

Радиоэкология лесных пожаров в Сибири

Б.Л.Щербов, В.В.Будашкина

Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

Вся территория Сибири, начиная с 1949 г., в различные периоды подвергалась радиоактивным выпадениям [3, 5]. После принятия Моратория на прекращение открытых испытаний ядерных устройств, проводимых СССР и США в атмосфере, на земле и под водой (1963 г.), в северном полушарии был сформирован глобальный радиоактивный фон, на котором в различных местах выделялись площади с повышенной радиоактивностью. Это явилось следствием неравномерного выпадения радиоактивных осадков, обусловленное метеорологическими характеристиками времени прохождения облаков с искусственными радионуклидами. После ядерных взрывов в атмосферу выбрасывалось около двухсот различных радиоактивных изотопов, большинство из которых имели периоды полураспада, измеряемые секундами, минутами, часами и т.д. Эти короткоживущие загрязнители в целом прекратили свое существование, и в настоящее время в сибирских ландшафтах от испытаний остались лишь ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{238+239}\text{Pu}$. После 1963 г. продолжалось проведение так называемых “мирных” взрывов, имевших своей конечной целью военные, технологические и народно-хозяйственные результаты. Многие из этих взрывов заканчивались аварийными выбросами или просачиванием сквозь толщу горных пород инертных газов, ядерные превращения которых сопровождалось образованием ^{137}Cs . К источникам радиоактивного загрязнения Сибири следует добавить ядерные предприятия Томска и Красноярска, а также места захоронения радиоактивных отходов. Большие площади Сибири испытали на себе влияние Чернобыльской катастрофы, а также испытаний на Лобнорском полигоне в Китае [8, 9]. Современное радиоактивное загрязнение, связанное с атмосферным переносом, было установлено нами во мхах из различных районов Западной Сибири [10]. Наши исследования в различных точках Сибири летом 2011 года показали присутствие ^{134}Cs (он служит показателем “реакторного” источника) в некоторых точках и от Фукусимской аварии (Япония).

Выпадавшие из атмосферы искусственные радионуклиды с той или иной степенью прочности закреплялись в целинных почвах, торфяных залежах, донных отложениях озер и различных компонентах лесного почвенно-растительного комплекса. Широкое распространение лесов в Сибири позволяет отнести их к наиболее емкой части ландшафта по отношению к искусственным радионуклидам. Поэтому, для изучения поведения радионуклидов после выпадения их на земную поверхность, наиболее интересными и распространенными являются различные биогеохимические барьеры, которыми насыщен лесной биогеоценоз: хвоя, кора и листва деревьев, мхи, лишайники, травы, кустарники и лесные подстилки. Особое место в этом списке представляют собой лесные подстилки.

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 соединений, что обуславливает формирование специфической среды в ризосферной зоне подроста. С другой стороны, подстилки, имея повсеместное распространение, горят при любом типе пожара и в той или иной степени служат источником атмосферной миграции искусственных радионуклидов или перераспределении их по выгоревшей площади в постпирогенный период [15].

Сибирские леса, занимают 80 % лесного массива России (552 млн. га). Ежегодно на этой огромной площади возникает 30 тыс. пожаров. За пожарный период сгорает приблизительно 20 млн. тонн биомассы, в атмосферу выбрасывается 2 млн. тонн продуктов горения. Приближенная оценка площади лесных пожаров составляет около 5 млн. га, а пожаров всех видов растительности – около 10 млн. га. [2]. По другим данным, в бореальных лесах России пожары могут происходить на площади в 12 млн. га [13]. Бывают сезоны, когда эта цифра существенно увеличивается. Примером может служить

2010 год, когда только один пожар на юго-западе Алтайского края уничтожил около 13 тыс. га уникальных ленточных боров. В том же году уже к началу августа общая площадь, пройденная пожарами Центральной России, превысила 15 млн. га: горение лесов продолжалось и в других регионах страны до глубокой осени. По сообщениям СМИ, пирологическая лесная ситуация в нашей стране 2011 г была не менее катастрофичной.

Таблица 1. Поведение радионуклидов при лесных пожарах разного типа

Район, регион	Год пожара	Год отбора	Тип пожара	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$
п. Тарко-Сале (1)	2000	2000	Верховой слабый	-23	-26	-
п. Вынгапур (1)	1999	2000	Верховой слабый	-	-24	-
п. Ханымей (1)	1997	2000	Верховой сильный	-	-31	-
п. Завьялово (2)	1997	1999	Верховой*	-38	-42	-
п. Н-егорьевск(2)	1998	2000	Верховой сильный	-50	-40,6	+5,2
п. Ракиты (2)	1997	2000	Верховой повальный*	-27,5	-48,2	-
п. Северка-1 (2)	2000	2003	Верховой повальный	-	-44	-
п. Северка-2 (2)	2003	2003	Верховой	-	-36	-
п. Волчиха (2)	1998	2000	Верховой повальный*	-33,3	-60,2	-15,3
п. Вознесенка (2)	2004	2004	Низовой беглый	+39,5	+39,3	+4
п. Иркутское (2)	2005	2005	Верховой	-33,2	-35,5	-
п. Ерестная (3)	2004	2004	Визовой беглый	-	-23,6	-
п. Иля (4)	2004	2004	Верховой повальный	-32	-49	-5,2
п. Ара-Иля (4)	2001	2004	Верховой	-40,3	-48,9	-12,3
п. Обуса (5)	2003	2003	Верховой	-	-40,3	-
п Загатуй (5)	2003	2003	Верховой слабый	-	-28,6	-
Оз. Халанда (6)	2003	2004	Верховой	-	-29,1	-
г. Улан – Удэ (7)	2004	2004	Низовой беглый	+6	+5	-
п. Николаевка (2)	2010	2011	Верховой повальный	-42,2	-56,2	-30,3

Примечание. В скобках – символы регионов: 1 – Ямало-Ненецкий АО, 2 – Алтайский край, 3 – Новосибирская обл., 4 – Агинский Бурятский АО. 5 – Усть-Ордынский Бурятский АО; 6 – Читинская обл., 7 – Республика Бурятия; * - рекультивированные пожарища.

Изучение поведения искусственных изотопов при горении лесных массивов было инициировано возникновением лесных пожаров на территориях, оказавшихся в зоне влияния Чернобыльской катастрофы [1, 6, 14]. В Сибири этой проблемой стали заниматься в ИГМ СО РАН только при экогеохимических исследованиях в местах проживания коренного населения, что позволило обследовать пожарища во многих наших

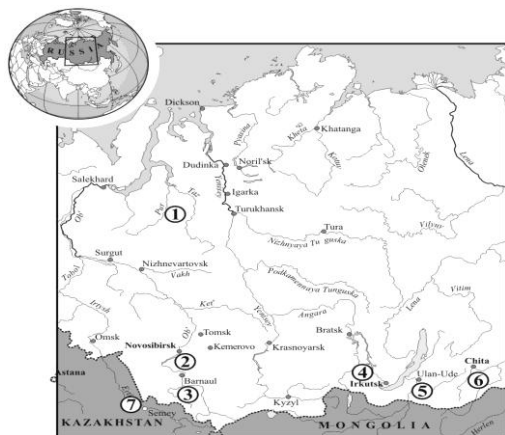


Рис. 1. Схема районов работ (1- Ямало-Ненецкий АО; 2- Новосибирская обл., 3 - Алтайский край; 4 – Иркутская обл.; 5 - Респ. Бурятия; 6 – Читинская обл.; 7 – Респ. Казахстан.

регионах и на востоке Казахстана (рис. 1) [11, 12,]. Самые первые результаты позволили выделить две группы элементов по характеру поведения при лесных пожарах. В число наиболее активных мигрантов вошли Hg, Cd, As, Pb, Sb и

некоторые другие элементы, а также ^{90}Sr , ^{137}Cs , в меньшей степени – $^{239+240}\text{Pu}$. Было показано [15], что миграционная способность элементов во многом зависит от температуры кипения (видимо, и испарения). Наиболее активно из пожарищ мигрировали радиоцезий и радиостронций (T° соответственно 690 и 1384 $^\circ\text{C}$). Плутоний ($T^\circ=3227$ $^\circ\text{C}$) способен мигрировать только при больших температурах, что характерно только для повоальных верховых пожаров. Таким образом, от типа лесного пожара во многом зависит поведение искусственных радионуклидов. Этот тезис, на наш взгляд, убедительно иллюстрируется данными таблицы 1.

Однако существуют объекты, где искусственные радионуклиды не выносятся за пределы пожарища, а накапливаются в них. Такие результаты иногда возникают при низовых пожарах, но это не означает, что радионуклиды, как, впрочем, и стабильные элементы, оказываются вне миграционного процесса. При низовых пожарах наземные горючие материалы (ЛГМ) очень часто выгорают неравномерно. В особой степени это проявляется при весенних пожарах, когда мхи, лишайники и лесная подстилка высыхают по-разному, как это произошло на одном из пожарищ в Алтайском крае. Здесь около прикорневых участков деревьев снег растаял значительно быстрее, чем на остальной площади леса (фото 1а). Это привело к тому, что при пожаре, первые из участков выгорели полностью (фото 1б), а остальная площадь была пройдена лишь беглым огнем, и лесная подстилка выгорела только наполовину. Средняя удельная активность искусственных радионуклидов на разных участках составила (Бк/кг): для ^{90}Sr – 28 (вся площадь) и 13 (прикорневые участки), для ^{137}Cs – 122 и 60, для $^{239+240}\text{Pu}$ – 1,45 и 1,1. Наглядно это показано на рис 2.

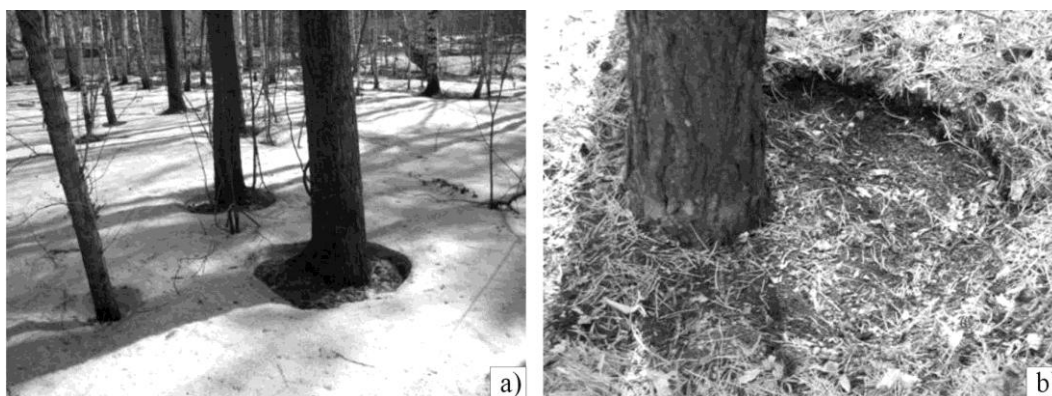


Фото 1. Характер таяния снега в апреле (а) и выгорания лесной подстилки в мае (б).

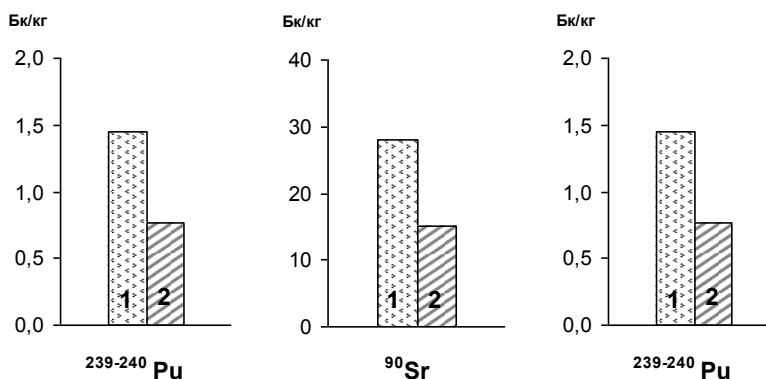


Рис.2. Удельная активность искусственных радионуклидов на основной площади пожарища (1) и полностью выгоревших участках (2)

Таким образом, результаты обследования данного пожарища позволяют утверждать простое перераспределение искусственных радионуклидов по выгоревшей площади без их выноса за пределы выгоревшей площади. Отбор проб верхних слоев растительно-почвенного покрова производился нами стальным кольцом, применяемым при экогеохимических исследованиях (высота кольца 50 мм, диаметр – 84 мм).

Интересно, что на совершенно аналогичном объекте, изученном в районе п. Ерестная (Новосибирская обл.) отмечена заметная миграция многих элементов (включая и искусственные радионуклиды) за пределы пожарища. Оба пожара имеют небольшие (3-4 га) размеры, оба произошли в мае месяце на одинаковых лесных насаждениях. Однако первый пожар произошел при безветренной погоде внутри леса, второй – при устойчивом ветре (6-8 м/сек) на берегу Новосибирского водохранилища. Напрашивается вывод о влиянии на процессы миграции состояния наземных ЛГМ и погодных условий.

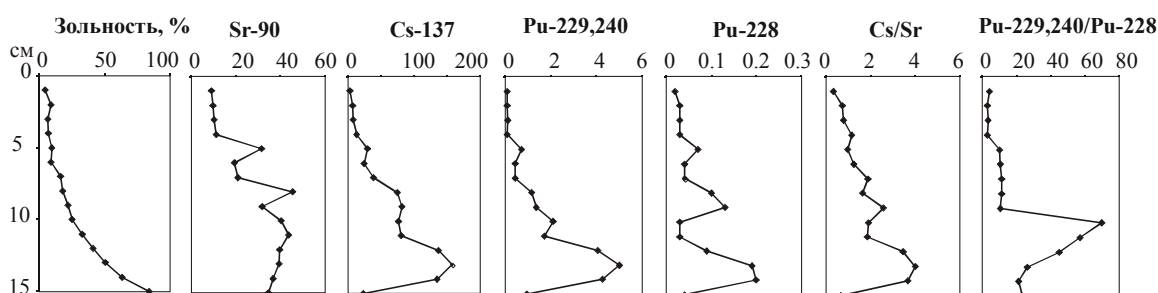


Рис. 2. Характер распределения искусственных радионуклидов и зольности в профиле лесной подстилки

Следующим фактором, тесно связанным с приведенными выше причинами и влияющим на поведение искусственных радионуклидов при лесном пожаре, служит характер распределения их в вертикальном разрезе наземных ЛГМ. Как видно, из диаграмм вертикального распределения искусственных радионуклидов, приводимых на рисунке 2, повышенные значения их удельной активности тяготеют к нижним интервалам лесной подстилки. Отметим, что во мхах и лишайниках распределение радионуклидов имеет ту же тенденцию. Поэтому при беглом низовом пожаре, когда сгорает только верхняя часть растений и подстилок, в миграцию вовлекается наименьшая часть заключенных в них радионуклидов. Основное же их количество участвует в миграционном цикле только при полном сгорании этих наземных ЛГМ. Скорее всего, это связано с увеличением сорбционной емкости разлагающегося по мере старения органического материала отмеченных компонентов лесного биогеоценоза, потому что резкое уменьшение активности всех радионуклидов в самом низу профиля начинается на границе с подстилающими песками, почти полностью лишенными органики. Наши наблюдения показывают, что воздушный вынос искусственных радионуклидов из пожарища часто сопровождается радиоактивным загрязнением прилегающей к нему площади или незатронутых огнем участков, остающихся внутри гари. Такой случай характеризует один из объектов от беглого низового пожара в Ямало-Ненецком АО. Здесь внутри гари остались небольшие (3-4 м²) участки с кустистым лишайником *Cladina Stellaris* и несгоревшими молодыми кедром. Активность радиоцезия в верхнем 5-сантиметровом слое почвенного покрова на наветренной стороне пожарища (рис. 3-1) следует считать фоновой. Она несколько выше, чем на выгоревшей площади (рис. 3-2). На подветренной стороне (рис. 3-3) активность его еще выше. Самое высокое значение активности ¹³⁷Cs в лишайниках зафиксировано внутри пожарища, самое низкое – на наветренной стороне. Лишайники наиболее обогащены радиоцезием внутри пожарища и на его подветренной стороне. Эти данные свидетельствуют о воздушном переносе радионуклида. Дополнительным аргументом в пользу этого положения служит

обогащение на 38 % хвои кедра в пределах выжженной площади относительно “фоновой”. Остается добавить только, что обследование пожарища проведено сразу поле пожара.

Данный пример увеличения активности радиоцезия в хвое сосен за пределами пожарища не единичен. В среднем по ленточным борам Новосибирской области и Алтайского края, где нами обследовано самое большое количество объектов, хвоя из зоны влияния пожаров по сравнению с хвоей из фоновых площадей обогащена ^{137}Cs в 3,4 раза. Аналогичное явление отмечено нами и в других регионах Сибири.

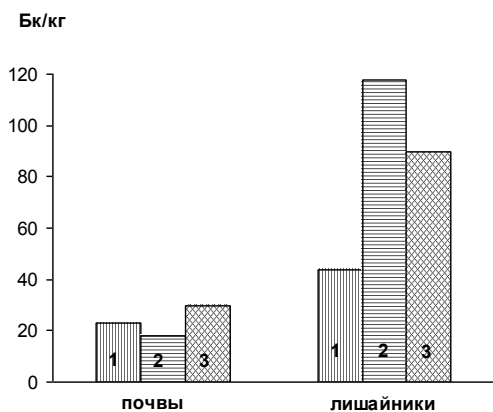


Рис. 3. Средняя удельная активность радиоцезия на различных участках пожарища в районе пос. Тарко-Сале (Ямало-Ненецкий АО)

Кроме воздушной миграции искусственных радионуклидов при лесных пожарах следует отметить перераспределение по площади пожарища. Это происходит как во время пожара, так и значительно позже под влиянием временных водных потоков или эоловых процессов. На пожарищах ленточных боров Алтайского края, образованных на дюнном рельефе, часто

наблюдается скопление зольно-сажистого материала в пониженных участках рельефа. Как правило, этот материал оказывается обогащенным многими элементами, включая и искусственные радионуклиды. Так, на одном из объектов этого региона средняя удельная активность плутония на пожарище составляет 2,02 Бк/кг, а в отдельно собранной золе – 8,43 Бк/кг.

Главной целью наших исследований служило определение масштабов миграции тяжелых металлов и искусственных радионуклидов. Для расчетов нам требуются сведения об удельной активности радионуклидов в компонентах биогеоценоза, о площади пожарища, запасах ЛГМ и количестве мигрировавшего радионуклида. В качестве примера рассмотрим одно из пожарищ. Наиболее свежий пример – результаты пожара 2010 г в районе села Николаевка на западе Алтайского края. Общая площадь пожара составила около 13 тыс. га. Средняя удельная активность ^{137}Cs в 5-сантиметровом интервале почвенного покрова – 47 Бк/кг; вынос радиоцезия – 58 %. Запасы лесной подстилки (именно она выгорает при пожарах) в борах, посчитанные нами по нескольким десяткам точек составляют 10,8 т/га, что близко к среднему значению для сибирских лесов [4]. Несложные математические расчеты показывают, что из этого пожарища был вынесен радиоцезий с активностью $3 \cdot 10^8$ Бк. Следует думать, что этот радионуклид атмосферным путем мог перенестись на большие площади Алтайского края, поскольку пожар был повальным, и после него образовалась пустыня.

Аналогичным путем можно приблизительно подсчитать масштабы эмиссии ^{137}Cs для Сибири в целом. Начиная с 1991 г сотрудниками нашей лаборатории постоянно пополняется банк данных по тяжелым металлам и искусственным радионуклидам во всех компонентах биогеоценоза и деталях ландшафта. В нашем распоряжении имеются данные по радиоцезию и радиостронцию, которые определены в сотнях образцов лесных подстилок; для подсчетов по плутонию, на наш взгляд, данных недостаточно, поскольку он определен не во всех объектах. Средние значения удельной активности ^{137}Cs в компонентах лесного биогеоценоза по нескольким сотням анализов составляют (Бк/кг): для лесных подстилок – 113 ± 63 , для лишайников – $56,8 \pm 52$, для мхов – 61 ± 56 , для хвои – $18,2 \pm 3,7$, для трав – $1,1 \pm 0,63$. В подстилках средняя активность ^{90}Sr – 30 ± 16 , $^{239+240}\text{Pu}$ – $1,93 \pm 1,6$ Бк/кг. Корректный подсчет запасов хвои, лишайников или мхов в том или ином районе обследования пожарищ требует огромных трудозатрат или просто невозможен. Имея в виду ежегодное значение пожаров – 5 млн. га и среднее содержание подстилки в

лесах Сибири – 11 т/га (см. выше) и произведя те же арифметические расчеты, мы вправе утверждать ежегодный вынос радиоцезия с активностью $1,82 \cdot 10^{12}$ Бк или около 49 Ки. Оценка эмиссии радиостронция составляет $4,75 \cdot 10^{11}$ Бк (12,8 Ки), то есть суммарное количество составляет более 60 Ки. Эту оценку следует считать минимальной, поскольку она основана только на данных по лесным подстилкам. Но, как известно, при пожарах горят и все остальные лесные горючие материалы, однако вклад искусственных радионуклидов от них в воздушную миграцию подсчитать не представляется возможным. Тем не менее, следует думать, что вклад от лишайников, мхов и хвои может быть существенным: наши наблюдения на Крайнем Севере показывают, что эти компоненты биогеоценоза загрязнены радиоцезием на порядок выше, чем в других регионах Сибири.

В последнее время канадскими учеными высказывается предположение о том, что повышение радиационного фона в атмосфере Канады в летние месяцы связано в некоторой степени и Сибирским лесным пожарам [7]. Прямых доказательств не существует, но если учесть, что радионуклиды могут переноситься на субмикронных частицах дымовых аэрозолей на тысячи километров [2, 6 и др.], то предположение канадцев не кажется фантастическим.

Таким образом, активная миграция искусственных радионуклидов при сибирских лесных пожарах – факт неоспоримый. Приведенные выше данные по общей величине эмиссии ^{90}Sr и ^{137}Cs из пожарищ относятся к границе XX и XXI вв. Эти два искусственных радионуклида ($T_{1/2} = 30$ лет) в скором времени исчезнут из ландшафтов Сибири в результате естественного распада, если не произойдет какой-либо новой ядерной катастрофы и не будет новых выпадений долгоживущих искусственных радионуклидов. Однако плутоний, имеющий период полураспада 24 тысяч лет, еще долго будет участвовать в пирологическом процессе сибирских лесов. Прогнозы неутешительны: количество катастрофических лесных пожаров в XXI веке будет увеличиваться.

Авторы благодарят И.В.Макарову, М.С.Мельгунову, А.С.Степина и Н.И.Чернакову за выполнение аналитических работ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 04-05-64057 и № 10-05-00370.

Литература

1. Азаров С.И. Загрязнение атмосферы ^{137}Cs при лесных пожарах в чернобыльской зоне // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36, № 4. С. 506-515.
2. Валендик Э.Н. Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири // Сиб. экол. журн. 1996. № 1. С. 1-18.
3. Израэль Ю.А. Радиоактивное загрязнение после ядерных взрывов и аварий – интегральный подход // Труды Международной конф. “Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях”. Москва, 24-26 апр. 2000 г. С.-П.: Гидрометеиздат. 2000. С. 26-47.
4. Курбатский Н.П. Определение степени пожарной опасности в лесах // Лесное хозяйство. 1957. № 4. С. 15-18.
5. Махонько К.П., Павлова Л.Н. Радиоактивные продукты в атмосфере от подземных ядерных взрывов на полигонах СССР // Бюллетень ЦОИ по атомной энергии, 1997, № 9, с. 15-24.
6. Пазухин Э.М., Боровой А.А., Огородников Б.И. Лесной пожар как фактор перераспределения радионуклидов чернобыльского генезиса в окружающей среде // Радиохимия, 2004, т. 46, № 1, с.93-96.
7. Радиоактивные лесные пожары // Наука и жизнь. 2007. № 2. БИНТИ. С. 10.
8. Савченко В.К. Экология Чернобыльской катастрофы. Научные основы Международной программы исследований. Минск: Беларуская навука. 1997. 224 с.
9. Челюканов В.В., Савельев В.А. О влиянии испытаний Китайской Народной Республики на радиоактивное загрязнение территории СССР // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 118-119.

10. Щербов Б.Л. Существует ли современное атмосферное загрязнение искусственными радионуклидами?// Материалы V Междунар. биогеохимической школы. Семипалатинск, 8-11 сент. 2005 г. Семипалатинск: РИО СГПИ. 2005. С. 499-500.
11. Щербов Б.Л., Будашкина В.В., Страховенко В.Д. Миграция искусственных радионуклидов и тяжелых металлов при лесных пожарах в Сибири// Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2006. 1(1). С. 113-121.
12. Щербов Б.Л., Страховенко В.Д., Сухоруков Ф.В. Экогеохимическая роль лесных пожаров в Байкальском регионе// География и природные ресурсы, 2008, № 2, с. 60-66.
13. 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. V. 98. 3. P. 305-313.
14. Paliouris G., Taylor H.W., Wein R.W. e.a. Fire as an agent in redistributing fallout ¹³⁷Cs in the Canadian boreal forest // Total Environ. [Pap.] Int. Simp. Ecol. Eff. Arctic Airborne Contamination, Reykjavik, 4-8 oct., 1993, p. 160-161; 1995, p. 153-166.
15. Scherbov B.L., Lazareva E.V. Migration Factors of Radionuclides and Heavy Metals during Forest Fires in Siberia// Advances in Environmental Research. Vol. 4. P. 99-120.
16. Scherbov B.L., Zavgorodnyaya N.V., Lazareva E.V. Ecogeochemical consequences of Forest Fires in Belt Pine Forests of Altai Krai// Contemporary Problems of Ecology. 2008. № 4. P. 459-466.