очистки, так как большинство сопутствующих элементов удаляется на этом этапе. Такая обработка обеспечивает перевод следовых количеств элементов и нуклидов в растворенное состояние и препятствует протеканию биологических процессов.

После добавления радиоактивного изотопа в образец приливают 60 мл сильной азотной кислоты (65 %) и затем выпаривают на нагревателе при температуре 150 °С в течение 40...70 минут. Этот шаг проводится с трехкратной повторностью. Предполагают, что на данной стадии разрушаются фракции донных отложений, в которых содержится неравновесный ^{210}Po (органический материал и карбонаты), так как изучаемый нуклид сорбируется поверхностью седиментов, а не внедрен в их кристаллическую структуру.

Стандартная процедура пробоподготовки также включает добавление 4 мл раствора TeSCl (0,02 М) для того, чтобы удержать полоний в ионной форме в растворе. Это базируется на предположении, что Te^{4+} является конкурирующим ионом для полония. В результате ионы Te^{4+} должны заменить ионы полония в химических реакциях и, таким образом, удержать его в ионной форме, фиксируясь в нерастворимых фракциях.

На следующем этапе полоний преобразовывается в форму хлорида при растворении в 75 мл соляной кислоты (25 %). Кислоту приливают в 3 этапа с последующим выпариванием на нагревателе при температуре 150 °С. Последовательное добавление и выпаривание 20 мл дистиллированной воды уменьшают избыток ионов хлора.

Затем исследуемый образец смывают 8 мл соляной кислоты и 10... 15 мл дистиллированной воды в колбу (100 мл) и оставляют на 24 часа для отделения жидкой фазы, содержащей неравновесный ^{210}Po , от осадка.

В извлеченной жидкой фазе раствора устанавливают pH 7,0 добавлением 27...30 мл 3М раствора NaOH. Затем к раствору приливают 4 мл аскорбиновой кислоты (200 мг/мл) для превращения Fe (III) в Fe (II) и добавляют 7 мл соляной кислоты, затем дистиллированной водой доводят до объема 100 мл.

После химического разделения из образца готовят источник излучения. Для достижения наилучшего разрешения пиков на альфа-спектре необходимо, чтобы источник излучения был нанесен на подложку тонким равномерным слоем. Это должен быть одноатомный слой альфа-излучателя. Наличие посторонних материалов поверх этого слоя недопустимо во избежание поглощения альфа-излучения. Источник должен быть удобен в обращении и химически стабилен.

Для предотвращения соосаждения других элементов и достижения полного и однородного осаждения ^{210}Po полоний из исследуемого образца осаждали на серебряный диск, принимая во внимание то, что в электрохимическом ряду за полонием следует свинец (можно предположить, что ^{210}Po будет селективно осаждаться на серебряном диске).

Поверхность серебряного диска должна быть предварительно очищена 2 %-ным раствором серной кислоты, 1 %-ным раствором мочевины и дистиллированной водой. Экстракт помещается в тefлоновую установку для депонирования в течение четырех часов.

1.3. Методы датирования возраста донных отложений. Для определения возраста отдельных слоев озёрных отложений существуют методы, основанные на использовании естественных радиоактивных изотопов свинца ^{210}Pb .

В литературе описано две модели Constant Initial Concentration (Постоянная Начальная Концентрация) и Constant Rate of Supply (Постоянный Уровень Поступления), позволяющие определять возраст донных отложений с помощью метода неравновесного свинца [8, 9].

Предложен альтернативный метод определения скорости седиментации донных отложений в реке Енисей и определения их возраста, используя соотношение изотопов европия ¹⁵⁴Eu/¹⁵²Eu. Этот метод датирования основан на следующих предположениях:

- поток изотопов европия постоянен;
- скорость поступления донных отложений не меняется в пределах рассматриваемого промежутка времени.

В случае если выполняются оба предположения, зависимость отношения ¹⁵⁴Eu к ¹⁵²Eu от глубины будет экспоненциальной. Постоянную скорость седиментации (см·год⁻¹) можно рассчитать, используя соотношение [11]:

$$V_s = \frac{\ln 2}{\lambda'} \cdot \left(\frac{1}{T_{^{154}\text{Eu}}} - \frac{1}{T_{^{152}\text{Eu}}} \right).$$

(2)

Результаты и их обсуждение

С целью изучения и совершенствования стандартной процедуры пробоподготовки исследован нижний слой (60...70 см) донных отложений из озера Лаго-Маджоре с позиции 2/4 [12].

Проведен ряд экспериментов в диапазоне концентрации TeCl₄ для установления зависимости суммарной эффективности стандартного метода от присутствия конкурирующих ионов в исследуемом образце. Проведено три теста в двукратной повторности: в тестах 1.1 и 1.2 в пробу добавлено 4 мл раствора TeCl₄, для тестов 3.1 и 3.2 применялся разбавленный в соотношении 1:100 раствор TeCl₄, тесты 2.1 и 2.2 использовали в качестве контроля. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость суммарной эффективности от концентрации TeCl₄

Номер теста	Активность неравновесного ²¹⁰ Po, Бк/кг	Суммарная эффективность, %	Комментарий
1.1	36,08 ± 2,29	5,81 ± 0,47	TeCl ₄ T = 108,2 °C
1.2	36,39 ± 2,39	5,46 ± 0,45	
2.1	35,94 ± 2,61	4,48 ± 0,33	Контроль T = 110,1 °C
2.2	32,08 ± 2,13	5,38 ± 0,45	
3.1	34,04 ± 2,38	4,83 ± 0,42	TeCl ₄ (1:100) T = 107,5 °C
3.2	34,26 ± 1,99	7,00 ± 0,54	

Из табл. 1 следует, что суммарная эффективность варьирует от 4,5 до 7 % и в среднем она равна 5 и 5,6 % для тестов с применением TeCl₄ и контроля соответственно. Кроме того, в таблице приведена средняя температура раствора, измеренная на стадии обработки исследуемого образца кислотами с последующим выпариванием на нагревателе при температуре 150 °C.

На рис. 2 и 3 показаны энергетические альфа-спектры, полученные при анализе тестов 1.1 и 2.2. Взаимодействие аскорбиновой кислоты и ионов Te⁴⁺ приводит к образованию темно-синей пленки на серебряной пластинке, что приводит к ухудшению энергетического разрешения и уширению пиков. При добавлении TeCl₄ полуширина пиков на полувысоте (ПШПВ) изменяется в пределах от 40 до 30 кэВ и варьирует от 10 до 20 кэВ для контрольного теста, в котором стадия добавления конкурирующих Te⁴⁺ ионов была пропущена (см. рис. 2 и 3).

Согласно полученным экспериментальным данным исключили этап добавления TeCl₄ при пробоподготовке проб, ввиду ухудшения энергетического разрешения и снижения суммарной эффективности.

Была изучена зависимость эффективности определения содержания неравновесного ²¹⁰Po в исследуемом образце от температуры и установлено, что полоний частично испаряется с кислотами в процессе их выпаривания и уменьшается суммарная эффективность (см. табл. 1).

Стадия химического разделения предполагает добавление соляной и азотной кислот с их последующим выпариванием из раствора на нагревателе при температуре 150 °C. Этот этап был изменен посредством снижения температуры нагревателя до 100 °C с целью эмпирического подтверждения выдвинутого предположения. Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 2.

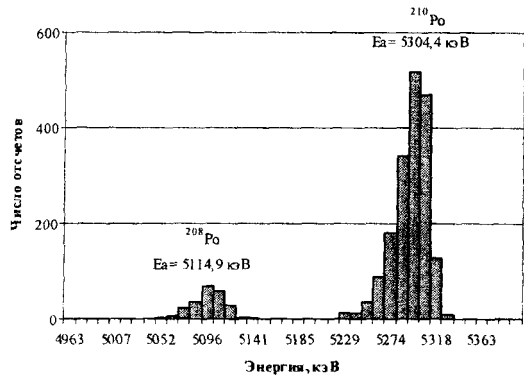


Рис. 2. Энергетический альфа-спектр 60...70 см слоя донных отложений озера Лаго-Маджоре, тест 1.1

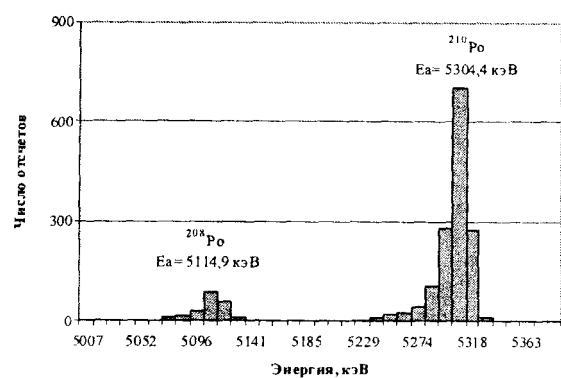


Рис. 3. Энергетический альфа-спектр 60...70 см слоя донных отложений озера Лаго-Маджоре, тест 2.2

Таблица 2

Зависимость суммарной эффективности от температуры

Номер теста	Активность неравновесного ^{210}Po , Бк/кг	Суммарная эффективность, %	Комментарий
4.1	$8,70 \pm 0,48$	$7,77 \pm 0,58$	контроль $T = 87,4\text{ }^{\circ}\text{C}$
4.2	$33,44 \pm 2,06$	$6,28 \pm 0,50$	
5.1	$30,47 \pm 2,26$	$4,37 \pm 0,39$	TeCl_4 $T = 89,9\text{ }^{\circ}\text{C}$
5.2	$39,70 \pm 3,05$	$4,07 \pm 0,37$	

Активность неравновесного ^{210}Po в тесте 4.1 составляет 8.7 Бк/кг, тогда как в остальных тестах она составляла 35 Бк/кг. Это отклонение можно объяснить неоднородным перемешиванием данной пробы и потерей активности на стадии пробоподготовки.

Суммарная эффективность в среднем изменяется в пределах от 4,2 до 7,1 % и достигает наибольшего значения (7,8 %) для контрольного теста (без добавления TeCl_4) при температуре нагревателя $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнительный анализ данных табл. 1 и 2 свидетельствует о том, что уменьшение температуры нагревателя от 150 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению температуры раствора с 109 до $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ и к увеличению суммарной эффективности от 5 до 7 %.

Таким образом, в результате анализа экспериментальных данных стандартная методика была изменена по следующим позициям:

- исключен этап добавления раствора TeCl_4 , так как это приводит к уширению пиков и не увеличивает суммарную эффективность;
- снижена температура нагревателя до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обуславливает увеличение эффективности, с которой осуществляется определение содержания неравновесного ^{210}Po в исследуемом образце от 5 до 7 %.

Сравнительный анализ ^{210}Po - и ^{210}Pb -методов датирования. С целью подтверждения наибольшей эффективности нового ^{210}Po -метода датирования был проведен сравнительный анализ различных подходов для определения неравновесного ^{210}Po и ^{210}Pb методами альфа- и гамма-спектрометрии. Объект исследования - донные отложения озера Лаго-Маджоре, не содержащие ^{152}Eu .

В эксперименте использовали два различных слоя одной седиментационной колонки, сформированных в различные промежутки времени. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сопоставление ^{210}Pb - и ^{210}Po -методов, донные отложения озера Лаго-Маджоре

Глубина слоя, см	а-спектрометрия	у-спектрометрия		
	Активность неравновесного ^{210}Po , Бк/кг	Активность ^{210}Pb , Бк/кг		
		общая	равновесная	неравновесная
0...10	$90,44 \pm 4,90$	$142,48 \pm 5,01$	$49,64 \pm 1,19$	$92,84 \pm 5,15$
60...70	$34,71 \pm 2,70$	$77,01 \pm 6,55$	$49,98 \pm 1,97$	$27,03 \pm 6,84$

Радиоактивность двух различных слоев донных отложений различна: для нижнего (60...70 см) слоя она составляет 34 Бк/кг и для верхнего (10 см) слоя - 92 Бк/кг (см. табл. 3). Уменьшение радиоактивности в осадках более глубоких слоев является результатом радиоактивного распада радионуклидов.

Результаты измерений неравновесного ^{210}Pb и ^{210}Po методами гамма- и альфа- спектроскопии хорошо согласуются с учетом статистических погрешностей.

Показано, что химическая обработка горячей азотной кислотой обеспечивает полное выделение неравновесного ^{210}Po из проб донных отложений. Следовательно, новый ^{210}Po -метод может быть применен для определения возраста донных отложений в реках и водоемах. В частности, он является очень надежным и высокоточным методом датирования осадков реки Енисей, для которых ^{210}Pb -метод неприменим вследствие присутствия изотопа ^{152}Eu .

Две различные методики (неравновесного ^{210}Po и соотношения радионуклидов европия) были использованы для вычисления скорости седиментации на примере донных отложений, отобранных в реке Енисей. Результаты расчетов, а также вертикальные профили неравновесного ^{210}Po и соотношения изотопов европия $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$ представлены на рис. 4 и 5.

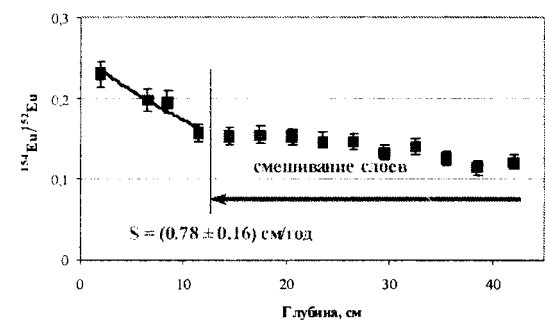


Рис. 4. Вертикальное распределение неравновесного соотношения изотопов европия $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$; донные отложения реки Енисей, колонка 1699

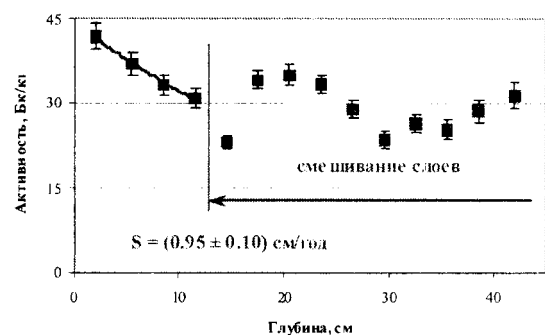


Рис. 5. Вертикальное распределение ^{210}Po ; донные отложения реки Енисей, колонка 1699

В вертикальном распределении неравновесного ^{210}Po различимы два отчетливых спада (см. рис. 4). Они, возможно, явились результатом миграции и последующего перемешивания слоев донных отложений, сформированных в различные промежутки времени. Вследствие этого слой осадков с низкой активностью ($x = 14,5$ см) оказался на поверхности слоя с высокой активностью неравновесного ^{210}Po ($x > 17,5$ см). Изменения в процессе аккумуляции донных отложений также, возможно, явились предпосылкой формирования подобной структуры вертикального профиля.

Для проб донных отложений, отобранных с позиции 1699, было рассчитано соотношение радионуклидов европия $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$ [11]. Его значение изменяется в пределах от 0,11 до 0,23 (рис. 5). Кроме того, экспоненциальный спад соотношения $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$ с глубиной наблюдается только для верхнего (14 см) слоя.

Предположение о процессах миграции и перемешивании отдельных слоев донных отложений (колонка 1699) также подтверждается вертикальным распределением плотности осадков. В результате анализа вертикальных профилей неравновесного ^{210}Po и радионуклидов европия $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$ было принято решение оценить скорость седиментации для верхнего слоя донных отложений (0...14 см), где для обеих кривых наблюдается экспоненциальная зависимость от глубины.

Значение скоростей седиментации варьирует от $0,78 \pm 0,16$ до $0,95 \pm 0,10$ см/год, для метода соотношения радионуклидов $^{154}\text{Eu}/^{152}\text{Eu}$ и СИС-модели соответственно. Оба расчетных метода хорошо согласуются, с учетом статистических погрешностей, что служит подтверждением их применимости при оценке скорости седиментации.

В табл. 4 представлены результаты оценки скорости седиментации донных отложений реки Енисей с использованием модели ^{60}Co [11], учитывающей процессы диффузии, адвекции, фиксации, радиоактивного распада.

Таблица 4

Сравнительный анализ применения разных методов вычисления скорости седиментации

Скорость седиментации, см/год				
Номер колонки	1699	1799	1899	4101
Модель ^{60}Co	-	$0,84 \pm 0,17$	-	$2,69 \pm 0,36$
Eu-отношение	$0,78 \pm 0,16$	$2,85 \pm 0,52$	$1,79 \pm 0,22$	$4,95 \pm 3,63$
Pu-отношение	-	$1,31 \pm 0,01$	-	-
^{210}Po -метод	$0,95 \pm 0,10$	-	$1,80 \pm 0,50$	$2,04 \pm 0,53$

Результаты, полученные ^{210}Po -методом, хорошо согласуются с результатами, достигнутыми с применением других независимых методик. Следовательно, новый метод определения возраста донных отложений может быть использован с целью определения скорости седиментации и исследования зависимости глубины седиментов от возраста.

Таким образом, при отсутствии процессов постседиментационной миграции методика датирования донных отложений с помощью определения неравновесного ^{210}Po позволяет определять скорость седиментации, а также датировать важные исторические события, происходящие в водных экосистемах.

Выводы. Изучен и усовершенствован метод определения неравновесного ^{210}Pb в донных отложениях. Выявлены и изучены факторы, оказывающие влияние на суммарную эффективность определения неравновесного ^{210}Pb . Определена оптимальная температура для химического выделения исследуемого радионуклида из образца. Исследовано влияние конкурирующих ионов Te^{4+} на процесс адсорбции ^{210}Po на неразрушенных фракциях донных отложений.

Предложен новый точный и надежный ^{210}Po -метод определения возраста донных отложений с помощью альфа-спектрометрии для использования в условиях, не благоприятных для применения стандартного метода.

Результаты, полученные ^{210}Po -методом, хорошо согласуются с результатами, достигнутыми с применением других независимых методик. Следовательно, новый метод определения возраста донных отложений может быть использован с целью определения скорости седиментации и исследования зависимости глубины седиментов от возраста.

Таким образом, при отсутствии процессов постседиментационной миграции методика датирования донных отложений с помощью определения неравновесного ^{210}Po позволяет определять скорость седиментации, а также датировать важные исторические события, происходящие в водных экосистемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cialova P., Organo L., Vintro L. Sedimentation processes on intertidal areas of the Lagoon of Venecia: identification of exceptional flood events using radionuclides. *Journal of Coastal Research*, special issue 36, 2002. - P. 140 - 147.
2. Goldberg E. Geochronology with ^{210}Pb . *Proceedings of a Symposium on Radioactive Dating*, International Atomic Energy Agency. - Vienna, 1963. - P. 121-131.
3. Kirchner G., Ehlers H. Sediment geochronology in changing coastal environments: potentials and limitations of the ^{137}Cs and ^{210}Pb methods. *Journal of Coastal Research*, V. 14, №2.-1998. - P. 483 - 491.
4. Smith J.N., Boudreau B.P., Noshkin V. Plutonium and ^{210}Pb distributions in northeast Atlantic sediments: subsurface anomalies caused by non-local mixing. - *Earth and Planetary Science Letters* 81, 1986. - P. 15-28.
5. Knoll G. *Radiation detection and measurements*, 1999.
6. Procedures for determination of $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{237}Np , ^{234}U , ^{238}U , $^{228,230-232}\text{Th}$, ^{99}Th and ^{210}Pb - ^{210}Po in environmental materials. *Riso National Laboratory*, Roskilde, 2001. - P. 27 - 30.
7. Duursma E.K., Carroll J. *Environmental compartments, equilibria and assessments of processes between air, water, sediments and biota*. Springer-Verlag. - Berlin, 1996.
8. Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of ^{210}Po dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Po to the sediments. *Catena*, V. 5, 1 - 8. - Braunschweig, 1978.
9. Appleby P.G. Dating recent sediments by ^{210}Pb : problems and solutions. STUK-A-145. STUK, Helsinki, 1998.
10. Appleby P.G., Oldfield F. The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia* 103, 1983. - P. 29 - 35.
11. Spasova Y. Artificial radionuclides in river-sediments: Measurement and modeling of input, vertical distribution and binding to geochemical fractions in the case of the Yenisei River. Weingarten, 2003.
12. Klemm E. et al. Radiocaesium im Lago Maggiore. *Umweltradioaktivitaet und Strahlendosen in der Schweiz* 2003. Bundesamt fuer Gesundheit, 2004. - P. B.4.4.1 - B.4.4.1.