

- учебное пособие для вузов / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, В. Г. Житков. – 3-е изд. – Томск: Изд-во STT, 2019. – 192 с.
4. Поцелуев А. А. Космоструктурная модель Калгутинского редкометалльного месторождения (Горный Алтай) / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, И. Ю. Анникова и др. // Известия ТПУ, 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 45–53.
5. Поцелуев А. А. Материалы современных космических съемок при изучении рудоносных районов Сибири / А. А. Поцелуев, Ю. С. Ананьев, В. Г. Житков // Руды и металлы, 2011. – № 3–4. – С. 138–139.

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (U, Th) В МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАЛЕЖИ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА (ЮЖНАЯ ТАЙГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Ю. И. Прейс¹, [Л. П. Рихванов]², А. Е. Мальцев³

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, Россия, preisyui@rambler.ru

²Томский политехнический университет
Томск, Россия

³Институт геологии и минералогии СО РАН
Новосибирск, Россия, maltsev@igm.nsc.ru

ACCUMULATION OF RADIOACTIVE ELEMENTS (U, Th) IN THE MULTILAYER PEAT DEPOSIT OF THE RAISED BOG (SOUTHERN TAIGA OF WESTERN SIBERIA)

Yu. I. Preis¹, [L. P. Rikhvanov]², A. E. Maltsev³

¹Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk, Russia, preisyui@rambler.ru

²Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

³V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
Novosibirsk, Russia, maltsev@igm.nsc.ru

In this paper, we consider the temporal dynamics features of the radioactive elements (Th, U) content in the core of a high-moor multilayer swamp peat deposit, typical for the forest zone of Western Siberia. The role of global, regional, and local factors in the accumulation of Th and U at different stages of bog formation has been determined. Significant direct and indirect (through the consequences of cryogenic processes) influence of the Holocene climate on the accumulation of these radioactive elements have been established. Significant losses of U in peat deposits of runoff flowing troughs were revealed. The U concentrations and EF (U) have been proposed as an indicator of the degree of the flow of bog paleoecotopes water regime.

Введение

Олиготрофные болота активно используются для современного и палеомониторинга геохимических и климатических обстановок окружающей среды. В Западной Сибири торфяные болота являются одним из основных ландшафтов, поэтому необходимы знания о региональных источниках и особенностях временной динамики поступления накопления радиоактивных элементов в их торфяные отложения. Торфяные залежи, особенно олиготрофных глубоко залежных болот, являются хранилищами ценной информации об геохимических, экологических и климатических условиях в голоцене. Поэтому они являются одним из основных объектов, используе-

мых для реконструкций и прогнозов этих условий. Для обоснованных прогнозов для Западной Сибири необходимы знания о региональных особенностях болотообразовательного процесса и отклика болот на климатические изменения голоцена. Однако этот вопрос еще недостаточно разработан в связи с многообразием типов болот, путей их аутогенного и климатогенного развития, а также недостаточной изученностью значимости индикаторов изменений, как климата, так и функционального состояния болот для Западно-Сибирского региона.

Имеются данные о накоплении U и Th в разных типах и видах торфяных залежей Западной Сибири [1, 2, 4, 7, 12], но отсутствуют для широко распространенных верховых топяных залежей.

Целью данного исследования является выявление особенностей накопления U и Th в торфяных залежах олиготрофных болот юга лесной зоны Западной Сибири в зависимости от источников поступления этих элементов и изменения гидротермических режимов болотных палеоэкотопов климата голоцена.

Материалы и методы

Объекта исследования является глубокозалежный (7,85 м) торфяной разрез (ТР) Болтное, заложенный на юге Томской области, на севере центральной части Большого Васюганского болота (57°04'44,3" с. ш.; 79°34'29,2" в. д.). ТР заложен в регрессивном сосново-кустарничково-лишайниково-сфагновом сообществе у вершины ложбины стока в зоне контакта выпуклых верховиков, образованных фускум-залежами. ТР образован верховой многослойной торфяной залежью (765 см), органо-минеральными отложениями (ОМО) (10 см) и гумусированным суглинком (10 см). Согласно AMS-датированию возраст ТР на глубине 735 см равен 8194 кал. лет назад (л. н.), ОМО — около 12000 кал. л. н. (принят согласно данным спорово-пыльцевого анализа [3]).

На данном ТР ранее были выполнены комплексные исследования общетехнических, химических, изотопных ($d^{13}C$) свойств торфа и спорово-пыльцевых спектров, получено и откалибровано 11 AMS-дат. По комплексу индикаторов выполнена реконструкция динамики гидротермических режимов болота [9] и палеоклимата [3]. Для достижения цели данной работы определены послойные (через 1,5–5 см) показатели концентрации урана и тория нейтронно-активационным методом в сухом веществе торфа в Ядерно-геохимической лаборатории Кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Для определения корреляция поступления урана и тория с пылью рассчитаны коэффициенты их обогащения (EF) относительно содержания скандия в осадочных породах [6] по формуле, предложенной в [11]. Проведено сравнение данных полученных по ТР Болтное и других разрезов из лите-

ратурных источников. Используются данные реконструкции климата голоцена лесной зоны [10] и лесостепи [13] Западной Сибири.

Результаты и их обсуждение

Содержание урана в воздушно-сухой массе торфа, ОМО и подстилающего суглинка изученного разреза значительно колеблется (табл. 1). Среднее содержание U (Уср.) в торфяной залежи равно 0,14 мг/кг (табл. 1), и сходно с Уср. глубокозалежного верхового ТР Малая Ича (0,15 мг/кг) [7], также расположенного в центре Большого Васюганского болота, но представленного фускум-залежью. При этом, Уср. в слое верхового торфа ТР Болтное ниже в 85 раз, чем в слое низинного торфа и в 425 раз, чем в слое ОМО (табл. 1), а также ниже в 8,5–15,5 раз, чем для верховых торфов юга Западной Сибири [1, 2, 4, 12], в том числе ТР Малая Ича (0,14 мг/кг) [7]. В слое низинного торфа ТР Болтное Уср. сходно со Уср. в низинных торфах (2,23 мг/кг) южнотаежной подзоны Западной Сибири [4].

Содержание тория в ТР Болтное также значительно варьирует (табл. 1). Для всей торфяной залежи среднее содержание Th (Thср.) равно 0,17 мг/кг, что немного ниже, чем для ТР Малая Ича (0,22 мг/кг). Для слоя верхового торфа Thср ниже в 6,4 раза, чем для слоя низинного торфа и в 53–66 раза чем для слоев ОМО и суглинка этого разреза, а также ниже, чем для слоев верхового торфа ТР Малая Ича (в 1,7 раза) [7] и юга Западной Сибири (в 2,3–3,5 раза) [1, 2, 4]. Для низинных торфов ТР Болтное Thср (0,83 мг/кг) сходно с данным показателем (0,87 мг/кг) для низинных торфов юго-восточной части Западно-Сибирской плиты в связи со сходством их средней зольности (13,4 %) [2].

Показатель Th/U в ТР Болтное значительно варьирует по глубине при среднем значении для разреза 83,4, что в десятки раз выше средних значений Th/U (1,45–2,2) для верховых торфов юга Западной Сибири [1, 2, 4, 7]. Это обусловлено содержанием U ниже предела обнаружения анализа в основной толще верхового торфа. Слои торфа с ториевой природой (Th/U > 3) абсолютно господствуют от поверхности до 625 см, ниже, до 745 см, характерно чередование та-

Таблица 1. Содержание урана и тория в торфяных разрезах Болтное и Малая Ича

Слой разреза	Толщина слоя, см	Зольность, %		U, мг/кг		Th, мг/кг	
		мин.–макс.	ср.	мин.–макс.	ср.	мин.–макс.	ср.
Торфяной разрез Болтное							
верховой торф	720	1,0–7,1	2,2	0,001–0,37	0,02	0,01–0,75	0,14
низинный торф	45	6,1–36,3	14,4	0,001–8,07	2,01	0,01–3,40	0,83
вся торфяная залежь	765	1,0–36,3	3,0	0,001–8,07	0,14	0,01–3,4	0,17
ОМО	10	51,1–70,0	60,5	9,17–10,79	9,98	5,09–8,65	6,87
суглинок	10	92,8–97,0	94,5	0,50–4,05	2,27	8,31–8,77	8,54

ких слоев со слоями смешанной ($1 < Th/U < 2,5-3$) и урановой ($Th/U < 1$) природы, а до 780 см – господство торфов урановой природы.

Распределение урана и тория по глубине разреза имеет существенные различия (рис. 1).

Ураном значительно обогащены только нижняя часть разреза: слои суглинка, ОМО, низинного и частично верхового торфа (625–785 см) и поверхностный слой (0–39 см). Обогащение торием характерно для всего разреза. Корреляция U и Th в нижней части разреза отсутствует ($r = -0,48$), что отражает преобладание разных источников их поступления. Известно, что на ранней стадии образования болот основным источником поступления для U являются грунтовые воды, а для Th – терригенный материал, поступающий с окружающих более высоких элементов рельефа.

На ТР Болтное выявлена достаточно мощная (745–775 см), кайма обогащения многими микроэлементами на границе минерального грунта и болотных отложений. Торфяные отложения выполняют здесь роль окислительно-восстановительного барьера на пути миграции почвенно-грунтовых вод. В слоях ОМО и низинного торфа преобладают остатки растений высоко обводненных болотных палеозоотопов. Следовательно, значительное обогащение ураном этих слоев обусловлено восстановительными условиями в связи с обильным поступлением грунтовых вод, а, судя по высоким показателям концентрации Th в слое 745–775 см, вероятнее всего, и терригенным сносом с прилегающих более высоких элементов рельефа. Максимальное содержание U

(2,5–10,8 мг/кг) характерно для ОМО и вышележающего слоя низинного торфа (745–775 см) с зольностью 12,5–70,0 %.

Неправоммерно высокая вариабельность послонных концентраций U вслоях низинного торфа (до 725 см), а Th и в нижнем слое верхового торфа (ниже 605 см) (рис. 1) индицирует неоднократные резкие изменения водного и, вполне вероятно, термического режима палеозоотопов и климата. Согласно [3], накопление нижних слоев этого разреза имело пульсирующий характер. В сухие похолодания неоднократно происходило обсыхание поверхности болота и формировалась многолетняя мерзлота (ММ), накопление ОМО и торфа прекращалось. В последующие потепления деградация ММ вызывала подъем уровня грунтовых вод и переувлажнение поверхностных слоев разреза. Это активизировало поступление U и его осаждение.

В вышележающем слое 625–745 см произошло резкое понижение содержания U и Th (Uср. – 0,14 мг/кг, Thср. – 0,16 мг/кг). При уменьшении влияния подстилающего грунта и ОМО, а также грунтовых вод в связи с накоплением торфа, увеличилась роль климатических условий и гидротермических режимов болотных палеозоотопов в накоплении U и Th. Максимальное влияние на уменьшение содержания U и Th оказали аридизация климата около 10000 кал. л. н. (740 см), вызвавшая разболочивание и прекращение аккумуляции торфаи глобальное сухое похолодание 8200 кал. л. н. (730 см). Однако уже 8050 кал. л. н. (725 см) в условиях сухого потепления содержание U и Th резко возросло. В это время обвод-

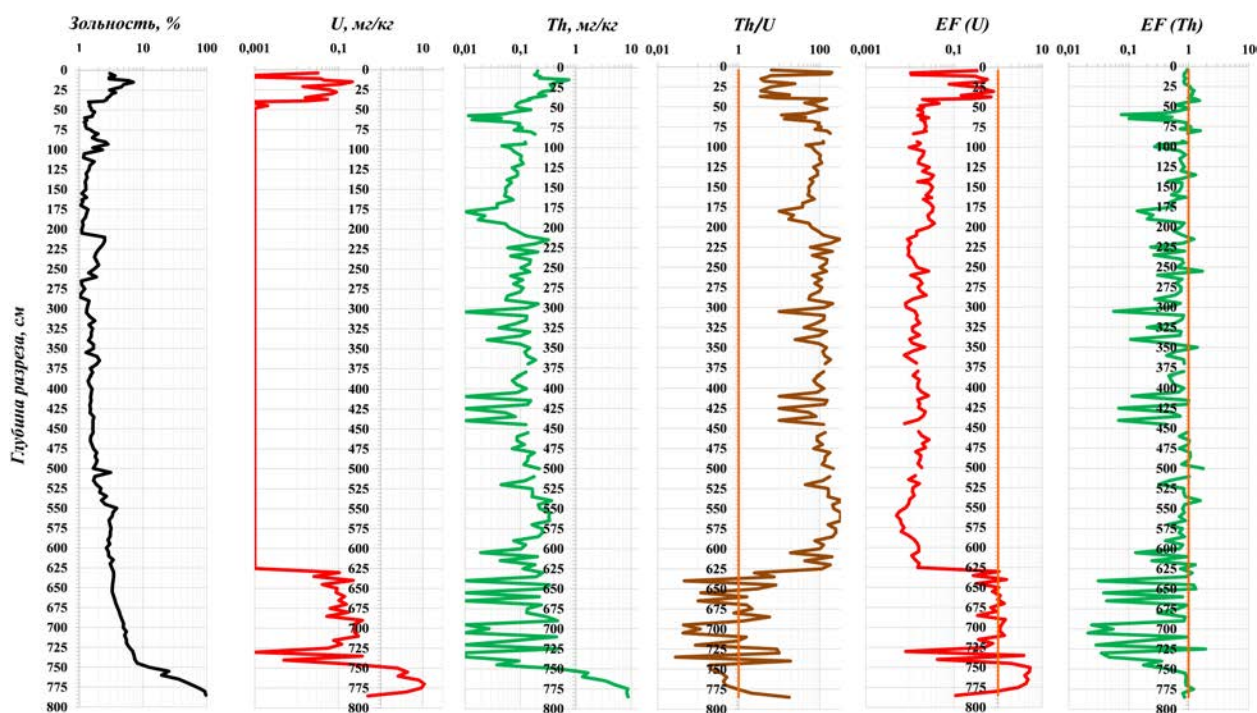


Рис. 1. Распределение зольности, тория, урана, отношения Th/U, коэффициентов обогащения (EF) U, Th с нормированием по скандию по глубине разреза Болтное

ненность болотного экотопа повысилась, вероятнее всего за счет поступления талых вод деградирующей ММ с вышерасположенных соседних участков болота, сформировавшейся в предшествующий период глобального похолодания. Это предположение основано на полученных нами данных о широком распространении криогенных процессов на болотах южной тайги Западной Сибири в периоды похолоданий голоцена [8], что является региональной особенностью. Около 7974 кал. л. н. данный участок болота перешел на олиготрофную стадию развития. Содержание U оставалось относительно высоким до 6270 кал. л. н. (620 см) в преимущественно теплых и влажных условиях атлантического оптимума голоцена. Однако содержание Th в этих условиях продолжало значительно варьировать, достигая значений ниже предела обнаружения анализа ($< 0,02$ мг/кг), несмотря на относительно высокую зольность торфов – 3,5–8,1 %, в основном в кратковременные (около 100 лет) сухие похолодания. Вероятно это было обусловлено уменьшением потока аэрозолей с аридных территорий, на которых влажность климата в это время возрастала [13], а также наиболее низкой за весь период голоцена запыленностью атмосферы, судя по минимальному содержанию Th и в торфах верхового болота Швейцарии в этот период [10].

В слое 39–625 см (145–6314 кал. л. н.) содержание U ниже предела разрешения данным методом ($< 0,002$ мг/кг). Скорость редукции U значительно повышается при наличии в системе гуминовых веществ [5]. Низкое содержание гуминовых веществ в слабозаболевших верховых торфах этого слоя не способствует осаждению U и в окислительных условиях он должен легко переходить в подвижную форму. На месте данного разреза практически всегда (за исключением последних нескольких сотен лет) существовала проточная топь, в которой воды поверхностного слоя торфа даже высокообводненных палеоэкотопов были обогащены кислородом. Влажность климата в этот период в целом была ниже, чем в предшествующий период. Высокая обводненность болотных экотоповданной ложбины стока была обусловлена, не только ежегодными поступлениями поверхностно-сточных вод в периоды снеготаяния и дождей с более высоких соседних участков болота, но и водами деградирующей ММ. Неоднократное формирование ММ в периоды похолоданий голоцена на соседних участках и поступление ее вод косвенно подтверждено наличием в торфах этой ложбины стока атрариновой кислоты лишайников, типичных для ММ местообитаний. Все это, по нашему мнению, и обусловило активный вынос U. Вполне вероятно, что ежегодными мощными потоками воды происходил вынос не только подвижных органо-минеральных соединений, но и поступающих из атмосферы частиц пыли содержащих U и Th. Об этом косвенно свидетельствуют более низкие концентрации

Th (табл. 1) в верховых торфах этого ТР, чем ТР Малая Ича. Минимальное содержание Th в этом слое соответствует периодам сухихпохолоданий около 6200–6100, 4200–3975, 3360, 3040, 1480–1280, 520 и 315 кал. л. н., когда уменьшался привнос аэрозолей с южных аридных территорий, в которых в это время повышалась влажность климата и почв [13].

Показатели EF (Th) и EF (U) близкие к 1 подтверждают поступление этих элементов с пылью. В ТР Болтное эти показатели значительно варьируют и распределяются крайне неравномерно, сходно с Th и U (рис. 1). В ТР Малая Ича, сформировавшемся в условиях отсутствия активного стока, в большинстве проб EF (U) превышает 1, что подтверждает зависимость накопления U от органической части торфа, а EF (Th) близко к 1, коррелирует с поступлением пыли [7], а в основной толще ТР Болтное эти показатели значительно ниже 1. Показатели EF (U) меньше 1 составляют 85 %, из них значения 0,005–0,04 – 76 %, что с большой вероятностью подтверждает потери U в результате его выноса водами ложбины стока. Для EF (Th) показатели близкие к 1 (0,6–1,5) составляют 66 %, меньше 1 (0,01–0,5) – 28 %. То есть потери Th также присущи, но в меньшей степени.

Появление U в поверхностном слое торфяной залежи (0–39 см) обусловлено как уменьшением притока и стока болотных вод в связи с выравниванием поверхности мезорельефа болота из-за активного отложения торфа в ложбине стока, так и возрастанием запыленности атмосферы в результате антропогенной деятельности. Последнее подтверждают повышение зольности до 7,1 %, высокий коэффициент корреляции U и Th (0,91) в этом слое, совпадение расчетного возраста экстремума U в слое 13–18 см (1972–1948 гг.) с периодом загрязнения атмосферы в результате массовых испытаний ядерного оружия, а также отсутствие корреляции факторов обогащения (EF) тория и урана с содержанием скандия.

Заключение

По результатам проведения исследований распределения урана и тория в ранне голоценовой глубоко залежной верховой многослойной топяной залежи разреза Болтное можно сделать следующие выводы.

Накопление U и Th в верховой топяной залежи имеет ряд особенностей: наличие достаточно мощной каймы обогащения на границе с минеральным грунтом; высокая концентрация U в слое низинного и нижнем слое верхового торфа; практически отсутствие U в основной толще верхового торфа; более низкие средние концентрации U и Th; значительное варьирование их, а также показателей U/Th, EF (U), EF (Th) по глубине разреза.

Данные особенности накопления Th и U обусловлены прежде всего положением ТР в ложбине

стока на контакте выпуклых верховиков, проточным водным режимом палеозекотопов, а также чутким откликом участка болота на климатические изменения.

По источникам поступления, характеру и величине накопления U и Th, а также степени влияния глобальных, региональных и локальных факторов выделяются 4 стадии в процессе формирования исследованного разреза: 1) значительного обогащения отложений ураном и торием за счет поступления их из грунтовых вод и терригенного материала; 2) максимальной зависимости накопления U и Th от климатических условий, определяющих активность поступления их с аэрозолями из атмосферы, 3) мак-

симальных потерь U и Th при формировании ложбины стока и под влиянием последствий палеокриогенных процессов; 4) зависимости накопления U и Th от антропогенной запыленности атмосферы.

Показатели концентрации U и Th в торфяных разрезах позволяют индцировать не только степень обводненности болотных палеозекотопов, но и характер (застойный или проточный) водного режима, что позволяет предложить их в качестве индикаторов для реконструкций водных режимов болотных палеозекотопов и климата голоцена.

Работа выполнена по государственному заданию ИМКЭССО РАН № 121031300155-8.

Литература

- Арбузов С. И. Среднее содержание некоторых элементов примесей в торфах юго восточной части Западно-Сибирской плиты / С. И. Арбузов, В. С. Архипов, В. К. Бернатонис и др. // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
- Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. – 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 300 с.
- Антипина Т. Г. Природные условия и климат южной тайги Западной Сибири за последние 9000 лет по данным спорово-пыльцевого анализа водораздельного болота / Т. Г. Антипина, Ю. И. Прейс, А. Т. Галимов // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатозекологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. – Томск, 2019. – С. 142–143.
- Веретенникова Е. Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южнотаежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы, 2013. – № 2. – С. 89–95.
- Водяницкий Ю. Н. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) / Ю. Н. Водяницкий, Н. А. Гребенкин, Д. В. Манахов, А. В. Сащенко, В. М. Тюленева // Почвоведение, 2019. – № 12. – С. 1492–1501.
- Григорьев Н. А. среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия, 2003. – № 7. – С. 785–792.
- Межибор А. М. Реконструкция поступления радиоактивных элементов (U, Th) в окружающую среду Западной Сибири на основе изучения верхового торфяника / А. М. Межибор, С. А. Арбузов, Л. П. Рихванов, Прейс Ю. И., А. И. Сысо // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 2016. – С. 413–418.
- Прейс Ю. И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юго-востока Западной Сибири / Ю. И. Прейс // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: труды Международной конференции. – Тюмень, 2015. – С. 305–308.
- Прейс Ю. И. Динамика функционального состояния раннеголоценового болота Болтное как отклик на изменение палеоклимата (южная тайга Западной Сибири) / Ю. И. Прейс, Т. Г. Антипина, В. Н. Зенин // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатозекологическому мониторингу: тезисы докладов российской конференции. – Томск, 2019. – С. 220–221.
- Blyakharchuk T. A. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes / T. A. Blyakharchuk // Journal of Siberian Federal University. Biology, 1999. – № 2. – P. 4–12.
- Krachler M., Shotykh W. Natural and anthropogenic enrichments of molybdenum, thorium, and uranium in a complete peat bog profile, Jura Mountains, Switzerland // Journal of Environmental Monitoring, 2004. – № 6. – P. 418–426.
- Mezhibor A. M., Arbuzov S. I., Rikhvanov L. P. Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia) // Energy exploration and exploitation, 2009. – Vol. 27. – № 6. – P. 401–410.
- Zhilich S. V. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population / S. V. Zhilich, N. A. Rudaya, S. K. Krivonogov, L. B. Nazarova, D. V. Pozdnyakov // Quaternary Science Reviews, 2017. – V. 163. – P. 152–161.