

Роль лесной подстилки в миграции химических элементов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах в Сибири

Б. Л. ЩЕРБОВ

*Институт геологии и минералогии СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3
E-mail: boris@igm.nsc.ru*

АННОТАЦИЯ

При изучении поведения химических элементов и искусственных радионуклидов во время лесных пожаров важнейшее из всех компонентов лесного биогеоценоза значение имеют лесные подстилки. Повсеместное их распространение, активные биогеохимические процессы, протекающие в них из-за постоянно поступающего органического материала, высокие депонентные свойства по отношению к выпадающим из атмосферы химическим компонентам – все эти качества ставят лесные подстилки в ряд природных объектов, играющих исключительную роль биогеохимического барьера на пути миграции элементов в лесных ландшафтах. Изучение распределения химических элементов в подстилке и степени ее выгорания при лесных пожарах позволяет выделить группу элементов, мигрирующих из пожарища, и количественно определить степень их выноса.

Ключевые слова: лесные пожары, лесная подстилка, тяжелые металлы, искусственные радионуклиды, миграция.

По оценкам ООН, ежегодно на Земле лесными пожарами охватывается 650 млн га. В Сибири, где сосредоточено около 80 % (552 млн га) всего лесного массива России, ежегодно возникает 30 тыс. пожаров. За пожарный период сгорает приблизительно 20 млн т биомассы и в атмосферу выбрасывается 2 млн т продуктов горения. Приблизительная площадь лесных пожаров составляет около 5 млн га, а пожаров всех видов растительности – около 10 млн га [1]. По другим данным, в бореальных лесах России пожары могут происходить на площади в 12 млн га [2]. Наши наблюдения последних 10 лет в Западной Сибири и Байкальском регионе дают основание считать эту оценку вполне вероятной.

Исследования Global Fire Monitoring Centre показывают, что общая площадь, пройден-

ная природными пожарами в России на начало августа 2010 г., превышала 15 млн га (данные со спутниковых станций слежения за пожарами MODIS, NOAD и Landsat). Горение лесов продолжалось и в сентябре как в европейской, так и в азиатской части нашей страны. Дымовая завеса над европейской частью России распространилась на огромную территорию (фото 1). По данным главы Департамента здравоохранения Москвы на 9 августа 2010 г., из-за лесных и торфяных пожаров смертность в Москве достигла уровня примерно 700 человек в день, тогда как в обычные дни она составляет 360–380 человек в день. Особой строкой следует выделить гибель людей при тушении лесных пожаров.

Данные Государственного доклада о состоянии окружающей среды Читинской области за 1997–2000 гг. свидетельствуют, что на ее территории выгорело около 650 тыс. га.

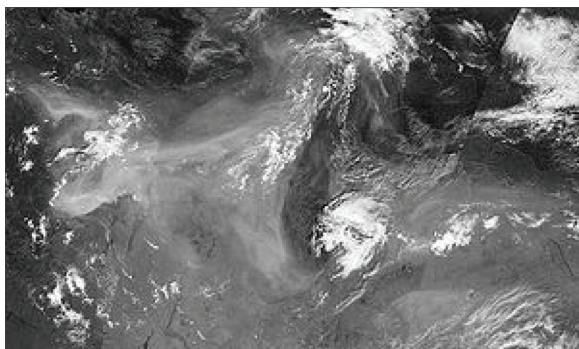


Рис. 1. Дым над европейской территорией России 4 августа 2010 г. (<http://ru.wikipedia.org/wiki/>)

В 1996–1998 гг. на Алтае произошло 4942 лесных пожара [3]. Наблюдения по годичным кольцам деревьев показывают, что в ленточных борах Алтайского края за 270 лет на одной и той же площади пожары повторялись 11 раз [4]. Убытки, наносимые народному хозяйству лесными пожарами, исчисляются сотнями миллионов рублей.

Причинами лесных пожаров служат “сухие” грозы, беспечность, а иногда и преступные действия людей. Человеческий фактор давно приобрел доминирующее значение. Например, освоение Сибири сопровождалось повышением частоты пожароопасных сезонов по схеме: XVII–XVIII вв. – 2–3 раза в столетие, XIX в. – 11–26 раз, XX в. – 2–3 раза за 10 лет [1].

В Байкальском регионе прилегающие к городам лесные массивы в абсолютном большинстве случаев представляют собой удручающее зрелище: лесными пожарами выжжены огромные площади, чему, по нашему мнению, способствует стремительное развитие автотранспорта в России, а это влечет за собой нашествие людей в леса. Поэтому ранее недоступные лесные уголья оказываются под мощным антропогенным прессом. К этому необходимо добавить хищнические поджоги, что особенно широко развито в восточных регионах нашей страны и, к сожалению, нередко встречается в Западной Сибири. Поэтому мы склонны относить лесные пожары не просто к природным, как это принято в настоящее время, а к природно-антропогенным факторам.

Приведенные примеры можно продолжать, однако и этих более чем достаточно, чтобы считать лесную пожарную ситуацию,

сложившуюся в нашей стране, общегосударственной проблемой повышенной важности.

Подчеркнем также, что количество пыли и аэрозолей, ежегодно поставляемое лесными пожарами в атмосферу, сопоставимо с выбросами вулканов (соответственно 20–150 и 10–200 млн т) [5].

В грубой схеме лесные пожары подразделяются на низовые, верховые и подземные (почвенные). Последний тип в наших исследованиях отсутствует.

При **низовом пожаре** сгорают лесная подстилка, лишайники, мхи, травы, опавшие на землю ветки и т. п. Высота пламени до 2,5 м, нагар на стволах деревьев может достигать 8 м и более. Скорость распространения 0,5–5 км/ч. Температура горения около 700 °С (иногда выше). Низовые пожары бывают беглые и устойчивые. При беглом низовом пожаре сгорают верхняя часть напочвенного покрова, подрост и подлесок. Такой пожар распространяется с большой скоростью, обходя места с повышенной влажностью, поэтому часть площади остается не затронутой огнем. Беглые пожары в основном происходят весной, когда просыхает лишь самый верхний слой мелких горючих материалов.

Устойчивые низовые пожары распространяются медленно, при этом полностью выгорают живой и мертвый напочвенный покров, сильно обгорают корни и кора деревьев, полностью сгорают подрост и подлесок.

Верховой лесной пожар охватывает листья, хвою, ветви и всю крону, может охватить (в случае повального пожара) травяно-моховой покров почвы и подрост. Скорость распространения от 5 до 30 км/ч. Температура 900–1200 °С. Верховой пожар – это обычно завершающаяся стадия пожара. Область распространения контролируется направлением ветра, который в некоторых случаях может стремительно менять свое направление из-за перепада температур над пожарищем и свежей площадью. Верховые пожары, как и низовые, могут быть беглыми (ураганскими) и устойчивыми (повальными). При повальном пожаре лес выгорает полностью.

При верховых пожарах образуется большая масса искр из горящих ветвей и хвои, летящих перед фронтом огня и создающих низовые пожары за несколько десятков, а в

случае ураганного пожара – за несколько сотен метров от основного очага. Такой вид пожаров чаще всего наблюдался в России летом 2010 г.

Следует отметить, что в большинстве случаев обследованные нами объекты содержат в себе на одной площади следы абсолютно всех разновидностей лесных пожаров – от беглых низовых до верховых поавальных. Это зависит от различного состояния лесных горючих материалов (ЛГМ) и ландшафтных особенностей отдельных участков пожара. Иногда даже при верховых пожарах на гаях остаются участки небольших размеров, не затронутые огнем.

К лесным горючим материалам относятся лесные подстилки, мхи, лишайники, в меньшей степени травы, хвоя и кора деревьев, а также древесина. Особое значение для наших исследований имеют лесные подстилки.

Лесная подстилка (горизонт 0) – это слой разлагающегося органического вещества (35 % по массе, более 70 % по объему) с примесью минеральных компонентов. Мощность ее в районах наших исследований редко превышает 20 см. В ленточных борах Обь-Иртышского междуречья нами отмечено устойчивое уменьшение мощности подстилок от северо-восточного окончания к юго-западному.

В подстилках выделяют три подгоризонта: верхний (*L*) представлен свежим опадом с практически полным сохранением своей исходной формы; средний (*F*) с частично сохранившимися растительными остатками. В нем происходят интенсивные процессы разрушения опада и начинается синтез гумусового вещества; в подгоризонте *H* исчезают видимые следы растительных остатков, происходит дальнейший синтез и закрепление гумусовых веществ. К нижним уровням подстилки равномерно увеличивается содержание минеральной компоненты, о чем свидетельствует повышение зольности в ее вертикальном разрезе (см. ниже рис. 3). Поэтому резкую границу между подгоризонтами провести трудно.

В лесных сообществах подстилки играют весьма существенную роль. С одной стороны, они служат субстратом для прорастания семян лесных растений, источником и потенциальным резервом биогенных веществ и многих водорастворимых органических соеди-

нений, что обуславливает формирование специфической среды в ризосферной зоне подраста, с другой – подстилка является самым важным биогеохимическим барьером на пути миграции химических элементов в лесном биогеоценозе. Кроме того, подстилки, имея повсеместное распространение, горят при любом типе пожара и в той или иной степени становятся причиной атмосферной миграции элементов или перераспределения их по выгоревшей площади. Геохимический состав подстилок во многом определяется почвами и почвообразующими породами.

Атмосферные источники тяжелых металлов в лесных подстилках многочисленны и подразделяются на природные (вулканическая деятельность, эрозия почв, космическая пыль и т. д.) и антропогенные (металлургическая и химическая промышленность, автотранспорт, сжигание всех видов топлива, бытовые отходы и т. п.). Источником техногенных радионуклидов в Северном полушарии служат атмосферные выпадения от аварий на комбинатах по производству ядерного топлива, атомных электростанциях, военных кораблях и самолетах, а также от испытания ядерных устройств на полигонах США, СССР и Китая. Антропогенная эмиссия для многих тяжелых металлов к концу XX в. превысила природную: коэффициент мобилизации (отношение антропогенных выбросов к природным) для Pb составляет 16, Cd – 7,7, Zn – 5,5, Cu – 7, Hg – 0,3, Sb – 34 [5].

Невысокая величина коэффициента у ртути (0,3) должна свидетельствовать в пользу доминирования природного фактора, но некоторые сведения резко противоречат ей: в начале 80-х гг. XX в. антропогенная эмиссия этого элемента превысила природную почти в 1,5 раза (3600 и 2500 т соответственно) [6]. По-видимому, последнее определение более верно, поскольку даже в атмосферном бюджете Сибири, которая не может сравниться масштабами техногенного загрязнения с европейской частью нашей страны и развитыми странами Европы и Америки, антропогенная составляющая ртути (340 т/год) почти в 5 раз превышает природную (70 т/год) [7].

Основными источниками глобального переноса тяжелых металлов в Сибири служат Норильский комплекс, область Кузнецкого бассейна, Байкальский и Якутский регионы [8].

Наиболее сильным вмешательством в природу Сибири в XX в., несомненно, следует признать радиоактивные выбросы от испытаний устройств на ядерных полигонах. Небезопасными оказались и так называемые “мирные” (подземные) взрывы. Основная часть из 500 произведенных в СССР таких испытаний выполнена на территории Сибири. Некоторые из них заканчивались аварией, что приводило к дополнительному загрязнению природной среды радиоактивными продуктами. Заметный вклад в загрязнение Сибири, особенно ее восточных районов, внесли ядерные испытания на Лобнорском ядерном полигоне в Китае, проводившиеся с 1964 по 1980 г., кое-что добавили Чернобыль и химические комбинаты по производству ядерного топлива в Красноярске и Томске. Таким образом, вся огромная территория Сибири в течение длительного времени подвергалась радиоактивному загрязнению. Основная часть радиоактивности, заключавшаяся в многочисленных короткоживущих изотопах, уже прекратила свое существование в результате распада, но стронций-90, цезий-137 (период полураспада около 30 лет) и изотопы плутония (около 24 тыс. лет) еще сохраняются в компонентах лесного биогеоценоза в значительных количествах.

Выпадавшие из атмосферы химические элементы и радиоактивные изотопы с различной степенью прочности закреплялись во всех компонентах лесного биогеоценоза. Это метастабильное состояние нарушается не только естественными миграционными процессами, но и лесными пожарами, признанными большинством исследователей мощным фактором преобразования природы.

Цель наших исследований – определение масштабов атмосферной миграции химических элементов при лесных пожарах, но, как будет показано ниже, без обсуждения роли лесной подстилки в этих процессах решение наших задач не представляется возможным.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В период 2000–2010 гг. в некоторых регионах Сибири и Восточного Казахстана (рис. 2) обследовано 25 объектов, представленных пожарищами разного возраста, размера и происхождения – от низовых беглых до по-

вальных верховых пожаров. Некоторые пожарища обследованы сразу после пожара, другие – через несколько лет после их образования, а на некоторых уже проведены рекультивационные работы по восстановлению лесных насаждений.

Банк данных по содержанию элементов в различных компонентах биогеоценоза (лесных подстилках, мхах, лишайниках, хвойном опаде, коре, древесине, травах и лесном подросте) основывается на сборе материалов в республиках Алтай, Бурятия, Тыва, Саха (Якутия), Ямало-Ненецком, бывших Усть-Одынском и Агинском бурятских автономных округах, Алтайском крае, Новосибирской, Томской, Кемеровской и Иркутской областях.

Список элементов и радионуклидов включает в себя Hg, Cd, As, Sb, Mn, Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Co, V, Mg, U, Th, K, ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$. Концентрация микро- и макроэлементов определена методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в вариантах пламенной и электротермической атомизации (ртути – методом “холодного пара”), искусственные и естественные радионуклиды – гамма-спектрометрическим методом, в некоторых случаях – методом ППДгамма-спектрометрии на колодезном детекторе, а также альфа- и бета-радиометрии. Все аналитические работы выполнены в лаборатории № 216 Института геологии и минералогии СО РАН. Данные анализов приведены в расчете на воздушно-сухое состояние вещества.

Отбор проб для определения миграции элементов проводился стандартным стальным кольцом (диаметр 82, высота 50 мм), применяемым при экогеохимических исследованиях, по трансекте “наветренная сторона → пожарище → подветренная сторона”. Расстояние между точками отбора контролировалось размерами пожарища, а длина трансекты – изменениями ландшафтных условий: при их одинаковых условиях достаточным считался отбор 10–12 проб за пределами гари. Опробование вертикальных разрезов лесных подстилок для определения характера распределения элементов производилось через 1 см.

Основная задача наших исследований – количественное определение миграции элементов при лесных пожарах на конкретных объектах – решалась сравнением концентраций эле-



Рис. 2. Схема расположения районов работ

ментов на фоновых (прилегающих к пожарщику с наветренной стороны) и выгоревших площадях. Для решения более широких вопросов привлечен наш банк данных по содержанию элементов в различных компонентах лесного биогеоценоза из всех перечисленных выше районов, а также литературные данные.

Объемы лесной подстилки подсчитывали в более чем 50 точках ленточных боров Обь-Иртышского междуречья путем сбора материала с площадок 30×30 или 50×50 см и измерения ее мощности, высушивания и взвешивания. Полученные нами данные ($10,8$ т/га) почти не отличаются от средних показателей, приводимых в литературе, – 11 т/га [9]. К этим значениям следует добавить лесной подрост (травы, кустарники), который в среднем составляет не менее

5 т/га. В некоторых районах Средней Сибири запасы подстилки могут достигать 30 т/га и более [10].

Величина плотности лесных подстилок в воздушно-сухом состоянии колеблется в широком диапазоне – от $0,173$ до $0,460$ г/см³, составляя в среднем $0,28$ г/см³. Для кустистых лишайников и зеленых мхов это значение на порядок ниже – $0,018$ и $0,046$ г/см³ соответственно. С мхов и лишайников, как самых легковоспламеняющихся компонентов, начинаются лесные пожары. Влажность этих растений зависит от влажности воздуха, и для полного их увлажнения достаточно $2,5$ мм осадков, но уже на второй день после дождя она падает до 40 – 50 % и они способны гореть. При этом лишайники высыхают быстрее и горят лучше зеленых мхов [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предпочтительную роль лесной подстилки для решения наших задач усиливает повышенное среди всех наземных ЛГМ среднее содержание в ней тяжелых металлов и искусственных радионуклидов, а также их распределение в ее вертикальном разрезе (табл. 1, 2, 3, рис. 3).

Аналитические данные свидетельствуют о весьма значительном разбросе значений как для определенного компонента, так и для различных регионов. В отношении искусственных радионуклидов отчетливо выделяются Ямало-Ненецкий АО и Алтайский регионы, что видно на примере повышенных величин удельной активности ^{137}Cs . Несомненно, это явление связано с близостью первого из них к Новоземельскому, а второго — к

Семипалатинскому испытательным ядерным полигонам. Региональные средние содержания тяжелых металлов и других элементов между собой разнятся незначительно, но внутри одной выборки для конкретного компонента содержания варьируют в широком диапазоне, что связано с локальными геохимическими особенностями ландшафтов обследованных районов.

Эти данные важны при проведении подсчетов миграции элементов, однако для изучения их поведения при лесных пожарах не менее важно и распределение их в вертикальном разрезе лесных подстилок, мхов и лишайников. Как уже отмечено, степень выгорания наземных ЛГМ зависит от типа пожара.

Поскольку основное количество элементов сосредоточено в средних и нижних интервалах перечисленных наземных ЛГМ (см.

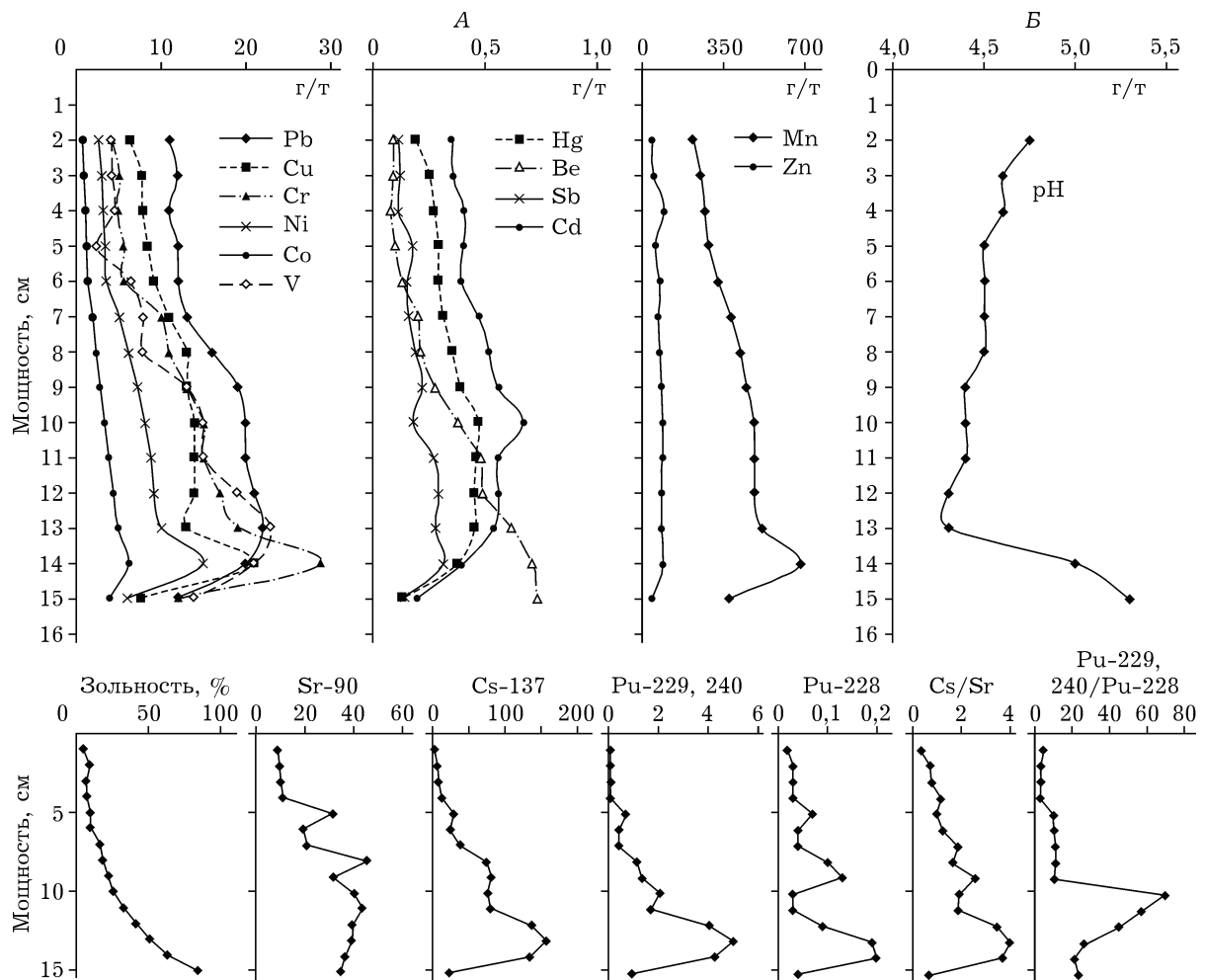


Рис. 3. Типичный пример распределения химических элементов (А) и повышения зольности (В) в вертикальном разрезе лесной подстилки

Среднее содержание естественных (г/т) и искусственных (Бк/кг) радионуклидов в компонентах лесного биогеоценоза

Показатель	U(Ra)	Th	K	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	^{238,240} Pu
<i>Лесные подстилки</i>						
<i>n</i>	233	231	162	59	236	54
Min	0,16	0,20	0,05	11	15	0,27
Max	6,5	7,70	1,30	88	392	5,46
<i>X</i>	1,13	1,92	0,57	30	112,9	1,93
<i>S</i> ²	0,73	1,11	0,29	16	63,9	1,66
<i>Лишайники</i>						
<i>n</i>	385	382	384	–	390	–
Min	0,00	0,01	0,01	–	2	–
Max	3,70	3,8	1,30	–	402	–
<i>X</i>	0,73	0,65	0,24	–	55,2	–
<i>S</i> ²	0,41	0,60	0,18	–	52,1	–
<i>Мхи</i>						
<i>n</i>	323	323	326	–	326	–
Min	0,10	0,00	0,12	–	0	–
Max	5,40	4,10	1,12	–	216	–
<i>X</i>	1,25	1,24	0,43	–	61	–
<i>S</i> ²	0,91	0,84	0,19	–	56,6	–
<i>Травы</i>						
<i>n</i>	163	153	163	–	163	–
Min	0,00	0,00	0,12	–	0	–
Max	3,70	2,70	2,81	–	9	–
<i>X</i>	0,70	0,69	1,09	–	1	–
<i>S</i> ²	0,74	0,68	0,63	–	2	–
<i>Хвоя</i>						
<i>n</i>	228	228	231	–	231	–
Min	0,00	0,00	0,00	–	0	–
Max	3,00	2,80	0,98	–	12	–
<i>X</i>	0,72	0,46	0,39	–	3	–
<i>S</i> ²	0,69	0,50	0,19	–	3,7	–

П р и м е ч а н и е. В графе ⁹⁰Sr и ^{239,240}Pu для всех компонентов биогеоценоза, за исключением лесных подстилок, данных недостаточно для получения средних значений. Здесь и в табл. 3 *n* – количество проб, *X* – среднее содержание, *S*² – среднеквадратичное отклонение. Прочерк – нет данных.

рис. 3), то сгорание их верхних частей (беглые низовые пожары) может способствовать миграции лишь незначительной части содержащихся в них химических элементов. Основное же количество их вступает в миграцию только при сильных пожарах, когда лесная подстилка выгорает полностью (устойчивые низовые или повальные пожары).

Из приводимых рисунков видно, что концентрация большинства элементов и искусственных радионуклидов увеличивается по

мере нарастания интенсивности синтеза гумусового вещества и достигает максимума на границе подстилки с подстилающим песком, в котором их содержание падает до минимума. Из этой закономерности отчетливо выпадают ртуть и кадмий, максимальная концентрация которых зафиксирована на глубине 10 см. Сорбция всех соединений ртути положительно коррелирует с *C*_{орг} и катионообменной емкостью почв, а также зависит от величины pH, достигая наибольшей интен-

Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг) в ЛГМ из различных регионов

Компонент	Республика Алтай	Республика Саха (Якутия)	Республика Тыва	ЯНАО	Новосибирская обл.	Байкальский регион
Почвы	50,2(100)	24,7(40)	64,2(57)	75,6(75)	60,4(62)	33,1(123)
	1–187	2–78	4–150	3–914	1–168	28–128
Лесные подстилки	101(51)	112,6(41)	119(22)	193,3(36)	130(8)	67,7(78)
	5–550	3–331	44–229	42–615	94–203	0–311
Лишайники	50,8(61)	35,2(33)	–	121(145)	–	39,3(152)
	15–150	5–101	–	9–576	–	0–402
Мхи	129,5(92)	22,1(41)	129(35)	88(64)	180(31)	36,2(63)
	1–570	0–67	21–274	5–349	3–575	0–157
Хвоя	2(40)	0,3(7)	1,6(8)	67(56)	4,3(12)	3,0(108)
	0–9	0–2	0–12	6–384	1–11	0–22
Кустарники	9,8(29)	0,2(5)	–	32,1(7)	–	2,1(14)
	0–29	0–1	–	15–54	–	0–16
Трава	1,4(180)	0,9(13)	2,5(26)	14(26)	2,8(19)	4,3(12)
	0–27	0–3	0–18	0–76	0–8	0–18

П р и м е ч а н и е. Верхняя строка – среднее, в скобках – количество разрезов (почвы, подстилки) или проб (лишайники, мхи, хвоя, кустарники, травы), нижняя строка – пределы активности ^{137}Cs . Байкальский регион включает в себя Читинскую область с Агинским Бурятским АО и Иркутскую область с Усть-Ордынским Бурятским АО. Прочерк – нет данных.

сивности при значениях 4–5. Аналогичная зависимость отмечается и у кадмия [12]. Измерение рН в суспензионных препаратах разреза лесной подстилки по опубликованной методике [13] показало изменение величины этого параметра именно в ранге 4,4–4,7 с резким повышением значения до 5,3 на границе с песками. Аналогичное распределение рН в профилях подстилки отмечалось нами ранее и в других регионах Сибири [14]. Даже в таком узком диапазоне величин рН заметна ее обратная связь с содержанием ртути, кадмия, радиостронция, радиоцезия и некоторых других элементов, что особенно четко наблюдается в самых нижних интервалах разреза подстилки.

Судя по схожести графиков распределения искусственных изотопов ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$, оба они не являются активными мигрантами в лесных подстилках. Повышение их удельной активности к низам разреза может быть связано как с процессами миграции (сорбционные свойства подстилки увеличиваются по мере разложения опада), так и с накоплением хвои и другого органического материала, в котором количество этих радионуклидов падало после прекращения

открытых испытаний на Семипалатинском ядерном полигоне (конец 1962 г.). Совершенно очевидно, что и для остальных элементов подходит подобный механизм процессов, ведущих к распределению их в профиле лесной подстилки.

Из общего для всех элементов и радионуклидов характера поведения в вертикальном разрезе подстилки с резким падением их концентраций на границе с песками выпадает ^{90}Sr (активный мигрант в гипергенных процессах) из-за заметного содержания в самом низу разреза. Механизм задержания ^{90}Sr в песках неясен, поскольку они не содержат поглощающего комплекса. Можно было бы предположить его задержание на песчаных зернах с пленками органического вещества (что часто отмечается в почвах), однако такое поведение скорее подошло бы для ^{137}Cs , чего в нашем случае не происходит.

Миграция элементов в подстилках зависит от многих факторов, среди которых главными являются их источники, интенсивность биологического поглощения и полифункциональные характеристики почвенно-геохимических барьеров [15, 16], в частности сорбци-

Среднее содержание микроэлементов в компонентах биогеоценоза

№ п/п	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Sb	V	Hg
<i>Лесные подстилки</i>											
<i>n</i>	156	153	144	154	152	153	156	164	140	160	162
Min	0,007	1,6	0,7	7	24	0,9	0,7	0,2	0,02	1,8	0,012
Max	0,77	34,0	18,0	108	2727	42,0	15,0	8,0	0,590	33,0	0,310
<i>X</i>	0,248	16,3	9,9	56	769	16,3	7,4	3,4	0,221	15,2	0,123
<i>S</i> ²	0,180	8,8	3,4	25	500	8,8	3,3	1,5	0,118	7,2	0,065
<i>Лишайники</i>											
<i>n</i>	138	130	135	137	133	135	134	137	129	140	130
Min	0,010	0,9	0,7	3	7	0,3	0,6	0,07	0,03	0,5	0,015
Max	0,410	34,0	10,0	47	345	14,0	4,5	2,0	0,940	11,0	0,190
<i>X</i>	0,181	10,9	4,4	24	119	5,5	2,1	0,72	0,167	4,6	0,064
<i>S</i> ²	0,106	8,3	2,2	9	85	3,8	0,9	0,44	0,200	2,5	0,031
<i>Мхи</i>											
<i>n</i>	112	112	111	111	108	102	111	110	84	80	110
Min	0,020	1,1	1,2	7	54	0,3	0,5	0,04	0,02	0,20	0,019
Max	0,790	32,0	12,0	70	1128	20,0	14,7	4,00	0,34	13,00	0,260
<i>X</i>	0,256	11,5	6,4	41	398	6,9	3,7	1,26	0,12	5,56	0,103
<i>S</i> ²	0,161	6,6	2,2	13	228	4,2	2,5	0,74	0,07	3,00	0,048
<i>Травы</i>											
<i>n</i>	54	55	57	57	55	54	53	54	55	22	52
Min	0,010	0,2	1,7	9	8	0,2	0,3	0,02	0,02	0,10	0,001
Max	0,500	3,5	14,0	63	275	10,0	8,8	0,80	0,37	1,80	0,076
<i>X</i>	0,097	1,2	5,1	24	90	2,8	1,7	0,18	0,06	0,54	0,019
<i>S</i> ²	0,083	0,8	3,0	14	66	2,7	1,5	0,15	0,07	0,48	0,011
<i>Хвоя</i>											
<i>n</i>	163	159	156	163	160	156	155	150	159	93	149
Mix	0,009	0,10	0,7	8	40	0,1	0,2	0,01	0,010	0,00	0,001
Max	0,500	7,00	5,9	84	987	5,5	7,5	0,70	0,260	1,20	0,210
<i>X</i>	0,094	1,42	3,0	34	366	1,2	1,4	0,19	0,068	0,51	0,024
<i>S</i> ²	0,111	1,06	1,0	15	217	1,1	1,1	0,18	0,059	0,31	0,020

онные свойства минеральной составляющей и отмершего органического материала. Наши предыдущими исследованиями показано, что на содержание и распределение тяжелых металлов в лесных подстилках существенное влияние оказывает примесь почвенного материала, что ощущается по всему разрезу: в верхних интервалах – за счет пыли, в нижних – непосредственно почвы. Следует, однако, оговориться, что это относится к подстилкам, сформировавшимся в поле пород с рудной минерализацией [14]. В подстилках ленточных боров, образованных на песках, подобного влияния не ощущается.

Все лесные горючие материалы имеют растительное или растительно-минеральное (лесные подстилки, дерновый слой почв) происхождение. Степень поглощения различных элементов живым веществом разная. Например, из рассматриваемой нами группы средние коэффициенты биологического поглощения имеют Zn (0,90), Mn (0,40) и Cu (0,13), слабое – Ni (0,030) и Co (0,020) и очень слабое – Cr (0,003) и V (0) [17]. Следует думать, что Cd и Hg, а тем более искусственные радионуклиды также относятся к элементам со слабым поглощением, поскольку все они не являются для растений жизненно необходимыми и в отличие от Zn и Mn не участвуют в метаболических процессах [12]. Несомненно одно: поведение всех химических элементов в лесных подстилках в основном определяется биогеохимическими процессами, вызываемыми разложением органики.

Главными факторами, контролирующими миграцию элементов при пожаре, служат: интенсивность пожара, метеорологические условия, состояние лесных горючих материалов и физико-химические особенности самих элементов. Коротко их можно представить так: чем сильнее интенсивность пожара, тем активнее мигрируют перечисленные элементы первой выделенной группы; чем сильнее ветер, тем больше возможности у мигрантов быть вынесенными за пределы пожарища; чем выше влажность ЛГМ, тем меньше возможность миграции; чем ниже температура кипения (а значит, и испарения) элемента, тем выше миграционная способ-

ность. Многие из этих факторов связаны между собой, о чем уже сказано.

Обобщение материалов, полученных при изучении пирогенных объектов, дало основание выделить две основные группы элементов по их поведению при лесных пожарах. Для первой группы, включающей Hg, Cd, ^{90}Sr , ^{137}Cs , As, Sb, Mn, Zn, в меньшей степени Pb и $^{239+240}\text{Pu}$, характерна воздушная миграция или активное перераспределение по площади пожарища, для второй (Ni, Co, Cr, Mg, V) – слабая миграционная реакция на пирологические процессы или даже накопление на площади пожарища. Первая группа обогащает компоненты лесного биогеоценоза на площадях, прилегающих с подветренной стороны к пожарищу, или на оставшихся внутри гари участках, обойденных огнем [18–20 и др.].

В качестве примера: на одном из пожарищ в ленточных борах Алтайского края активность ^{90}Sr в отобранных кольцом верхних 5 см почвы составляла 40,9 Бк/кг, на пожарище – 20, на подветренной стороне – 48,6, а на площади гари в обогащенном золой участке – 84,7 Бк/кг. Такие примеры не единичны, они относятся и к другим мигрантам, но все эти случаи свидетельствуют о миграции элементов по крайней мере в ближние зоны пожарища или о перераспределении их по ее площади. Однако многие микроэлементы и искусственные радионуклиды мигрируют на субмикронных частицах, способных переноситься на расстояния в тысячи километров, и загрязняют новые территории [1, 21, 22 и др.].

Основным предметом наших исследований является количественная сторона миграции элементов. Все наши расчеты строятся исключительно на данных по верхним 5 см наземного лесного покрова, т. е. по подстилкам, так как даже попадание в пробу мха или лишайника имеет незначительное влияние на количественную сторону миграции из-за ограниченного распространения и низкой плотности (см. выше). В кустистых лишайниках и зеленых мхах распределение элементов также характеризуется повышением их содержания к нижним интервалам профиля.

Весьма подходящим объектом для количественных подсчетов подходит любое из по-

жарищ в ленточных борах Обь-Иртышского междуречья, где обследовано их самое большое количество, например в районе пос. Ракиты на юго-западе Алтайского края. Повальный верховой пожар произошел в 1997 г., обследован в 2001 г. Исходные данные: размер пожарища 26 тыс. га; среднее содержание на фоновой площади, г/т: Cd – 0,161, Pb – 10,6, Zn – 25, Mn – 324, Hg – 0,037, активность ^{90}Sr – 30 Бк/кг, Cs^{137} – 116 Бк/кг; вынос, %: Cd – 31,1, Pb – 16, Zn – 9,2, Mn – 22,8, Hg – 48,6, Sr^{90} – 27,5, Cs^{137} – 48,2; запас подстилки 10,8 т/га. Несложные арифметические расчеты показывают, что в 1997 г. из пожарища вынесено, кг: кадмия – 1,1, свинца – 119, цинка – 330, марганца – 6,3 т, ртути – 1,25. Пожар был верховой повальный, что обычно сопровождается активными атмосферными потоками, поэтому все это количество элементов было вовлечено в воздушную миграцию и вынесено за пределы пожарища.

Этим же путем можно получить приблизительную цифру эмиссии элементов по пожарам Сибири. Исходные данные: среднее содержание элементов приведено в табл. 1 и 3; средний вынос элементов из всех пожарищ, %: ^{137}Cs – 43,8, ^{90}Sr – 30, Hg – 41,5, Cd – 34,1, Pb – 14,5, Mn – 25,7, Sb – 30,8, Zn – 19; минимальная ежегодная площадь пожарищ в Сибири (см. выше) 5 млн га; среднее значение запасов лесной подстилки 11 т/га. Произведя те же арифметические действия, мы должны констатировать, что ежегодно в лесах Сибири при пожарах в атмосферную эмиссию вовлекается, т: кадмия – 5,2, свинца – 145, цинка – 511,5, марганца – 8,1 (тыс.), сурьмы – 4,2, ртути – 2,7, цезия-137 – $1,82 \times 10^{12}$ Бк (беккерелей – 1 ядерное превращение в секунду) или 49,3 Ки (кюри – $3,7 \times 10^{10}$ Бк), стронция-90 – $4,75 \times 10^{11}$ Бк или 12,8 Ки. Полученные величины, во-первых, минимальны, поскольку основываются на аналитических данных только по подстилкам, а во-вторых, не означают, что все это количество было перенесено на большие расстояния; выше уже показано, что при низовых пожарах чаще всего происходит простое перераспределение элементов по площади пожарища или нижним ярусам леса.

Дальний перенос мигрирующих элементов возможен только при верховых пожарах, а соотношение их количества с низовыми пожарами – величина эфемерная и далеко не постоянная. Несомненно, для огромных пространств Сибири длительное нахождение в атмосфере этих количеств ртути, кадмия, свинца, радиоцезия, радиостронция и других токсичных элементов могло бы показаться малоопасным, если бы не одно обстоятельство, связанное с нерешенностью проблемы длительного воздействия на живую клетку ультрамалых доз радионуклидов и других токсикантов. Одними исследователями вполне аргументированно утверждается разрушающее влияние малых доз на организм человека при длительном воздействии [23, 24], другими [25] это положение энергично отвергается. Не имея права обсуждать данную проблему, дополним только, что сочетанное действие отмеченных элементов практически не изучено, но вполне вероятно, что оно может усиливать их негативное воздействие на человека. Остается подчеркнуть, что дым и аэрозоли лесных пожаров несут в себе токсиканты особой степени опасности. Эти токсиканты в лесах Сибири сосредоточены главным образом в лесных подстилках, которые горят при всех типах пожаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные сведения показывают, что при лесных пожарах мигрируют в первую очередь весьма опасные для живых организмов элементы и радиоактивные изотопы – ртуть, кадмий, свинец, стронций-90, цезий-137 и при сильных пожарах (самых распространенных в нашей стране в 2010 г.) мигрирует наиболее опасный радионуклид плутоний. Радиоцезий и радиостронций, имеющие период полураспада около 30 лет, скоро исчезнут, если не произойдет какой-нибудь катастрофы типа Чернобыльской, но плутоний будет присутствовать в компонентах биогеоценоза еще 24 тыс. лет. Современный уровень содержания этого искусственного радионуклида в компонентах лесного биогеоценоза невелик, однако его негативное воздействие на живые организмы в сотни раз

выше, чем радиоцезия и радиостронция вместе взятых.

Долгосрочные прогнозы не дают оснований для оптимизма. Из-за глобального изменения климата число крупных лесных пожаров во всем мире ежегодно возрастает, так как периодов жаркой и засушливой погоды становится больше. В Сибири к концу XXI в. риск возникновения экстремальных пожароопасных условий возрастет и зона увеличения этой вероятности займет почти всю территорию России, за исключением Дальнего Востока и Приморья [26]. При любом типе пожара лесная подстилка, как основной носитель тяжелых металлов и искусственных радионуклидов, будет поставлять их в дымовые аэрозоли, перераспределяя на земной поверхности в тех или иных масштабах.

Автор благодарит сотрудников лаборатории геохимии редких элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН Ю. С. Восель, О. Г. Галкову, Л. Д. Иванову, Н. В. Ищук, Г. С. Лудину, И. В. Макарову, М. С. Мельгунову, Л. П. Мичурину и А. С. Степину за выполнение аналитических работ и помощь в оформлении рукописи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 04-05-64057 и 10-05-0070.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валендик Э. Н. Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири // Сиб. экол. журн. 1996. № 1. С. 1–8.
2. Conard S. G., Ivanova G. A. Wildfire in Russian boreal forests – potential impacts of fire regime characteristics on emission and global carbon balance // *“Environ. Pollut.”* 1997. Vol. 98, N 3. P. 305–313.
3. Парамонов Е. Г., Ишутин Я. Н. Крупные лесные пожары в Алтайском крае. Барнаул: ПГП “Дельта”, 1999. 193 с.
4. Вангниц П. Р. Ленточные боры. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 64 с.
5. Малахов С. Г., Махонько Э. П. Выброс токсичных металлов в атмосферу и их накопление в поверхностном слое земли // *Успехи химии.* 1990. Т. 59, вып. 11. С. 1777–1798.
6. Nriagu J. O. Global inventory of natural and anthropogenic emission of trace metals to the atmosphere // *Nature.* 1989. N 279. P. 409–411.
7. Ягольницер М. А., Соколов В. М., Рябцев А. Д. и др. Оценка промышленной эмиссии ртути в Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития.* 1995. № 3. С. 23–35.
8. Виноградова А. А., Егоров В. А. О возможности дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* 1996. Т. 32, № 6. С. 796–802.
9. Курбатский Н. П. Определение степени пожарной опасности в лесах // *Лесное хозяйство.* 1957. № 4. С. 15–18.
10. Samsonov Yu. N., Koutsenogii K. P., Makarov V. I., Ivanov A. V., Ivanox V. A., McRae D. J., Conard S. G., Baker S. P., Ivanova G. A. Particulate emissions from fires in central Siberian Scots pine forests // *Can. J. For. Res.* 2005. N 35. P. 2207–2217.
11. Нестеров В. Г. Пожарная охрана леса. М.: Гослестехиздат, 1945. 175 с.
12. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
13. Пустовалов Л. В., Соколова Е. И. Методы определения рН и Eh в осадочных породах // *Методы изучения осадочных пород.* М.: Госгеолтехиздат, 1957. Т. 2. С. 116–127.
14. Маликова И. Н., Страховенко В. Д., Щербов Б. Л., Иванова Л. Д., Бадмаева Ж. О. Тяжелые металлы в хвойных подстилках природных ландшафтов юга Западной Сибири // *Докл. Междунар. школы “Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменения окружающей среды”.* Новороссийск, 15–20 сент. 2003 г. Новороссийск: ООО “ЦВВР”, 2003. С. 125–130.
15. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высш. шк., 1988. 327 с.
16. Глазовская М. А. Методология эколого-геохимической оценки устойчивости почв как компонента ландшафта // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 1997. № 3. С. 18–31.
17. Химическое загрязнение почв и их охрана: Словарь-справочник / под ред. Ю. М. Лейкина. М.: ВО Агропромиздат, 1991. 303 с.
18. Щербов Б. Л., Страховенко В. Д. Поведение ¹³⁷Cs и тяжелых металлов в лесных пожарах на Крайнем Севере // *Тр. Междунар. конф. “TNVIRONMIS”, Измерения, моделирование и информационные системы как средства снижения загрязнения на городском и региональном уровне / под ред. Е. П. Гордова.* Томск: Изд-во ЦНТИ. 2002. Т. 2. С. 261–264.
19. Щербов Б. Л., Завгородняя Н. В., Лазарева Е. В. Экогеохимические последствия лесных пожаров в ленточных борах Алтайского края // *Сиб. экол. журн.* 2008. № 4. С. 598–605. (Английский вариант: B. L. Shcherbov, N. V. Zavgorodnyaya, E. V. Lazareva. *Ecogeochemical Consequences of Forest Fires in Belt Pine Forests of Altai Krai // Contemporary problems of Ecology.* 2008. N 4).
20. Щербов Б. Л., Лазарева Е. В. Масштабы эмиссии тяжелых металлов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах в Сибири // *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии.* 2010. № 1(12). С. 57–65.
21. Процак В. П., Кадыгриб А. М., Йоценко В. И. и др. Оценка параметров вторичного переноса радионуклидов вследствие лесных пожаров // *Тез. докл. 3-го Съезда по радиационным исследованиям “Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность”.* Москва, 14–17 окт. 1997 г. Пущино: НЦ, 1997. С. 365–366.
22. Шведов В. П., Патин С. А. Радиоактивность океанов и морей. М.: Атомиздат, 1988. 287 с.

23. Бурлакова Е. Б. Сверхмалые дозы – большая загадка природы // Экология и жизнь. 2000. № 2. С. 38–42.
24. Пальмина Н. П. Механизм действия сверхмалых доз // Химия и жизнь. 2009. № 2. С. 10–13.
25. Ярмоненко С. П. “Фундаментальные” мифы или Алхимия XXI века // Химия и жизнь. 2007. № 1. С. 52–56.
26. Малевский-Малевиц С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Семиошина А. А., Саль И. А., Хлебникова Е. И., Шкляревич О. Б. Анализ изменения пожароопасной обстановки в лесах России в XX и XXI веках // Метеорология и гидрология. 2007. № 3. С. 14–24.

Role of Forest Litter in Migration of Chemical Elements and Artificial Radionuclides during Forest Fire Events in Siberia

B. L. SHCHERBOV

*Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
630090, Novosibirsk, Koptyug ave., 3
E-mail: boris@igm.nsc.ru*

Forest litter is the most significant component of forest biogeocoenosis for the studies of the behavior of chemical elements and artificial radionuclides during forest fire events. The ubiquitous distribution of forest litter, active biogeochemical processes that occur in it due to permanently incoming organic matter, high depositing properties with respect to chemical components precipitated from the atmosphere align forest litter as the natural objects playing an exclusive role of biogeochemical barrier at the routes of element migration in forest ecosystems. Investigation of the distribution of chemical elements in forest litter and the degree of its burning out during forest fires allow us to distinguish a group of elements that migrate from the sites of fire and to determine the degree of their carry-over quantitatively.

Key words: forest fire, forest litter, heavy metals, artificial radionuclides, migration.