



УДК 551.481.2(473.31)

С.А. Тобратов, О.С. Железнова, А.В. Водорезов

ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННЫХ И ДРЕВНИХ ТОРФЯНЫХ АККУМУЛЯЦИЙ В МЕЩЁРСКОЙ ПРИРОДНОЙ ПРОВИНЦИИ

Проведена оценка вклада торфонакопления – природного процесса, приводящего к долговременному изъятию токсичных элементов из миграционных потоков – в естественную буферность ландшафтов Мещёрской низменности к антропогенному поступлению тяжелых металлов. Установлено, что даже при широкой распространенности торфяных почв их роль в ассимиляционном потенциале ландшафтов по отношению к тяжелым металлам невелика – в 5–9 раз меньше, чем аккумуляция древесины и корой, и в 70–150 раз меньше, чем вовлечение тяжелых металлов в рециклические потоки. В условиях низкотрофных песчаных субстратов Мещёры подвижные формы тяжелых металлов активно вовлекаются в биогенную миграцию, а их накопление в торфе идет «по остаточному принципу» и в целом невелико. Наибольшей вероятностью накопления в торфяниках отличаются малоподвижные токсиканты (Pb), наименьшей – подвижные биофилы (Zn). Основные факторы вертикального распределения тяжелых металлов в торфяных толщах – накопление на пограничных горизонтах, пирогенных и пнёвых (2010 год, раннесубатлантических, суббореальных и более древних), в том числе в процессе вертикальной водной миграции. Все это существенно осложняет использование торфяников Мещёры в качестве природного планшета при изучении аэротехногенного загрязнения. При лесоторфяных пожарах в атмосферу с продуктами горения улетучивается до 43 % накопленного в торфе радиоцезия при относительной стабильности естественных радионуклидов.

торф, тяжелые металлы, радиоцезий, естественные радионуклиды, пирогенные горизонты, аэротехногенное загрязнение, критические нагрузки, Мещёрская низменность.

Изучение торфяных аккумуляций представляет научный и практический интерес в связи со способностью торфа депонировать атмосферные выпадения, в том числе техногенных загрязняющих веществ¹. Особое значение имеет способность торфяников надолго изымать из биокруговоротов значительные массы токсикантов, повышая тем самым естественную буферность ландшафтов к загрязнению и позволяя в определенной мере экономить на природоохранных мероприятиях. Данный аспект разрабатывается в рамках методологии критических нагрузок². Кроме того, в ряде исследований торф рассматривается в качестве природного планшета, позволяющего оценивать скорость и объем атмосферных выпадений и их изменение по мере роста антропогенной нагрузки в XX веке³. При этом авторы часто исходят из возможности полной сохранности пылевых частиц, поступивших в торф из атмосферы, в течение длительного времени

¹ Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области : дис. ... канд. геолого-минерал. наук. Томск, 2009. 152 с.

² Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. 2004. URL : <http://www.icpmapping.org/> (date of access: 28.12.2017).

³ Баденкова С.В., Добродеев О.П., Сухова Т.Г. Распределение свинца в разрезе верховых торфяников как показатель нарастающего загрязнения атмосферы // Вестник МГУ. Серия «География». 1982. № 3. С. 53–58.

⁴. Ниже будет показано, что в Мещёрской природной провинции данная закономерность не работает и рассчитывать на такую сохранность некорректно.

Критическая нагрузка – это максимально возможное поступление в экосистему загрязняющего вещества, не нарушающее ее структуру и не снижающее эффективность функционирования в течение длительного времени (не менее 100 лет) ⁵. В отличие от предельно допустимой концентрации (ПДК), в данном случае основным рецептором служит не здоровье человека, а именно состояние экосистемы. При расчете критических нагрузок тяжелых металлов (ТМ) в настоящее время используется уравнение масс-баланса, которое, несмотря на очевидную простоту, тем не менее, полностью соответствует базовым основам данного методологического подхода:

$$CL = M_{upt} + M_{leach} + M_{SD(acc)} + M_{DGP}, \quad (1)$$

где CL – критическая нагрузка некоторого элемента M , M_{upt} – поглощение растительностью, M_{leach} – вынос с поверхностным и грунтовым стоком (при бассейновой и иной площадной оценке – M_{runoff}), $M_{SD(acc)}$ – накопление в почвах в иммобильных формах, M_{DGP} – сорбция ежегодно нарастающим торфом (только для гидроморфных экосистем).

«Физический смысл» уравнения (1) состоит в следующем: вся сумма поступления экзогенного металла должна уравниваться природными механизмами его санации, обеспечивающими изъятие его избытка из процессов функционирования. Как следует из уравнения, в лесных экосистемах Мещёры существует четыре основных таких процесса: долговременное накопление в приросте древесины с корой, вынос с поверхностным и грунтовым стоком и допустимое накопление в почве, а для болотных и полуболотных экосистем имеет также значение аккумуляция в ежегодно нарастающем слое торфа (последний процесс по ряду причин целесообразно рассматривать отдельно от $M_{SD(acc)}$). Основной задачей нашего исследования была оценка возможных масштабов такой аккумуляции. Иными словами, ответ на вопрос: можно ли рассматривать торфонакопление в качестве важной составляющей природного геохимического потенциала подтаежных ландшафтов Центра России.

Модельным объектом для изучения указанных выше процессов послужили земли Солотчинского лесхоза на юго-западе рязанской Мещёры (общая площадь территории 390 км²). Непосредственно в центре района исследований расположен примечательный природный объект – Красное болото, занятое несколькими слившимися еще в раннем голоцене верховыми торфяниками. Основная причина того, что именно здесь на столь обширной территории получило такое широкое распространение верховое заболачивание – особенности геологического строения. Как видно из рисунка 1, Красное болото как локальный природный комплекс обособилось в привершинной части Бельского погребенного останцового массива, сложенного известняком, с многочисленными эрозионными врезами низких порядков, сформированными в доюрскую эпоху. После регрессии мезозойских морей данные врезы в целом были восстановлены. Наличие эрозионных врез, погребенных под толщей раннечетвертичных песков, явилось исходной причиной развития переувлажнения и формирования термокарстовых котловин в валдае. Впоследствии в голоцене данные котловины, исходно занятые озерами, подверглись заболачиванию, а в связи с привершинным положением относительно кровли Бельского останца заболачивание пошло по верховому типу, и торф Красного болота обладает низкой зольностью: 2,5–3,0 %.

⁴ Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев [и др.]. Томск : Изд-во ТГУ, 1993. 157 с. ; Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland // Water, air, and soil pollution. 1996. № 90. P. 375–405.

⁵ Природный потенциал ландшафтов Рязанской области : моногр. / В.А. Кривцов [и др.] ; под ред. В.А. Кривцова, С.А. Тобратова ; РГУ имени С.А. Есенина. Рязань, 2011. 768 с. ; Manual on Methodologies ...

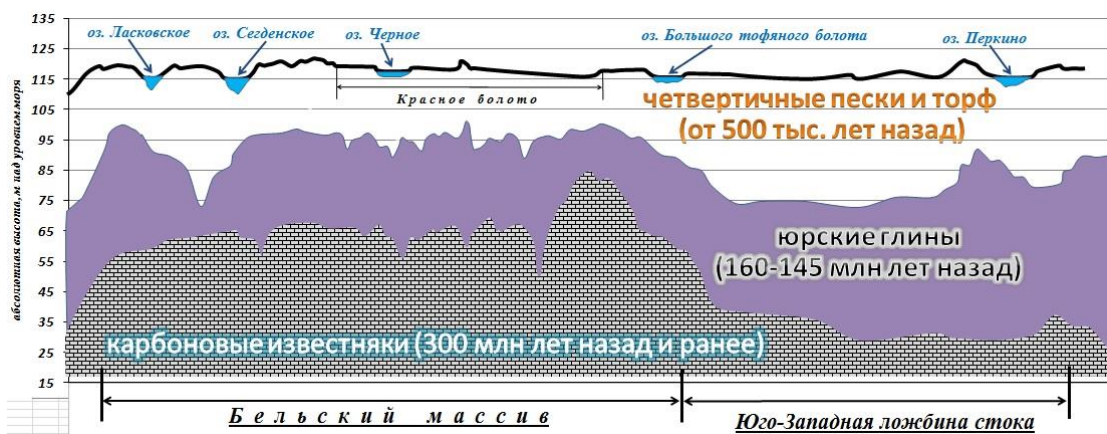


Рис. 1. Геологическое строение района исследований

Примечание. Составлено по данным Территориального фонда геологической информации по Центральному федеральному округу (Рязанский филиал).

Таким образом, локализация природного комплекса (ландшафтной местности) Красного болота и особенности геохимических процессов, протекающих в нем, определяются историко-геологическими факторами. Специфика данной местности (в первую очередь заболачивание по верховому типу ⁶) позволила нам рассматривать ее в качестве базового (хотя и не единственного) и наиболее представительного объекта при исследовании накопления в торфяниках аэротехногенных загрязняющих веществ и соотношения такого накопления с иными, природными процессами миграции и трансформации вещества.

Темпы роста торфа были оценены нами по результатам радиоуглеродного датирования торфяника Емельяново болото (в 1,7 км к северо-западу от Красного болота), согласно которым торф на глубине 45,5 см имеет возраст 2085 ± 51 лет (Институт географии Академии наук (ИГАН) – 3877, калиброванные данные). Это свидетельствует о средних темпах накопления торфа в субатлантический период голоцена около 0,218 мм в год. Данная скорость составляет лишь около 40 % от таковой в болотах Белоруссии в связи с большей континентальностью климата рязанской Мещёры ⁷. На юге Западной Сибири, например, такая скорость не превышает 0,16 мм/год, а в среднетаежной зоне снижается до 0,10 мм/год ⁸. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований ландшафтоведов Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ) для Мещёрской низменности ⁹. Таким образом, скорость нарастания торфяников закономерным образом зависит от континентальности климата, и рязанская Мещёра занимает по этому показателю свое уникальное место в системе климатических градиентов (рис. 2).

⁶ Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn ...

⁷ Козлов Е.А. Географические особенности изменений скоростей накопления торфа // Вестник Брест. ун-та. Сер. 5. 2011. № 1. С. 18–29.

⁸ Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.

⁹ Абрамова Т.А. Результаты комплексного палеоботанического изучения эволюции ландшафтов Центральной Мещёры в голоцене // Ландшафтная школа Московского университета: традиции, достижения, перспективы / под ред. К.Н. Дьяконова, И.И. Мамай. М.: РУСАКИ, 1999. С. 96–107.

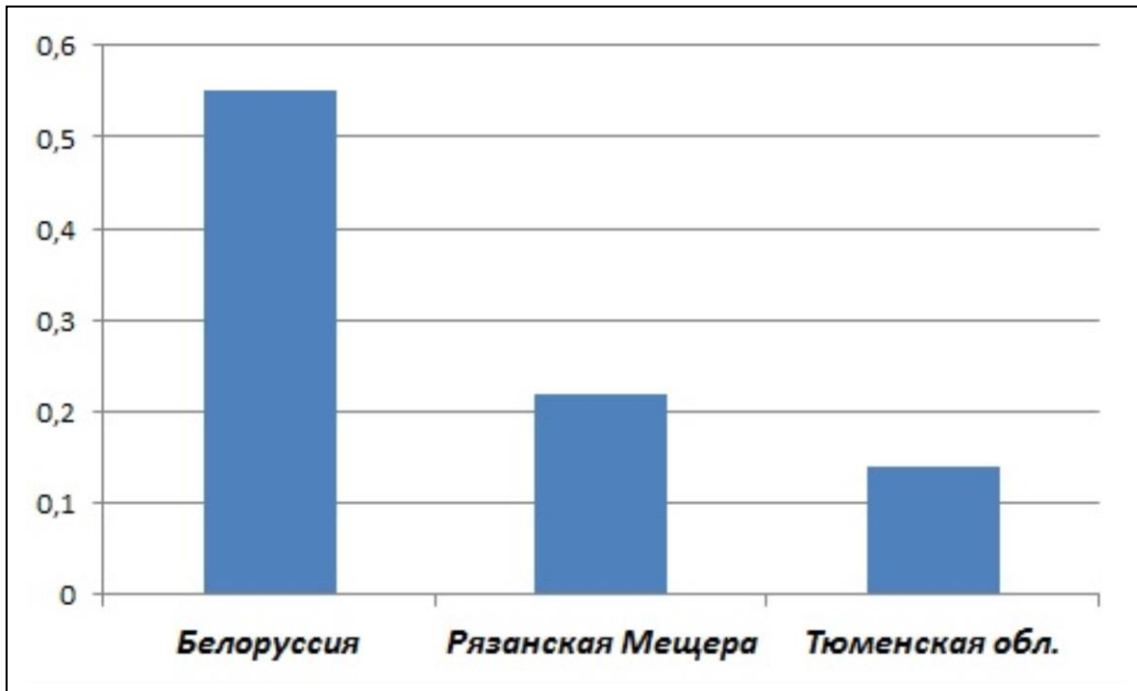


Рис. 2. Средние современные скорости роста торфяников в зависимости от степени континентальности климата, мм/год

Указанная скорость принималась равной для всех болот и заболоченных земель района исследований. По данным таксации определена площадь гидроморфных типов лесорастительных условий (по П.С. Погребняку¹⁰) с торфяными почвами. Расчеты вклада торфяных аккумуляций в биогеохимические процессы в экосистемах Южной Мещёры проведены для каждого лесного квартала по формуле

$$DGP = C_{TM}^{6,н-с} \times H_T \times \rho_T \times 10, \quad (2)$$

где DGP – аккумуляция ТМ в нарастающем торфе болотных почв (deposition in growing peat), г/га*год, $C_{TM}^{6,н-с}$ – средние концентрации валовых несиликатных (извлекаемых царской водкой) форм ТМ в поверхностных горизонтах торфяных почв района исследований, мг/кг (определены экспериментально и составили для Cu, Zn и Cd соответственно 4,64; 23,17 и 0,38 мг/кг); H_T – слой ежегодного нарастания торфа (0,218 мм); ρ_T – плотность скелета торфа, кг/дм³ (определена экспериментально и составила в среднем 0,182 кг/дм³ с колебаниями в пределах 0,060–0,350 кг/дм³); 10 – коэффициент пересчета на площадь.

Результаты расчетов в сопоставлении с биогеохимическими параметрами лесных экосистем Мещёры приведены в таблице 1. Ее анализ позволяет сделать два важных вывода. Во-первых, масса органического вещества, ежегодно аккумулируемого в нарастающих торфяниках, ничтожна в сравнении с биологической продукцией древесного яруса и подлеска: она составляет лишь 1,5 % от данных видов продукции и в 12 раз меньше даже ежегодного прироста ствольной древесины с корой, с которой она может быть сопоставлена по вкладу в естественную геохимическую буферность ландшафтов.

Во-вторых, представление об относительном участии разных биопродукционных фракций в миграционных потоках тяжелых металлов позволяет дать сравнение процентных долей их вклада, с одной стороны, в биопродуктивность, а с другой – в уровень накопления металлов (соответствующие сведения помещены в столбцах № 2). Если процентный вклад в общую биопродуктивность больше, чем в миграционные потоки того или иного металла, то это означает, что данная фракция не специализируется на накоплении этого металла, при обратном соотношении процентных долей фракция, наоборот, является биоаккумулятором элемента. При относительном равенстве процентных долей элемент в соответствующей фракции накапливается в

¹⁰ Погребняк П.С. Общее лесоводство. М. : Колос, 1968. 440 с.

целом пассивно, без «усилий» организма по его рассеиванию или, наоборот, избирательному накоплению.

Таблица 1

**Биологическая продуктивность лесных экосистем Южной Мещёры,
вовлечение тяжелых металлов в продукционные процессы
и долговременную иммобилизацию**

Ярусы, фракции фитомассы		Прирост, т/га × год (1) и % (2)		Тяжелые металлы в продукции, г/га × год (1) и % (2)					
				Cu		Zn		Cd	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Древесный ярус	Надземная часть, в том числе в древесине и коре ствола,	3,740 1,451	44,9 17,5	18,382 2,762	40,4 6,1	208,084 24,916	46,5 5,5	1,148 0,287	29,6 7,4
	в том числе в хвое и листьях	1,606	19,3	11,769	25,9	165,927	37,0	0,591	15,2
	Подземная часть, в том числе в тонких корнях	2,374 2,152	28,5 25,9	11,328 10,683	24,7 23,5	121,662 116,476	27,2 26,0	1,407 1,347	36,3 34,7
Подлесок, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы		2,086	25,1	15,288	33,6	115,354	25,8	1,279	33,0
Средняя аккумуляция в ежегодно нарастающем слое торфа (0,218 мм)		0,121	1,5	0,563	1,2	2,811	0,6	0,046	1,2
Итого по фитоценозу		8,320	100	45,471	100	447,911	100	3,880	100

Характерным примером может служить фракция фотосинтезирующих органов: как видно из таблицы 1, в сумме ежегодной продукции на ее долю приходится менее 20 %, тогда как процентные доли накопления тяжелых металлов существенно отличаются от этой цифры – для биофильных меди и цинка свойственна избирательная аккумуляция в хвое и листьях (26–37 % от общего вовлечения в продукционные процессы), а для токсичного кадмия – рассеяние (15 % против 19,3 %). Во фракции тонких корней, наоборот, биофилы – медь и цинк – накапливаются в целом пассивно, а кадмий как элемент с выраженными токсическими свойствами избирательно аккумулируется на корневом барьере¹¹.

Из таблицы 1 также хорошо видно, что древесина по причине низкой зольности накапливает пониженные суммы элементов: для всех рассмотренных ТМ, независимо от потенциальной биофильности и токсичности, получены процентные доли накопления в приросте стволов по диаметру, в 2,5–3,5 раза меньше суммы общей продукции данной фракции (5,5–7,4 % против 17,5 %). Следовательно, фактический вклад прироста стволовой древесины в естественную геохимическую буферность ландшафтов, к сожалению, в несколько раз ниже тех значений, которые можно было бы ожидать, зная лишь общий уровень продуктивности, и причиной этого является низкая зольность древесины. Однако и на этом негативном фоне проявляются геохимические особенности разных элементов: минимальное накопление в древесной золе цинка, максимальное – кадмия и «промежуточное» – меди – определяются особенностями транспортирования данных элементов в проводящих тканях ствола¹².

Аналогичное сопоставление процентных долей для торфяных аккумуляций свидетельствует, что их вклад в иммобилизацию ТМ еще ниже ожидаемого (несмотря на то, что ожидаемая величина и так ничтожно мала). Таким образом, в зольной части торфа по какой-то причине накапливается меньше элементов, чем можно ожидать исходя из масштабов ежегодного

¹¹ Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». 2017. Т. 25, № 2. С. 253–270.

¹² Железнова О.С. Комплексная оценка биогеохимической устойчивости экосистем в условиях техногенеза (на примере подтаежных лесов Южной Мещёры) : дис. ... канд. биол. наук. М., 2017. 292 с.

торфонакопления, что приводит к еще большему снижению вклада торфяных аккумуляций в ассимиляционный потенциал ландшафтов. Данный вклад в 5–9 раз меньше, чем иммобилизующая способность стволов древесных растений, несмотря на отмеченную выше слабую их способность к аккумуляции металлов. Отметим также, что наблюдаемые между изученными элементами различия в «сродстве» к торфяным аккумуляциям (максимум – 1,2 % – для меди и кадмия, минимум – 0,6 % – для цинка) также не случайны, как и для стволовой древесины.

Причина резко сниженных уровней накопления ТМ в золе торфа, а также причина различий между металлами по уровню «сродства» к торфяным аккумуляциям видны из рисунка 3, где сопоставляются средние для района исследований концентрации элементов в минеральной фазе двух генетически взаимосвязанных биообъектов – ежегодно нарастающего торфа и растений-торфообразователей (преимущественно древесных).

Как видно из представленных данных, максимальные – девятикратные – различия в концентрациях зольной части растений и торфа свойственны цинку – типоморфному элементу зональных гумидных ландшафтов. Значительная потребность растений подтаежных экосистем именно в данном биофильном элементе приводит к его изъятию из любых депонирующих и миграционных сред ландшафта и накоплению в биомассе. Этому также способствует достаточно высокая подвижность цинка в природных растворах, его пониженное сродство к комплексообразованию с высокомолекулярной органикой и к специфической сорбции минералами¹³.

Геохимическим аналогом цинка является кадмий. Он сходен с цинком не только по строению валентных электронных оболочек, но и по высокой подвижности, тяготению к ионной форме миграции. Однако между данными элементами имеются и существенные различия: кадмий значительно подвижнее цинка и, в отличие от него, обладает почти нулевой биофильностью. При биологическом поглощении кадмий часто «идет по пути» цинка, но поглощается в основном пассивно¹⁴. Поэтому между содержанием кадмия в золе торфа и растений-торфообразователей, как и в случае с цинком, также имеются заметные различия – данный элемент значительно более интенсивно накапливается в приросте растений, чем в нарастающем торфе. Однако различия эти в 2 раза меньше, чем у цинка, и составляют всего 4,4 раза (против 9 раз у Zn), даже несмотря на более высокую гидрохимическую подвижность кадмия. Следовательно, общий уровень подвижности – далеко не единственный фактор миграции и аккумуляции металлов: при пониженной биофильности накопление элемента растительностью будет снижаться, а торфом, наоборот, относительно возрастать.

¹³ Ладонин Д.В., Марголина С.Е. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами // Почвоведение. 1997. № 7. С. 806–811.

¹⁴ Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем ...

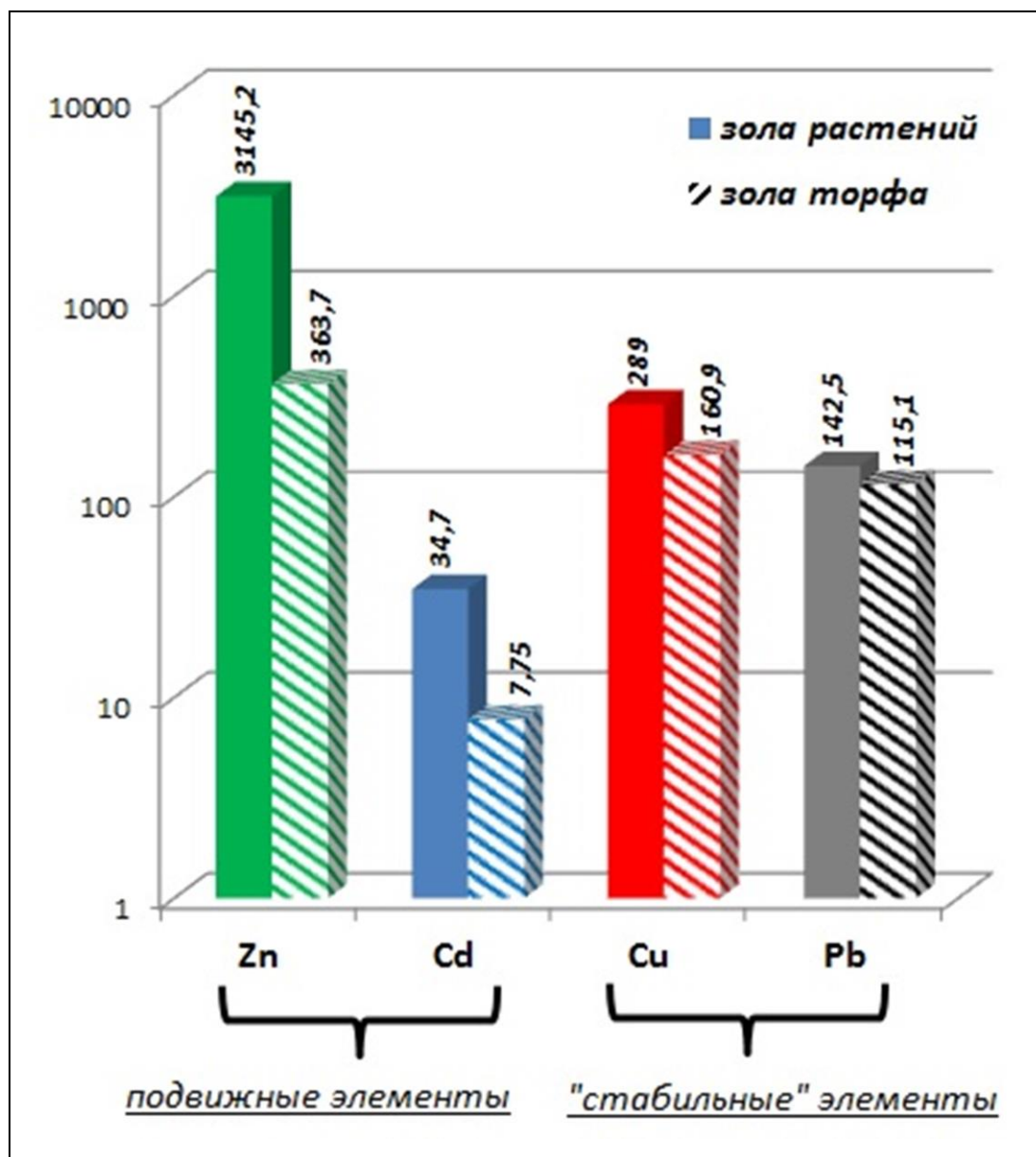


Рис. 3. Различия концентраций тяжелых металлов в золе растений-торфообразователей и в золе торфа, мг/кг

Особую группу элементов составляют медь и свинец, которые способны наиболее прочно закрепляться минеральными и органическими субстратами за счет высокого сродства к специфической сорбции. Особенно эффективно данные элементы иммобилизуются высокомолекулярной органикой¹⁵. Поэтому в торфяных почвах создаются условия для их эффективного закрепления, что позволяет ожидать минимальные различия в их концентрациях между золой торфа и растений. Однако следует учесть, что для Cu и Pb характерны существенные различия в биофильности. В результате различия в накоплении Cu и Pb в золе действительно снижаются в несколько раз в сравнении с цинком и кадмием, но и на этом фоне проявляется специфика меди как элемента-биофила. Для нее сохраняется заметная разница между накоплением в торфе и растительной продукции, достигающая 1,8 раза (в пользу растений). Для Pb, который, как и Cd, обладает нулевой биофильностью, указанная разница снижается, но все же не исчезает полностью и составляет 1,25 раза (также в пользу растений).

Таким образом, накопление элементов в золе торфа – процесс вероятностный и определяется, с одной стороны, степенью гидрохимической подвижности элемента, а с другой – потребностью в нем

¹⁵ Ладонин Д.В., Марголина С.Е. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами.

растений-торфообразователей. Чем выше подвижность и больше биофильность элемента, тем меньше вероятность того, что он подвергнется долговременному изъятию из биогеохимических процессов и на долгие десятилетия законсервируется в минеральной фазе нарастающего торфа. Типичным примером такого элемента является биофильный и типоморфный в подтаежных ландшафтах цинк. Для него характерно наиболее выраженное накопление в биотическом блоке «в ущерб» торфяным аккумуляциям. С другой стороны, низкая миграционная способность и нулевая биофильность, наоборот, благоприятствуют накоплению элемента в торфе. Наиболее показателен в данном случае свинец. При этом фактор гидрохимической подвижности и фактор степени биофильности оказывают сопоставимое влияние на уровень накопления элементов в торфяной золе.

Примечательно при этом, что даже для токсичного и малоподвижного свинца зафиксированы более высокие концентрации в золе растений, чем в золе торфа. Для иных элементов различия еще более существенны в связи с их более высокой биофильностью и/или подвижностью. Следовательно, в условиях крайней бедности природных субстратов Мещёры элементами питания растительный ярус прилагает значительные усилия в поиске данных элементов, вследствие чего их захоронение в депонирующих субстратах, в том числе в торфе, становится крайне затруднительным. При этом химический состав торфяной золы формируется «по остаточному принципу»: происходит ее обогащение наиболее стабильными и наименее биофильными элементами, а подвижные биофилы избирательно аккумулируются в приросте растений. Запас последних в течение долгого времени находится «в подвешенном состоянии» в составе биокруговоротов и не изымается надолго из процессов функционирования ландшафта. Для малоподвижных токсикантов, подобных свинцу, процесс изъятия и долговременного накопления в торфяной толще более вероятен. Но даже в этом случае процесс биопоглощения оказывается более активным, чем иммобилизация в торфяном субстрате.

Следовательно, в торфяниках Мещёры накапливается лишь незначительная часть элементов, которые «уцелели» от вовлечения в биогеохимические процессы и вертикальную водную миграцию. Депонирование в торфе – процесс существенно менее значимый по сравнению с избирательной активностью живого вещества и водным выносом. Исходной причиной этого является крайняя бедность мещёрских почв и почвообразующих пород миграционными формами элементов, а также доступными для выветривания минералами. В этих условиях любой минеральный компонент торфяной толщи подвергается активному преобразованию и теряет значительную часть элементов – в случае, если они доступны для биогенной и водной миграции. Могут накапливаться лишь экзогенные элементы с минимальной подвижностью и биофильностью, но даже и они в существенной своей части – пассивно – вовлекаются в биологическое поглощение. Следовательно, высокая сохранность экзогенных пылевых частиц в торфах Мещёрской низменности крайне маловероятна: они, скорее всего, подвергаются активной геохимической трансформации с целью изъятия миграционных форм элементов. В связи с этим и роль мещёрского торфа как природного планшета, позволяющего изучать временную динамику атмосферных выпадений, также весьма условна. В иных природных регионах с большей трофностью субстратов и большей зольностью торфонакоплений ситуация может быть совершенно иной.

Рассмотрим закономерности вертикального распределения элементов в мещёрских торфяниках. Основной объект исследования – буровой керн в центре Красного болота (рис. 4): максимальная глубина бурения составила 1,7 м. Необходимо подчеркнуть, что торфяная толща существенно неоднородна по строению и химическому составу в связи с длительной и сложной историей развития в течение голоцена. Основные факторы, нарушающие однородность торфяных отложений – это так называемые пограничные горизонты, маркирующие значительные климатические вариации прошлого, когда рост торфяников по той или иной причине приостанавливался под влиянием аридизации климата. В Мещёре встречаются два типа таких пограничных горизонтов: пирогенные и пнёвые.



Рис. 4. Буровой керн торфяника в центре Красного болота, разделенный на фрагменты по 10 см (фото С.А. Тобратова, съемка 20.08.2016 г.)

В верхней части торфяников, которая может быть изучена в ходе ручного бурения и профилирования, преобладают пирогенные горизонты – погребенные под позднейшими торфонакоплениями слои золы и угля, образовавшиеся в ходе масштабных пожаров. Они достаточно хорошо видны на зачищенных стенках почвенных разрезов. Морфологически выраженные горизонты были тщательно нами изучены и датированы, была определена их характерная глубина залегания (рис. 5). Оказалось, что все они приурочены к ксеротермическим климатическим фазам голоцена. Наиболее значительный такой горизонт, расположенный на глубине около 120 см от современной поверхности торфяников, сформировался в ксеротермическую фазу суббореального периода (4,6 тыс. лет назад). Тогда в ходе масштабного природного пожара был уничтожен слой торфа, накапливавшийся 1 тыс. лет до данного катастрофического события, о чем свидетельствуют различия в радиоуглеродных датах выше и ниже указанного горизонта. Глубина и возраст пирогенных горизонтов Мещёры, установленные нами, хорошо увязываются с данными

других исследователей ¹⁶ и не содержат информации, вступающей в противоречие с известными фактами. Однако мы считали принципиально важным ответить на иной вопрос: какова геохимическая специфика данных горизонтов, насколько большую неоднородность они вносят в химический состав торфяной толщи и каковы факторы данной неоднородности.

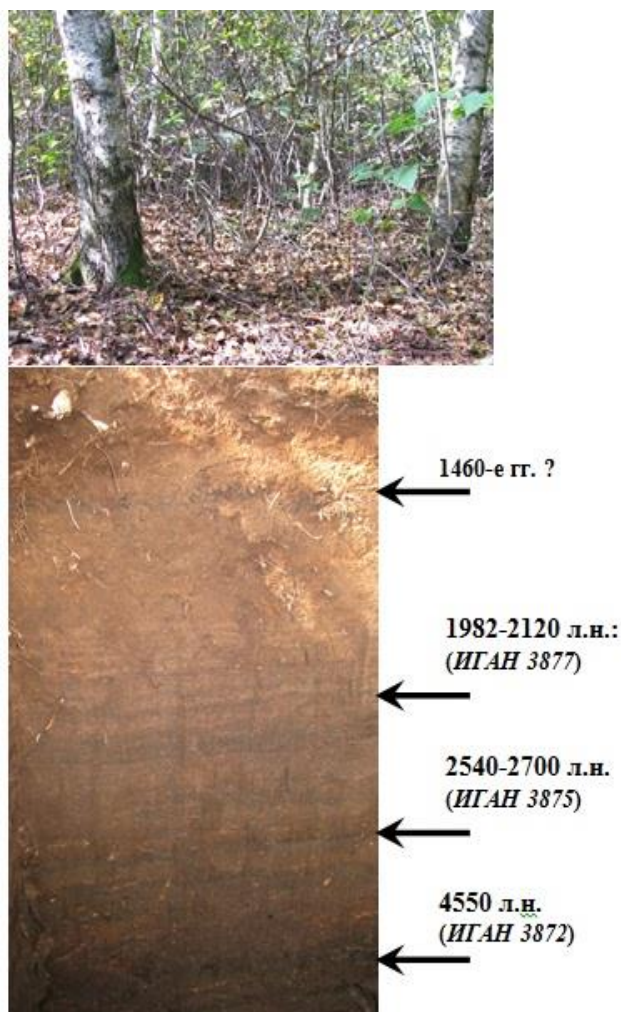


Рис. 5. Пирогенные горизонты в торфянике Емельяново болото с их радиоуглеродными датами (калиброванные данные)

Наиболее значительный пнёвый горизонт расположен на глубине 1,7–2,3 м от поверхности торфяника «Красное болото» (рис. 6). Именно он послужил непреодолимым препятствием для продолжения ручного бурения и ограничил его указанной выше глубиной. Согласно результатам радиоуглеродного датирования и микроморфологического изучения растительных тканей данный горизонт представлен исключительно корнями и комлевыми частями сосны обыкновенной и сформирован в прохладную, но засушливую позднебореальную эпоху (9,2–9,3 тыс. лет назад). Менее значительный и хуже выдержанный по простиранию аналогичный горизонт приурочен к интервалу глубин 55–70 см и соответствует потеплению начала субатлантического периода голоцена (около 2,3 тыс. лет назад).

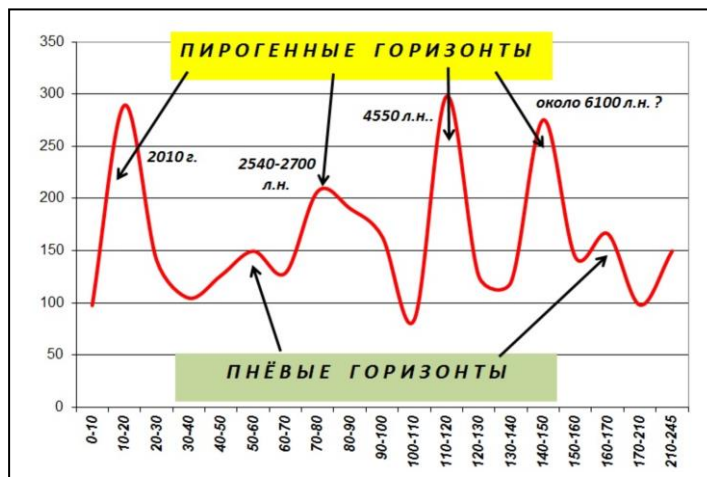
¹⁶ Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М. : Наука, 2005. 223 с.



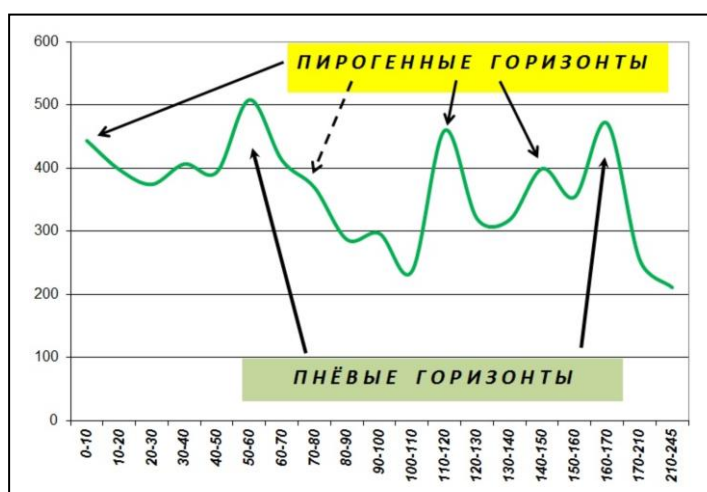
Рис. 6. Пнёвый горизонт на Красном болоте: сформирован в эпоху позднебореального потепления 9230 ± 110 л. н. (ИГАН-3878) (фото И.Ю. Давыдовой)

Следует также подчеркнуть, что в 2010 году на поверхности большинства изученных торфяников сформировался современный пирогенный горизонт, подвергающийся в настоящее время активному геохимическому преобразованию. Как свидетельствуют данные, представленные на рисунке 7, микроэлементный состав золы и углей современного пирогенного горизонта не является уникальным и во многом аналогичен составу более древних горизонтов, особенно суббореального возраста. Наиболее характерный пример в данном случае – медь, обладающая высокой стабильностью в органических почвах. Как видно из рисунка 7а, на вертикальном профиле концентраций меди в торфяной золе фиксируется несколько максимумов аккумуляции, где наблюдается рост концентраций Cu до двух раз относительно средних величин. Наиболее выраженные максимумы характерны для современной поверхности торфяника и глубины 120 см, что соответствует суббореальному пограничному горизонту. Существенно менее выраженные максимумы концентраций меди расположены на характерных глубинах распространения пнёвых горизонтов. Следовательно, для малоподвижной меди именно пирогенное концентрирование является основным фактором аккумуляции в торфянике, а биогенное накопление в сравнении с ним – процесс менее мощный.

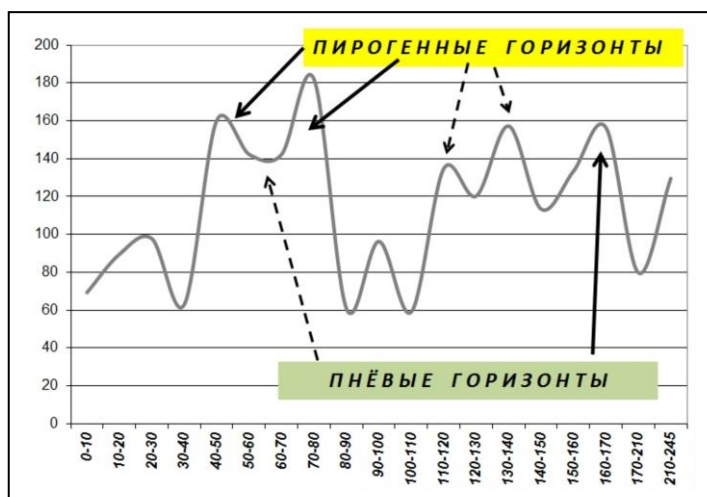
В то же время цинк как биофильный типоморфный элемент кислых гумидных ландшафтов, в отличие от меди, наиболее активно аккумулируется именно в пнёвых горизонтах (рис. 7б). Из пирогенных аккумуляций наиболее значительны горизонты 2010 года и суббореальной ксеротермической эпохи. Они, как и в случае с медью, вполне сопоставимы по концентрациям цинка.



а) медь



б) цинк



в) свинец

Рис. 7. Вертикальное распределение концентраций тяжелых металлов в торфяной толще Красного болота (интервалы глубины, см, концентрации в зольной части торфа, мг/кг)

Закономерности вертикального распределения свинца несколько сложнее (рис. 7в). В частности, в настоящее время наблюдается его активный вынос из пирогенно-торфяного горизонта 2010 года, вследствие чего более древние пирогенные аккумуляции, особенно раннесубатлантические, выражены значительно лучше. В нижней и средней частях торфяника

также заметны биогенные аккумуляции свинца в пнёвых горизонтах, в верхней части – наоборот, гораздо более значительны пирогенные аккумуляции. Анализируя вертикальное распределение свинца в торфянике Красное болото, можно предположить, что данный элемент способен к заметной внутривертикальной миграции (очевидно, в составе высокомолекулярных органо-минеральных комплексов), а древние пирогенные толщи – особенно ближайшие к поверхности – могут выступать в роли сорбента свинца, вымываемого из зольно-угольных отложений 2010 года. По-видимому, свинец благодаря большому сродству к комплексообразованию с органикой¹⁷ обладает значительно большей потенциальной подвижностью в торфяных почвах, чем его частичный геохимический аналог медь и даже цинк. Для меди же, напротив, характерно более стабильное состояние и консервация в древних пограничных горизонтах без заметных потерь.

Представленные на рисунке 7 данные также позволяют оценить сложность и многофакторность вертикального распределения элементов в торфяных толщах. В условиях Мещёрской низменности невозможно достоверно выявить многократно описанную в литературе¹⁸ классическую закономерность об экспоненциальном росте накопления элементов от древних слоев торфяников к современным под влиянием техногенеза. Зафиксированные нами закономерности свидетельствуют, что существуют природные факторы (преимущественно климатическая динамика и ее последствия), приводящие к не менее значительным аккумуляциям элементов и вполне сопоставимые по масштабу с техногенезом.

Высказанные выше предположения об аккумуляции элементов в пограничных горизонтах под влиянием двух различных по природе факторов – как пассивного концентрирования, так и радиального перераспределения – полностью подтверждаются анализом вертикальных закономерностей удельной активности радионуклидов. При этом маркером процесса пассивного пирогенного (или иного) концентрирования может служить изотоп естественного радионуклида ²³²Th. Согласно имеющимся в литературе сведениям¹⁹ торий, в природных условиях не образующий никаких миграционных форм, относится к числу наиболее стабильных в ландшафте элементов. Индикатором процесса вертикальной миграции можно считать радиоцезий (¹³⁷Cs), который является полностью техногенным элементом и по определению не может присутствовать в слоях торфа глубже 1,5–2,0 см без вклада гидрохимической миграции.

Как видно из рисунка 8, вертикальное распределение данных двух принципиально несхожих радионуклидов практически идентично в своих основных чертах и весьма напоминает рассмотренные выше закономерности вертикального распределения Cu. В частности, отчетливо заметна аккумуляция и ²³²Th, и радиоцезия в пирогенных горизонтах 2010 года, суббореальной и позднеатлантической эпох. Раннесубатлантические пирогенные аккумуляции также достаточно заметны, фиксируется даже накопление на верхнем пнёвом горизонте (около 60 см).

¹⁷ Ладонин Д.В., Марголина С.Е. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами.

¹⁸ Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области ; Баденкова С.В., Добродеев О.П., Сухова Т.Г. Распределение свинца в разрезе верховых торфяников как показатель нарастающего загрязнения атмосферы ; Аэрозоли в природных планшетах Сибири ; Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn ...

¹⁹ Кузнецов В.Ю. Радиохронология четвертичных отложений. СПб. : КОМИЛЬФО, 2008. 312 с.

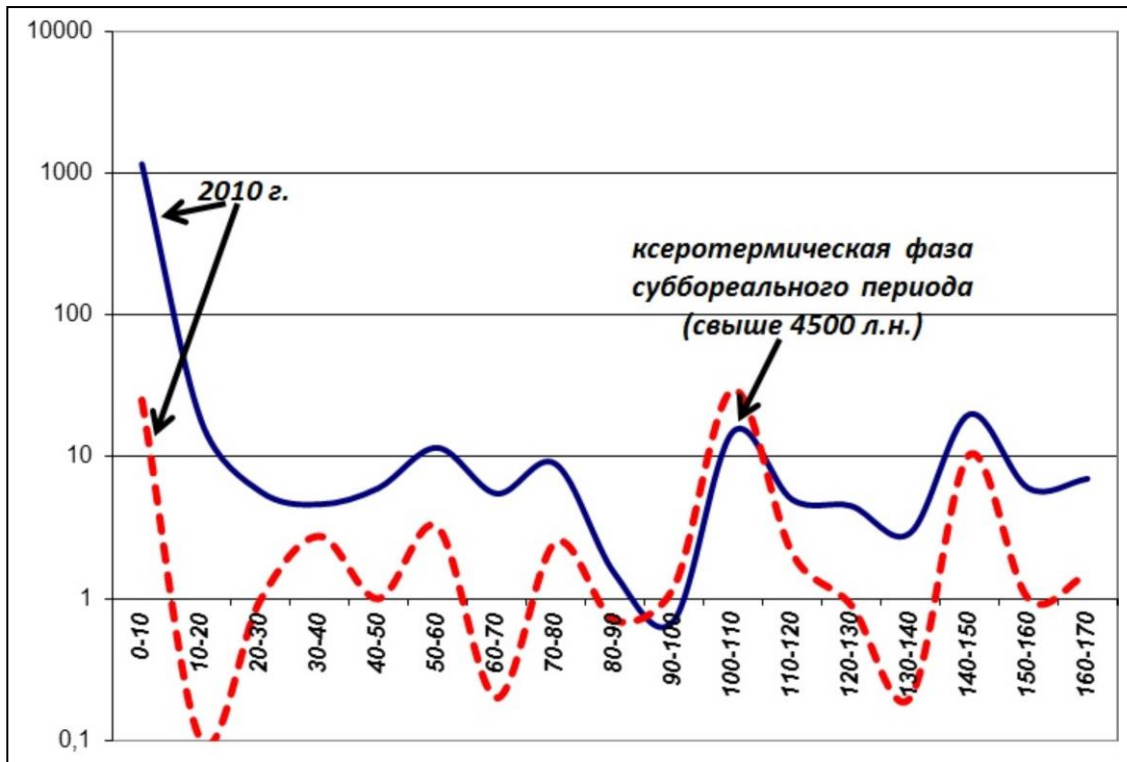


Рис. 8. Вертикальное распределение удельной активности радиоцезия ^{137}Cs (сплошная линия) и тория ^{232}Th (пунктир), Бк/кг торфа

Следовательно, сопоставимыми по значимости факторами накопления элементов в пограничных торфяных горизонтах являются и пирогенное концентрирование (пассивный фактор, индикатор – ^{232}Th), и вертикальная водная миграция (активный фактор, индикатор – ^{137}Cs). Для разных элементов в зависимости от степени их геохимической подвижности вклад каждого из них будет различен, но, скорее всего, ни для одного из них он не будет нулевым. Обнаружение ^{137}Cs в количестве, доступном для приборного определения, даже на глубинах около 2 м, свидетельствует о том, что влияние вертикальной водной миграции на перераспределение элементов может быть достаточно существенным даже в условиях торфяных почв с высокой сорбционной способностью.

И в заключение несколько подробнее остановимся на геохимических последствиях пожаров 2010 года. Решая побочную научную задачу – получение достаточного количества торфяной золы для проведения эксперимента в вегетационных сосудах – мы провели сжигание значительного количества торфа и тем самым смоделировали условия торфяного пожара. Перед проведением сжигания были отобраны смешанные образцы торфа, состоящие из 8–12 индивидуальных проб, определена удельная активность ^{137}Cs и естественных радионуклидов (ЕРН) в образцах, а затем величина зольности. Полученные в разных партиях сжигаемого торфа (идентичных по массе) значения удельной активности и зольности осреднялись. Зная среднюю удельную активность и зольность подвергнутого сжиганию торфа, мы определили ожидаемые значения содержания радионуклидов в торфяной золе и сопоставили их с фактическими значениями, непосредственно зафиксированными в образцах золы после сжигания.

Оказалось, что процесс сжигания оказывает заметное влияние на удельную активность радионуклидов (табл. 2). В частности, содержание геохимически стабильных ЕРН ^{226}Ra и ^{232}Th даже несколько возросло (очевидно, за счет выноса иных элементов). Зафиксирована тенденция выноса с продуктами горения более подвижного ЕРН ^{40}K . Но наиболее существенно то, что при горении торфа в атмосферу мигрировала почти половина исходного запаса техногенного радиоцезия. Результаты эксперимента в очередной раз демонстрируют, насколько опасными могут быть последствия лесоторфяных пожаров в контурах чернобыльского радиоактивного следа. Даже по прошествии 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) ^{137}Cs остается наиболее подвижным из радионуклидов, слабо ассоциированным с почвенным поглощающим комплексом и

при неблагоприятных условиях, особенно при пожарах, активно переходящим в миграционные формы.

Таблица 2

**Масштабы пирогенной трансформации радионуклидов в золе торфа при пожаре
(по результатам модельного эксперимента)**

Показатель	<i>Cs-137</i>	<i>Ra-226</i>	<i>Th-232</i>	<i>K-40</i>
Ожидаемые значения, Бк/кг	2 254,12	26,1	37,68	615,3
Фактические значения, Бк/кг	1 276,9	30,9	41,8	527,2
Разность, %	-43	+18	+11	-14

Таким образом, в условиях Мещёрской природной провинции торфяные почвы (даже верховые) не могут рассматриваться в качестве природных планшетов, обеспечивающих долговременное накопление аэротехногенных загрязнителей, в отличие от иных регионов²⁰. Причиной этого является высокая дефицитность элементов питания в условиях преобладания низкотрофных субстратов и избирательная геохимическая активность биоблока лесных ландшафтов, что обеспечивает пребывание элементов в циклах биогенной миграции и затрудняет долговременное депонирование в нарастающем торфе. В результате микроэлементные композиции золы торфа и растений-торфообразователей становятся резко различными. Накопление ТМ в торфяниках Мещёры – процесс вероятностный и полностью контролируемый биогенной миграцией. При этом наибольшей вероятностью накопления отличаются малоподвижные токсиканты (Pb), наименьшей – подвижные биофилы (Zn). Основные факторы вертикального распределения ТМ в торфяных толщах – накопление на пограничных горизонтах, пирогенных и пнёвых (сформированных в 2010 году, раннесубатлантических, суббореальных и более древних), в том числе в процессе вертикальной водной миграции. Установлено, что пожары являются не только фактором пирогенного концентрирования элементов, но и стимулируют водную и воздушную миграцию наиболее подвижных из них. В частности, при лесо-торфяных пожарах в атмосферу с продуктами горения улетучивается до 43 % накопленного в торфе радиоцезия (при относительной стабильности ЕРН), что свидетельствует об актуальности проблемы вторичного радиоактивного загрязнения ландшафтов чернобыльского следа даже через 30 лет после аварии на ЧАЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ

1. Абрамова, Т.А. Результаты комплексного палеоботанического изучения эволюции ландшафтов Центральной Мещёры в голоцене [Текст] // Ландшафтная школа Московского университета: традиции, достижения, перспективы / под ред. К.Н. Дьяконова, И.И. Мамай. – М. : РУСАКИ, 1999. – С. 96–107.
2. Александровский, А.Л. Эволюция почв и географическая среда [Текст] : моногр. / А.Л. Александровский, Е.И. Александровская. – М. : Наука, 2005. – 223 с.
3. Аэрозоли в природных планшетах Сибири [Текст] / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев [и др.] – Томск : Изд-во ТГУ, 1993. – 157 с.
4. Баденкова, С.В. Распределение свинца в разрезе верховых торфяников как показатель нарастающего загрязнения атмосферы [Текст] / С.В. Баденкова, О.П. Добродеев, Т.Г. Сухова // Вестник МГУ. Сер. 5, География. – 1982. – № 3. – С. 53–58.
5. Железнова, О.С. Комплексная оценка биогеохимической устойчивости экосистем в условиях техногенеза (на примере подтаежных лесов Южной Мещёры) [Текст] : дис. ... канд. биол. наук ; ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» – М., 2017. – 292 с.
6. Железнова, О.С. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов [Текст] / О.С. Железнова, Н.А.

²⁰ Баденкова С.В., Добродеев О.П., Сухова Т.Г. Распределение свинца в разрезе верховых торфяников как показатель нарастающего загрязнения атмосферы ; Аэрозоли в природных планшетах Сибири ; Shotyk W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn ...

- Черных, С.А. Тобратов // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2017. – Т. 25, № 2. – С. 253–270.
7. Козлов, Е.А. Географические особенности изменений скоростей накопления торфа [Текст] // Вестник Брест. ун-та. Сер. 5. – 2011. – № 1. – С. 18–29.
8. Кривцов, В.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области [Текст] : моногр. / В.А. Кривцов [и др.] ; под ред. В.А. Кривцова, С.А. Тобратова. – Рязань : Изд-во РГУ имени С.А. Есенина, 2011. – 768 с.
9. Кузнецов, В.Ю. Радиохронология четвертичных отложений [Текст] : моногр. – СПб. : КОМИЛЬФО, 2008. – 312 с.
10. Ладонин, Д.В. Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами [Текст] / Д.В. Ладонин, С.Е. Марголина // Почвоведение. – 1997. – № 7. – С. 806–811.
11. Межибор, А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области [Текст] : дис. ... канд. геолого-минерал. наук ; Том. политехн. ун-т. – Томск, 2009. – 152 с.
12. Московченко, Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири [Текст] // География и природные ресурсы. – 2006. – № 1. – С. 63–70.
13. Погребняк, П.С. Общее лесоводство [Текст]. – М. : Колос, 1968. – 440 с.
14. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends [Electronic resource] / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. – 2004. – Mode of access : <http://www.icpmapping.org/> (date of access: 28.12.2017).
15. Shotyk, W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland [Text] // Water, air, and soil pollution. – 1996. – N 90. – P. 375–405.

REFERENCES

1. Abramova, T.A. Rezul'taty kompleksnogo paleobotanicheskogo izucheniya ehvolucii landshaftov Central'noj Meshchyory v golocene [Text] // Landshaftnaya shkola Moskovskogo universiteta: tradicii, dostizheniya, perspektivy / pod red. K.N. D'yakonova, I.I. Mamaj. – M. : RUSAKI, 1999. – S. 96–107.
2. Aleksandrovskij, A.L. Ehvoluciya pochv i geograficheskaya sreda [Text] : monogr. / A.L. Aleksandrovskij, E.I. Aleksandrovskaya. – M. : Nauka, 2005. – 223 s.
3. Aehrozoli v prirodnyh planshetah Sibiri [Text] / A.P. Boyarkina, V.B. Bajkovskij, N.V. Vasil'ev [i dr.] – Tomsk : Izd-vo TGU, 1993. – 157 s.
4. Badenkova, S.V. Raspredelenie svinca v razreze verhovyh torfyanikov kak pokazatel' narastayushchego zagryazneniya atmosfery [Text] / S.V. Badenkova, O.P. Dobrodeev, T.G. Suhova // Vestnik MGU. Ser. 5, Geografiya. – 1982. – N 3. – S. 53–58.
5. Zheleznova, O.S. Kompleksnaya ocenka biogeohimicheskoy ustojchivosti ehkosistem v usloviyah tekhnogeneza (na primere podtaezhnyh lesov Yuzhnoj Meshchyory) [Text] : dis. ... kand. biol. nauk / O.S. Zheleznova ; FGAOU VO "Rossijskij universitet druzhby narodov" – M., 2017. – 292 s.
6. Zheleznova, O.S. Cink i kadmij v fitomasse drevesnyh rastenij lesnyh ehkosistem: zakonomernosti translokacii, akumuljucii i bar'ernyh mekhanizmov [Text] / O.S. Zheleznova, N.A. Chernyh, S.A. Tokratov // Vestnik RUDN. Seriya "Ehkologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti". – 2017. – T. 25, N 2. – S. 253–270.
7. Kozlov, E.A. Geograficheskie osobennosti izmenenij skorostej nakopleniya torfa [Text] // Vestnik Brest. un-ta. Ser. 5. – 2011. – N 1. – S. 18–29.
8. Krivcov, V.A. Prirodnyj potencial landshaftov Ryazanskoj oblasti [Text] : monogr. / V.A. Krivcov [i dr.] ; pod red. V.A. Krivcova, S.A. Tokratova. – Ryazan' : Izd-vo RGU imeni S.A. Eсенина, 2011. – 768 s.
9. Kuznecov, V.Yu. Radiohronologiya chetvertichnyh otlozhenij [Text] : monogr. – SPb. : KOMIL'FO, 2008. – 312 s.
10. Ladonin, D.V. Vzaimodejstvie guminovyh kislot s tyzhelymi metallami [Text] / D.V. Ladonin, S.E. Margolina // Pochvovedenie. – 1997. – N 7. – S. 806–811.
11. Mezhibor, A.M. Ehkogeohimiya ehlementov-primesej v verhovyh torfah Tomskoj oblasti [Text] : dis. ... kand. geologo-mineral. nauk ; Tom. politekhn. un-t. – Tomsk, 2009. – 152 s.
12. Moskovchenko, D.V. Biogeohimicheskie osobennosti verhovyh bolot Zapadnoj Sibiri [Text] // Geografiya i prirodnye resursy. – 2006. – N 1. – S. 63–70.
13. Pogrebnyak, P.S. Obshchee lesovodstvo [Text]. – M. : Kolos, 1968. – 440 s.
14. Manual on Methodologies and Criteria for Modeling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends [Electronic resource] / UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. – 2004. – Mode of access : <http://www.icpmapping.org/> (date of access: 28.12.2017).

15. Shotyk, W. Natural and anthropogenic enrichments of As, Cu, Pb, Sb and Zn in ombrotrophic versus minerotrophic peat bog profiles, Jura Mountains, Switzerland [Text] // Water, air, and soil pollution. – 1996. – N 90. – P. 375–405.

S.A. Tobratov, O.S. Zheleznova, A.V. Vodorezov

**LANDSCAPE GEOCHEMISTRY OF MODERN
AND ANCIENT PEAT ACCUMULATION IN MESCHERA**

The article assesses peat accumulation (a natural process promoting a long-term extraction of toxic elements from migration flows) in natural buffer zones of Meschera lowland and anthropogenic contamination of heavy metals (HM). The article maintains that even widely spread peat soils cannot secure high heavy metal assimilation potential, which is 5–9 times lower than heavy metal accumulation in wood and bark, and 70–150 times lower than heavy metal concentrations in recirculated flows. Peat-sand substrates of Meschera promote active heavy metals involvement in biogenic migration, hence heavy metal accumulation in peat soils is rather low. Static toxic elements (Pb) demonstrate the greatest accumulation potential in peat soils, while dynamic biophiles (Zn) demonstrate the lowest accumulation potential in peat soils. The major factors of vertical HM distribution in peat soils is the accumulation in pirogenic layers, stumps (2010), early Sub-Atlantic layers, Subboreal layers, and more ancient layers, including vertical water migration. All this complicates the investigation of aerotechnogenic contamination of peat soils in Meschera. The amount of radio-caesium released into the atmosphere from peat and forest fires reaches 43 %, with radionuclides relatively stable.

peat soils, heavy metals, radio-caesium, natural radionuclide, pirogenic soils, aerotechnogenic pollution, critical loads, Meschera lowland.