

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 631. 417

DOI: 10.15372/GIPR20230409

Л.В. КАРПЕНКО

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, Россия, karp@ksc.krasn.ru

СОДЕРЖАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ВЕРХОВОГО БОЛОТА В ДОЛИНЕ РЕКИ ДУБЧЕС (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

Проведено исследование валового содержания редкоземельных элементов (скандия, иттрия, лантана, церия, празеодима, неодима, самария, европия, гадолиния, тербия, диспрозия, гольмия, эрбия, тулия, иттербия и лютеция) в торфяной залежи верхового болота в долине р. Дубчес (Красноярский край). Выявлено, что возраст придонного слоя торфа составляет $13\,617 \pm 190$ кал. л. н. Рассмотрены основные источники поступления редкоземельных элементов в торфяную залежь болота. Это подстилающие породы, атмосферные аэрозоли, региональные и локальные лесные пожары, геохимия торфов. Отмечено, что атмосферные аэрозоли и региональные лесные пожары мало влияли на концентрацию элементов в исследованных торфах. Основными источниками привноса редкоземельных элементов в торфяную залежь служили подстилающие породы и окислительно-восстановительная среда в инициальный период формирования болота. В ходе исследования установлено, что содержание редкоземельных элементов в верховых, переходных и низинных торфах ниже кларка, а все элементы рассеяны. В верховых и переходных видах торфа наиболее рассеяны церий, тербий и гольмий, а в низинных — церий и тербий. При этом концентрации скандия и иттербия в низинных видах торфа близки к кларку почв. Сделан вывод, что в различных видах верхового и переходного торфов концентрация редкоземельных элементов вниз по профилю почти не изменяется. Их незначительное накопление отмечено только в приповерхностных слоях 0,30–0,35 м. В пирогенных прослойках на глубинах 2,65, 2,90, 3,15 и 3,25 м зафиксировано повышенное содержание почти всех редкоземельных элементов относительно вышележащего слоя торфа. В низинных видах торфа в интервале глубин 4,0–3,75 м отмечена максимально высокая концентрация всех элементов. Высказано предположение о том, что основным источником поступления редкоземельных элементов в инициальной стадии развития болота могли служить подстилающие породы древнего ледникового происхождения.

Ключевые слова: лантаниды, основные источники поступления, торфяной профиль, кларк, реконструкция, голоцен.

L.V. KARPENKO

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences — Division of the Federal
Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences”,
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28, Russia, karp@ksc.krasn.ru

CONTENT OF RARE-EARTH ELEMENTS IN THE PEAT DEPOSIT OF THE HIGH BOG IN THE VALLEY OF THE DUBCHES RIVER (KRASNOYARSK KRAI)

A study was made of the gross content of rare-earth elements (scandium, yttrium, lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, tulium, ytterbium and lutetium) in the peat deposit of the high bog in the Dubches River valley (Krasnoyarsk krai). It was revealed that the age of the bottom peat layer is $13\,617 \pm 190$ cal BP. The main sources of rare-earth elements entering the peat deposit of the bog are considered. They are underlying rocks, atmospheric aerosols, regional and local forest fires, and peat geochemistry. It was noted that atmospheric aerosols and regional forest fires had little effect on the concentration of elements in the peat studied. The main sources of input

of rare-earth elements into the peat deposit were the underlying rocks and the oxide-recovery environment at the initial period of the formation of the bog. During the study it was found that the content of rare-earth elements in the upper, transitional and lowland peats is below the clark number and all the elements are dispersed. Cerium, terbium, and holmium are most dispersed in the upper and transitional types of peat, and cerium and terbium in the lowland ones. The concentrations of scandium and ytterbium in the lowland peat types are close to the soil clark. It is concluded that the concentration of rare-earth elements in different types of highland and transitional peats down the profile not almost change. Their insignificant accumulation is noted only in the near-surface layers of 0.30–0.35 m. In pyrogenic interlayers at the depths of 2.65, 2.90, 3.15, and 3.25 m, increased content of almost all rare-earth elements relative to the overlying layer of peat was recorded. In the lowland types of peat in the depth interval of 4.0–3.75 m, the highest concentration of all elements was noted. It is suggested that the main source of rare-earth elements in the initial stage of bog development could be the bedrock of ancient glacial origin.

Keywords: lanthanides, main input sources of rare earth elements, peat profile, clark, reconstruction, Holocene.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в торфяных залежах болотных экосистем России и их профильного распределения представляет большой интерес, так как в настоящее время имеется «весьма ограниченная информация о формах лантаноидов в торфе» [1, с. 42]. Закономерности распределения РЗЭ в торфяных почвах болот начали изучать с середины прошлого столетия. Было установлено, что концентрация этих химических элементов напрямую зависит от состава коренных пород областей питания, а также обусловлена тектоническим строением фундамента и неотектоникой [2, 3]. Авторами отмечалось, что при вертикальном распределении элементов по профилю торфяных почв самые высокие концентрации наблюдаются в нижних горизонтах профиля, что объясняется более близкой связью РЗЭ с коренными породами. По другим данным [4], торфяные залежи, залегающие на гранитах рапакиви, отличаются наиболее высокими концентрациями РЗЭ; меньшим содержанием химических элементов характеризуются торфяники, приуроченные к гранитным породам и архейским гнейсам.

В Западной Сибири, несмотря на довольно многочисленные исследования элементного состава торфов, концентрация и формы нахождения в них РЗЭ изучены недостаточно. Цель наших исследований — выявление закономерностей содержания валовых форм РЗЭ в торфяной залежи верхового болота, возраст которого более 13 тыс. калиброванных лет назад (кал. л. н.). Задачами исследований стали: анализ вероятных источников поступления РЗЭ в торфяную залежь; выявление особенностей их профильного распределения, экстремальных и средних значений концентраций; сравнение содержания валовых форм РЗЭ в торфах различного типа и ботанического состава. Для Приенисейской части Западной Сибири такие исследования выполнены впервые.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Левобережная часть Енисея между его крупными притоками Сым и Дубчес отличается высокой степенью заболоченности — более 35 %. Среди болот наиболее распространены верховые, представленные преимущественно выпуклыми грядово-мочажинными комплексами и сосново-кустарничково-сфагновыми фитоценозами (рядами).

Объектом исследования послужило олиготрофное болото смешанного питания с условным названием «Зотино, ВБ7-3», расположенное в правобережной долине р. Дубчес (район Международной обсерватории высотной мачты ЗОТТО). Географические координаты — 60°43' с. ш., 89°34' в. д. Оно относится к болотным экосистемам песчаных ложбин древнеледникового стока, локализованных на междуречье Сым–Дубчес. Современный растительный покров болота представлен сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом с сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* f. *uliginosa*). Торфяной разрез заложен в центральной, наиболее обводненной части болотного массива. Мощность залежи — 4,2 м, возраст придонного слоя торфа на глубине 4,0 м — $13\,617 \pm 190$ кал. л. н. Образцы торфа на определение редкоземельных элементов отбирали ручным буром системы Гиллера послойно сплошной колонкой от поверхности до подстилающей породы с интервалом 5 см (83 образца). При бурении залежи на глубинах 2,65, 2,90, 3,15 и 3,25 м были обнаружены пирогенные прослойки и макроугольки.

Анализ торфа на содержание РЗЭ проведен в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (масс-спектрометр Agilent 7700x). В торфяной залежи определены валовые концентрации следующих 16 РЗЭ (термины «лантаноиды» и «редкоземельные элементы» употребляются нами как синонимы): скандия (Sc), иттрия (Y), лантана (La), церия (Ce), празеодима (Pr), неодима (Nd), самария (Sm), евро-

пия (Eu), гадолия (Gd), тербия (Tb), диспрозия (Dy), гольмия (Ho), эрбия (Er), тулия (Tm), иттербия (Yb) и лютеция (Lu).

Конвенциональный возраст отложений определен посредством радиоуглеродного датирования торфа методом ускорительной масс-спектропии (3-MV Tandetronion accelerator) в Институте биогеохимии им. Макса Планка (Йена, Германия). Абсолютный (календарный) возраст получен с помощью программы CALIB (RADIOCARBON CALIBRATION PROGRAM) [5], относительно кривой IntCal13 [6]. Для придонного слоя торфяного разреза (4,15 м), представленного органоминеральным остатком (ОМО), получена инверсионная дата, поэтому в нашей статье она не обсуждается, как и содержание РЗЭ в этом горизонте. Радиоуглеродный возраст торфяной залежи разреза «Зотино, ВБ7-3» представлен в табл. 1. Анализ данных в статье приводится с учетом калибровочного (кал. л. н.) возраста. Ботанический анализ торфа и его физико-химических свойств осуществлен ранее по общепринятым методикам. Реконструкция динамики смен палеосообществ выполнена по ботаническому составу торфов, водного режима — по методу расчета «индекса влажности» (ИВ) [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Возможными источниками привноса РЗЭ в торфяную залежь исследованного болота могут являться подстилающие породы, природные и антропогенные аэрозоли, лесные пожары и геохимическая обстановка самого торфяника. Кратко рассмотрим эти источники.

Подстилающие породы. Основной источник поступления в почву макро- и микроэлементов (в том числе и РЗЭ) — это подстилающие породы [8]. По данным автора, «элементный химический состав почвообразующих пород во многом обусловлен палеогеографическими и палеогеохимическими условиями накопления их исходного материала...» [8, с. 12]. Во время плейстоценового покровного оледенения обширную территорию севера Красноярского края занимал ледник, который на юге достигал водораздела рек Нижней и Подкаменной Тунгусок и захватывал бассейн р. Дубчес [9]. При движении

Таблица 1

Возраст торфяной залежи олиготрофного болота «Зотино, ВБ7-3»

Глубина отбора образца, см	Возраст, тыс. к. л.	Глубина отбора образца, см	Возраст, тыс. к. л.	Глубина отбора образца, см	Возраст, тыс. к. л.	Глубина отбора образца, см	Возраст, тыс. к. л.
5	<i>46</i>	110	1373	210	3325	<i>315</i>	<i>8008</i>
10	<i>87</i>	115	1467	215	3550	<i>320</i>	<i>8436</i>
15	<i>128</i>	120	1561	220	3775	<i>325</i>	<i>8864</i>
20	<i>169</i>	125	1655	225	4000	<i>330</i>	<i>9292</i>
25	<i>210</i>	<i>130</i>	1749	230	4225	<i>335</i>	<i>9720</i>
30	<i>241</i>	135	1790	235	4450	<i>340</i>	<i>10 148</i>
35	<i>292</i>	140	1829	240	4675	<i>345</i>	<i>10 576</i>
40	<i>333</i>	145	1868	245	4900	350	11 004
45	<i>374</i>	<i>150</i>	1907	<i>250</i>	5125	<i>355</i>	<i>11 268</i>
50	415	155	1964	255	5290	<i>360</i>	<i>11 520</i>
55	<i>499</i>	160	2021	260	5449	<i>365</i>	<i>11 790</i>
60	<i>575</i>	165	2078	265	5608	<i>370</i>	<i>12 051</i>
65	<i>651</i>	170	2135	270	5767	<i>375</i>	<i>12 312</i>
70	<i>727</i>	175	2192	275	5926	<i>380</i>	<i>12 573</i>
75	<i>803</i>	<i>180</i>	2249	280	6085	<i>385</i>	<i>12 834</i>
80	<i>879</i>	185	2404	285	6244	<i>390</i>	<i>13 095</i>
85	<i>955</i>	190	2558	290	6403	<i>395</i>	<i>13 356</i>
90	<i>1031</i>	195	2712	295	6562	<i>400</i>	13 617
95	<i>1107</i>	<i>200</i>	2866	<i>300</i>	6721	<i>405</i>	<i>13 868</i>
100	1183	<i>200</i>	2866	305	7151	<i>410</i>	<i>14 139</i>
105	<i>1279</i>	205	3100	310	7580	<i>415</i>	<i>11 970</i>

Примечание. Возраст торфа: курсив — полученный методом интерполяции, полужирный шрифт — калиброванный.

ледника могло происходить перемещение горных пород, богатых полиметаллическими рудами, с Таймырского полуострова или со Среднесибирского плоскогорья. Вдоль ледяных краев ледника в результате его дегляциации образовались так называемые зандровые равнины, почвообразующими породами которых были песчаные, супесчаные, суглинистые и реже глинистые породы. На территории наших исследований именно эти породы в результате физического и химического выветривания в инициальной стадии образования болота, вероятно, служили основными источниками обогащения исследованной торфяной залежи РЗЭ, так как современные пески, подстилающие торфяник, характеризуются бедным минералогическим составом.

Загрязнение аэрозолями. На геохимические особенности торфяных залежей болот могут влиять атмосферные аэрозоли, содержащие разнообразные химические элементы. Тонкодисперсные фазы минералов РЗЭ могут поступать в торфяники в виде пылеаэрозолей и тонких взвесей. Однако ранее было отмечено, что «в районе расположения обсерватории «ЗОТТО» концентрация аэрозолей обусловлена в большей мере естественными биосферными циклами, влиянием чистых морских воздушных масс с акваторий Северного Ледовитого и Тихого океанов и западным переносом континентального воздуха с малозаселенных территорий Западной Сибири» [10, с. 31]. Таким образом, в районе наших исследований увеличение концентрации РЗЭ в торфяной залежи возможно только за счет дальнего атмосферного переноса аэрозолей.

Роль лесных пожаров. В Сибири ежегодно возникают тысячи пожаров, а их площадь может достигать сотен тысяч гектаров. Согласно статистическим данным Рослесхоза РФ, на территории Сибирского Федерального округа в 2020 г. зарегистрировано около 4 тыс. лесных пожаров на площади 817 тыс. га, а в 2021 г. — 2800 лесных пожаров на площади 542 тыс. га [11]. Пожары в лесах и на торфяных болотах представляют собой важные источники поступления загрязняющих веществ в атмосферу, так как в результате горения растительных материалов происходит интенсивная эмиссия частиц как минерального, так и органического происхождения. Состав пожарных эмиссий в лесах Сибири зависит от типа растительности, условий произрастания и интенсивности пожара [12]. При горении легкогорючих материалов образуются зольные вещества, богатые макро- и микроэлементами, а также смолистые (графит, сажа, черный углерод) и углеродсодержащие вещества. Проведение пожарных экспериментов по исследованию состава химического состава аэрозольных эмиссий на полигоне «Ярцево» Института леса СО РАН (в непосредственной близости от объекта наших исследований) показало, что суммарная доля аэрозольных компонентов минерального (почвенного) происхождения варьирует от 5–17 % от полной массы аэрозолей. Остальное вещество «пожарных» аэрозолей примерно на 90 % образовано углеродсодержащими веществами, а суммарная доля исследованных микроэлементов в этих аэрозолях составляет около 1 % от его полной массы [13, 14]. Таким образом, региональные лесные пожары в среднетаежных сосняках Приенисейской Сибири на протяжении всей истории существования болота, вероятно, мало влияли на содержание РЗЭ из-за их незначительной примеси в «пожарных эмиссиях». Влияние локальных торфяных пожаров на концентрации РЗЭ в залежи болота обсуждается ниже.

Геохимия торфов. Геохимические свойства торфов зависят от многих факторов [15]. Однако ведущие из них — это характер и качество почвенно-грунтовых вод, отражающих геохимию территории и уровень трофности торфяной залежи. По данным автора, «в низинных торфах геохимия поведения элементов складывается на фоне постоянного многовекового поступления элементов с почвенно-грунтовыми водами, что обеспечивает их высокую трофность» [15, с. 572]. Значительное влияние на перераспределение химических элементов по профилю стратиграфической колонки оказывает также окислительно-восстановительная среда торфяника. Самые высокие аккумуляции большей части химических элементов фиксируются в восстановительной обстановке в придонных залежах низинных болот, богатых органическим веществом. Такая же закономерность характерна и для лантаноидов, которые «...в условиях агрессивной среды торфяника в основной массе переходят в подвижную форму и, в конечном итоге, накапливаются в органическом веществе» [1, с. 50].

Краткая характеристика генезиса болота, строение торфяной залежи, распределение элементов по профилю. Болотный массив образовался в период $13\ 617 \pm 190$ кал. л. н. в пойме руч. Развилки (приток р. Хойбы) на месте сильно обводненных гипсовых топей (индекс влажности — 7,8–5,3). Низинная стадия болота (4,0–2,6 м) продолжалась 7221 год (13 617–5449 кал. л. н.). Во время аллереда, дриаса, предбореала, бореала и первой половины атлантики сформировалась торфяная залежь мощностью 1,4 м. Она сложена гипновым, древесно-гипновым, березовым, древесно-сфагновым, древесно-травяным, пушицевым и сфагновым низинными видами торфа. Переходная стадия (2,55–1,50 м) продолжалась — 3383 кал. л. н. (5290–1868 кал. л. н.). Во время второй половины атлантики, суббо-

реала и начале субатлантики отложилось 1,05 м залежи, которая образована пушицевым, сфагновым, травяно-сфагновым, шейхериевым переходными видами торфа. Верховая стадия продолжалась 1868 кал. л. н. Мощность залежи, сформированной фускум и медиум верховыми торфами, составляет 1,45 м. Степень разложения верховых видов торфа варьирует от 5 до 15 %, переходных — от 15 до 25 и низинных — от 30 до 45 %; зольность — от 2,2 до 4,4 %, от 2,7 до 6,3 и от 6,9 до 18,7 % соответственно. Реакция среды в верхней и средней частях залежи кислая (3,5–4,2), в нижней — слабокислая (5,5).

Для сравнительной оценки концентраций РЗЭ (во сколько раз концентрация элементов в торфе меньше, чем в почве) мы использовали показатель кларка рассеяния (КР), который рассчитывали через отношение кларков почв мира [16] к среднему весовому содержанию элемента в торфах, слагающих залежь.

В табл. 2 приведены экстремальные и средние концентрации элементов, а также кларки их рассеяния. В целом содержание всех РЗЭ в верховых, переходных и низинных торфах ниже кларка, т. е. все элементы рассеяны. В верховых видах торфа особенно низким содержанием характеризуются церий (Ce), тербий (Tb), лютеций (Lu) и гольмий (Ho). Их КР равны 1750, 430, 200 и 170 соответственно. В переходных торфах наиболее рассеяны эти же элементы, а также лютеций (Lu), кларк рассеяния которого равен 160. В низинных видах торфа наиболее рассеянными элементами являются церий и тербий, однако их КР значительно ниже — 98,6 и 30,7 соответственно. А вот концентрации скандия (Sc) и иттербия (Yb) близки кларку почв, их КР равны 0,42 и 0,7 соответственно. В торфах верхового типа содержание элементов относительно равномерное на протяжении слоя в 1,45 м. Однако в приповерхностных слоях торфа (глубины 0,3–3,35 м) отмечено увеличение большинства РЗЭ в 1,5–2,0 раза. Такое повышение концентрации возможно за счет дальнего переноса аэрозоля с вулканическим пеплом при крупных извержениях вулканов [1]. Другими источниками поступления лантаноидов в торфяную залежь могут быть минеральные вещества метеоритных дождей, радиоактивные выпадения при ядерных испытаниях в атмосфере и др.

Сопоставление концентраций РЗЭ в переходных видах торфа (слой 1,05 м) с верховыми видами показало, что по своему значению они близки таковым в верховых торфах. Низкая миграционная способность РЗЭ (Y, La, Ce и Nd) в их вертикальном распределении по торфяному профилю отмечалась ранее [1, 2]. Распределение РЗЭ в низинных видах торфа приведено в табл. 3. Из нее следует, что в этих торфах концентрация РЗЭ резко увеличивается. Например, содержание церия, лантана и иттербия превышает их среднюю концентрацию в верховых торфах в 14, 20 и 15 раз соответственно. Небольшое повышение концентрации отдельных элементов по сравнению с вышележащими слоями торфа отмечается в пирогенных прослойках, которые сложены березовым, пушицевым и древесно-травяным видами (глубина торфяной колонки — 2,65, 2,90, 3,15 и 3,25 м). Однако эти превышения в прослойках разные. Так, на глубине колонки 2,65 м, представленной березовым торфом, отмечается увеличение концентраций следующих элементов: Y, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, а в слое 2,9 м (такой же вид торфа) превышено содержание всех РЗЭ, кроме Ho. В пирологической прослойке на глубине 3,15 м, образованной пушицевым торфом, наблюдается увеличение концентраций Sc, Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. В последней прослойке (глубина 3,25 м), сложенной древесно-травяным торфом, превышение концентрации наблюдается по всем РЗЭ, кроме Ce, Nd, Dy, Er, Lu. Небольшое увеличение концентраций макро- и микроэлементов в продуктах горения напочвенного покрова и торфа отмечалось ранее [17]. Однако максимальное концентрирование всех РЗЭ фиксируется в слоях низинного торфа, прилегающего к подстилающей породе (интервал глубин 4,0–3,75 м).

Рассмотрим более детально условия накопления РЗЭ на начальной стадии образования болота (время 13 617–12 312 кал. л. н., древний дриас, аллеред, начало позднего дриаса). Теплый климат начала голоцена и высокоминерализованный состав поступающих в торфяник грунтовых вод способствовали быстрому зарастанию палеоводоёма сначала гипергидрофильными фитоценозами из гипновых мхов и евтрофного болотного разнотравья (ИВ — 7,8), затем — березово-гипновыми фитоценозами с примесью хвоща (ИВ — 5,7). В интервале голоцена 12 573–12 312 кал. л. н. гидрологический режим еще больше изменился в сторону сухости (ИВ — 3,2), что привело к развитию березово-разнотравного фитоценоза. За период времени 2088 лет привносимые химические элементы поглощались болотными растениями, а при их отмирании отложились в богатые по своему минеральному составу низинные виды торфа — гипновый (0,15 м), древесно-гипновый (0,2 м) и березовый (0,05 м). По данным [1, 7], растения-торфообразователи при жизни концентрируют от 20 до 60 % и выше РЗЭ от их общего количества в торфе. Из данных табл. 3 следует, что по степени накопления элементов в придонных слоях торфа можно построить следующий ряд: гипновый > древесно-гипновый > березо-

Таблица 2

Кларк почв мира [16], содержание редкоземельных элементов в разных типах торфа олиготрофного болота «Зотино, ВБ7-3» и коэффициент рассеяния (КР)

Элемент	Кларк почв	Верховой <i>n</i> = 25	КР	Переходный <i>n</i> = 16	КР	Низинный <i>n</i> = 29	КР
Sc	10	0,09 – 0,29 0,16	62,5	0,11 – 0,34 0,22	45,4	0,16 – 8,21 2,36	0,42
Y	29	0,16 – 0,62 0,33	87,9	0,30 – 0,54 0,40	72,5	0,33 – 17,3 4,35	6,6
La	29	0,27 – 0,79 0,49	59,2	0,33 – 0,62 0,52	55,7	0,38 – 24,2 5,83	4,9
Ce	70	0,015 – 0,155 0,04	1750,0	0,023 – 0,070 0,04	1750,0	0,022 – 2,73 0,71	98,6
Pr	9	0,061 – 0,217 0,12	75,0	0,078 – 0,182 0,13	69,2	0,087 – 4,76 1,25	7,2
Nd	37	0,22 – 0,85 0,48	77,1	0,31 – 0,68 0,50	74,1	0,34 – 19,0 4,87	7,6
Sm	8	0,041 – 0,200 0,09	88,9	0,063 – 0,132 0,09	88,9	0,070 – 3,570 0,98	8,1
Eu	1,3	0,010 – 0,038 0,02	65,0	0,015 – 0,024 0,02	65,0	0,018 – 0,940 0,24	5,4
Gd	8	0,046 – 0,201 0,10	80,0	0,070 – 0,137 0,11	72,7	0,074 – 3,91 1,02	7,8
Tb	4,3	0,005 – 0,023 0,01	430,0	0,009 – 0,017 0,01	430	0,010 – 0,050 0,14	30,7
Dy	5	0,034 – 0,119 0,06	83,3	0,046 – 0,089 0,07	71,4	0,052 – 2,76 0,80	6,2
Ho	1,7	0,005 – 0,021 0,01	170,0	0,009 – 0,017 0,01	170,0	0,010 – 0,054 0,15	11,3
Er	3,3	0,017 – 0,063 0,04	82,5	0,033 – 0,053 0,04	82,5	0,037 – 1,76 0,51	6,5
Tm	0,27	0,001 – 0,007 0,006	45,0	0,003 – 0,009 0,01	27,0	0,004 – 0,252 0,07	3,8
Yb	0,33	0,014 – 0,049 0,03	11,0	0,025 – 0,048 0,04	8,2	0,03 – 1,44 0,45	0,7
Lu	0,8	0,002 – 0,006 0,004	200,0	0,003 – 0,009 0,005	160,0	0,005 – 0,214 0,06	13,3

Примечание. *n* – количество образцов данного типа торфа. Содержание редкоземельных элементов: числитель – минимальное–максимальное, знаменатель – среднее.

вый. Гипновый торф на глубине 4,0 м максимально концентрирует все РЗЭ, кроме Eu и Tm. Сравнение концентраций РЗЭ в трех слоях березового торфа, залегающего на разных глубинах торфяного профиля (2,60, 2,90 и 3,75 м), свидетельствует о том, что именно подстилающие породы могли являться главным источником их поступления в придонные слои торфа. Содержание всех РЗЭ в слое торфа на глубине 375 см превышает их концентрацию в вышележащих слоях березового торфа в 10–15 раз и более (см. рисунок). Вероятно, по мере роста торфяной залежи и активного поглощения РЗЭ органическим веществом нижележащих торфов роль грунтовых вод в переносе элементов вверх по торфяному профилю значительно снизилась.

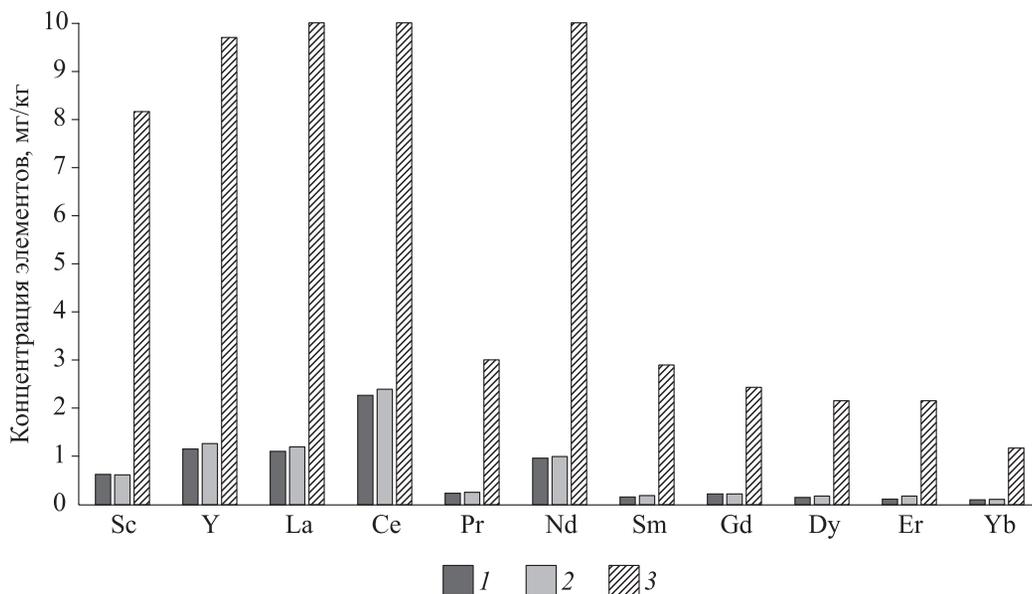
Значительное накопление РЗЭ в придонных слоях низинного торфа исследованного болота хорошо согласуется с высказанными ранее предположениями П.П. Тимофеева и Л.И. Боголюбовой [18]. Авторы отмечали, что в древних торфяниках, которые формировались в более теплых климатических

Таблица 3

Содержание (мг/кг) и распределение редкоземельных элементов в низинных видах торфа разреза «Зотино, ВБ-7-3»

Глубина отбора образца, см	Вид торфа	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
260	Березовый	0,63	1,16	1,11	2,27	0,240	0,97	0,165	0,034	0,226	0,027	0,150	0,030	0,117	0,014	0,104	0,018
265		0,59	1,22	1,08	2,25	0,210	1,03	0,170	0,039	0,231	0,024	0,138	0,032	0,123	0,015	0,117	0,016
270		0,50	1,00	0,84	1,70	0,189	0,78	0,147	0,039	0,183	0,025	0,143	0,010	0,111	0,004	0,098	0,016
275	Сфагновый	0,16	0,33	0,38	0,81	0,089	0,35	0,070	0,018	0,074	0,024	0,052	0,011	0,037	0,005	0,030	0,005
280		0,17	0,36	0,42	0,81	0,087	0,34	0,078	0,019	0,075	0,010	0,059	0,026	0,042	0,012	0,040	0,006
285		0,37	0,83	0,84	1,60	0,172	0,72	0,144	0,034	0,157	0,020	0,125	0,038	0,009	0,012	0,085	0,012
290	Березовый	0,62	1,27	1,20	2,40	0,263	1,00	0,190	0,042	0,223	0,029	0,177	0,035	0,132	0,017	0,112	0,018
295		0,54	1,33	1,17	2,34	0,210	0,96	0,203	0,043	0,236	0,030	0,165	0,026	0,152	0,013	0,109	0,016
300	Пушицевый	0,30	0,90	0,63	1,33	0,151	0,57	0,106	0,031	0,145	0,021	0,124	0,026	0,102	0,013	0,096	0,014
305		0,21	0,85	0,64	1,30	0,149	0,60	0,125	0,032	0,143	0,019	0,108	0,028	0,013	0,015	0,086	0,014
315		0,26	1,04	0,55	1,18	0,130	0,54	0,117	0,030	0,139	0,022	0,124	0,038	0,015	0,020	0,103	0,015
320	Древесно-травяной	0,34	0,95	0,96	2,19	0,280	1,37	0,250	0,047	0,250	0,036	0,232	0,043	0,020	0,019	0,119	0,025
325		0,60	1,07	1,19	0,04	0,340	1,21	0,260	0,057	0,300	0,038	0,194	0,047	0,019	0,020	0,144	0,021
330		0,88	1,16	1,47	3,12	0,340	1,37	0,280	0,063	0,310	0,040	0,226	0,050	0,022	0,022	0,137	0,021
335		0,73	1,25	1,40	3,01	0,33	1,34	0,270	0,069	0,310	0,042	0,243	0,042	0,019	0,019	0,143	0,023
345		0,57	1,16	1,15	2,54	0,28	1,15	0,220	0,058	0,270	0,035	0,207	0,055	0,027	0,027	0,131	0,020
350		0,67	2,09	1,42	2,95	0,30	1,35	0,260	0,071	0,310	0,044	0,285	0,060	0,030	0,030	0,175	0,033
355		0,82	1,75	1,53	3,37	0,39	1,49	0,350	0,077	0,360	0,048	0,317	0,128	0,054	0,054	0,203	0,027
360		1,86	3,40	4,05	8,47	0,96	3,70	0,710	0,174	0,770	0,106	0,617	0,156	0,086	0,086	0,380	0,057
365	Древесно-сфагновый	3,17	5,20	5,48	11,4	1,18	5,18	0,980	0,235	1,030	0,250	0,940	0,156	0,145	0,086	0,620	0,074
370	Древесно-травяной	6,28	7,10	10,5	27,8	2,76	9,37	2,060	0,490	2,180	0,280	2,090	0,280	1,060	0,145	1,040	0,128
375	Березовый	8,16	9,70	12,9	25,6	3,01	10,6	2,870	0,510	2,440	0,290	2,160	0,340	1,190	0,167	1,180	0,155
385	Древесно-гипновый	8,07	10,4	13,1	31,0	3,14	12,5	2,530	0,650	2,600	0,350	2,050	0,380	1,300	0,171	1,160	0,164
390		8,21	11,7	21,8	44,4	4,05	16,8	2,990	0,780	2,840	0,430	2,000	0,440	1,720	0,252	1,400	0,208
395		6,09	15,0	23,0	46,1	4,52	18,4	3,430	0,900	3,770	0,480	2,540	0,510	1,650	0,230	1,380	0,194
400	Гипновый	7,24	15,2	24,2	48,7	4,76	19,0	3,570	0,840	3,910	0,500	2,760	0,540	1,760	0,231	1,440	0,214
410		4,03	1,3	18,5	37,9	3,80	13,3	3,050	0,730	3,210	0,350	2,090	0,460	1,480	0,196	1,250	0,160
415		4,54	7,8	12,1	28,7	2,76	10,5	2,050	0,510	2,100	0,270	1,510	0,290	0,980	0,128	0,830	0,118
420	ОМО	1,74	3,74	5,43	11,1	1,23	4,42	0,790	0,230	0,850	0,117	0,680	0,138	0,460	0,066	0,430	0,065

Примечание. Полужирным шрифтом выделены повышенные концентрации элементов в пылевых прослойках и придонных слоях торфа.



Содержание редкоземельных элементов в березовом виде торфа на разных глубинах торфяного профиля верхового болота «Зотино, ВБ7-3».

Глубина торфяного профиля: 1 — 260 см, 2 — 290 см, 3 — 375 см.

условиях, роль гуминовых веществ в накоплении РЗЭ, возможно, была существенно выше, чем у современных аналогов. Аномальное содержание почти всех РЗЭ в слое торфа 4,0–3,75 м, возможно, связано также с существованием высокой восстановительной среды в подошве торфяника в прошлом времени [19].

ВЫВОДЫ

1. Основным вероятным источником поступления редкоземельных элементов в торфяную залежь исследованного болота являются подстилающие породы, второстепенными — атмосферные аэрозоли и лесные пожары.

2. Концентрация элементов по всему профилю торфяных почв ниже кларка по сравнению с почвами мира. Выявлена тенденция к рассеянию РЗЭ на протяжении всего торфяного профиля, независимо от типа и вида слагающих его торфов.

3. Установлено, что в верховых и переходных типах торфа концентрация РЗЭ почти равномерная на протяжении всего слоя (2,5 м), что объясняется их низкой миграционной способностью. Увеличение валового содержания большинства РЗЭ в 1,5–2,0 раза в приповерхностных слоях торфяного профиля (0,30–0,35 м) может быть результатом дальнего атмосферного переноса от природных и антропогенных источников.

4. В пирогенных прослойках различного ботанического состава по сравнению с вышележащими слоями торфа отмечается повышенное содержание почти всех РЗЭ. Максимально высокие их концентрации выявлены в низинных видах торфа, особенно придонных слоях, что объясняется их более тесной связью с коренными породами, а также хорошими условиями водно-минерального питания болота в раннем голоцене, который в климатическом отношении был теплее современного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С.И., Маслов С.Г., Ильенок С.С., Перегудина Е.В. Формы нахождения редкоземельных элементов в торфах Западной Сибири // Изв. Томс. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2016. — Т. 327, № 5. — С. 42–53.
2. Коченов А.В., Крештапова В.Н. Редкие и рассеянные элементы в торфах северной части Русской платформы // Геохимия. — 1967. — Вып. 3. — С. 330–340.
3. Карандеева М.В. Геоморфология Европейской части СССР. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957. — 314 с.

4. **Ylirookanen I., Lehto S.** The occurrence of rare earth elements in some Finnish mires // *Bull. Geol. Soc. Finland.* — 1995. — Part II. — P. 27–38.
5. **Stuiver M., Reimer P.J.** Extended 14C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program // *Radiocarbon.* — 1993. — Vol. 35, N 1. — P. 215–230.
6. **Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haffidason H., Hajdas I., Hatte C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Reimer M.N., Ron W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., Van der Plicht J.** IntCal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years CAL BP // *Radiocarbon.* — 2013. — Vol. 55, N 4. — P. 1869–1887.
7. **Елина Г.А., Юрковская Т.К.** Методы определения палеогеографического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // *Ботан. журн.* — 1992. — № 7. — С. 120–124.
8. **Сысо А.И.** Общие закономерности распределения микроэлементов в покровных отложениях и почвах Западной Сибири // *Сиб. экол. журнал.* — 2004. — № 3. — С. 273–287.
9. **Нашокин В.Д.** Растительность Красноярского края и ее история // *История лесов Сибири в голоцене.* — Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1975. — С. 7–19.
10. **Панов А.В., Хайнцценберг И., Бирмили В., Зайферг П., Чи С., Тимохина А.В., Андреа М.О.** Пространственное распределение атмосферных аэрозолей над территорией Евразии в средних и высоких широтах // *География и природ. ресурсы.* — 2015. — № 1. — С. 30–36.
11. **Иванова Г.А., Иванов В.А., Пономарев Е.И.** Мониторинг лесных пожаров на территории Сибирского Федерального округа // *Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: Материалы XVIII Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь».* Т. 4. — Новосибирск: СГУГиТ, 2022. — С. 157–162.
12. **Иванова Г.А., Иванов А.В.** Пожары в сосновых лесах Сибири. — Новосибирск: Наука, 2015. — 240 с.
13. **Куценогий К.П., Ковальская Г.А., Савченко Т.И., Иванова Г.А., Иванов А.В., Тарасов П.А.** Постпирогенные изменения элементного состава лесных горючих материалов и почв в бореальных лесах Сибири // *Сиб. экологич. журнал.* — 2003. — № 6. — С. 735–742.
14. **Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Чуркина Т.В., Иванов А.В., Иванов В.А.** Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири // *Оптика атмосферы и океана.* — 2003. — Т. 16, № 05-06. — С. 461–465.
15. **Богатырев Л.Г., Ладонин Д.В., Семенюк О.В.** Микроэлементный состав некоторых почв и почвообразующих пород южной тайги Русской равнины // *Почвоведение.* — 2003. — № 5. — С. 568–576.
16. **Виноградов А.П.** Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия.* — 1962. — № 7. — С. 555–571.
17. **Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.** Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // *Экология.* — 1994. — № 5. — С. 27–34.
18. **Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И.** Геохимия органического вещества голоценовых отложений в областях приморского торфонакопления. — М.: Наука, 1999. — 220 с.
19. **Бобров В.А.** Редкоземельные элементы в торфяных залежах голоцена как индикатор атмосферного переноса минерального вещества // *Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всерос. литологического совещания.* — Новосибирск: Изд-во Ин-та нефтегаз. геологии и геофизики СО РАН, 2013. — Т. 1. — С. 92–97.

Поступила в редакцию 16.01.2023

После доработки 27.03.2023

Принята к публикации 29.06.2023