

Б. Л. ЩЕРБОВ



ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ КАК

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ УГРОЗА

Лесные пожары – одно из страшных стихийных бедствий, причем часто причиной их становится человек. Ежегодно на планете огонь уничтожает огромные лесные массивы. Только в Центральной России в жарком 2010 г. общая площадь, пройденная пожарами, уже к началу августа превышала 15 млн га. Эта участь не миновала и Сибирь, более половины площади которой занята бореальными лесами. В рекордном по пожарам 1997 г. в Алтайском крае выгорело 140 тыс. га ленточных боров, а общий ущерб составил более 1 трл руб.

Лесные пожары способствуют активной миграции химических элементов в биосфере. При этом основное число научных исследований посвящено эмиссии парниковых газов. А как ведут себя тяжелые металлы и искусственные радионуклиды, которые могут накапливаться в лесных экосистемах в результате промышленных выбросов, аварий и ядерных испытаний?

Верховые пожары химически «стерилизуют» ландшафт. При низовых пожарах часть химических элементов просто перераспределяется по компонентам биогеоценоза. Слева – последствия верхового пожара в ленточном бору в Алтайском крае (1997 г). Справа – низовой пожар в Подмосковье (2010 г.)

Ключевые слова: лесные пожары, радиоактивные элементы, тяжелые металлы.

Key words: forest fires, radioactive elements, heavy metals

Пожары являются геохимической силой, сравнимой по мощности с деятельностью вулканов. Когда горит лес, сокращаются не только запасы древесины – трансформируется весь ландшафт. Повышается кислотность почв, усиливается водная и ветровая эрозия, меняется водный режим рек и микроклимат.

При пожаре из лесной экосистемы вместе с горячим воздухом помимо углерода в виде углекислого газа и сажи выносятся значительное количество других минеральных веществ, в том числе радиоактивных, находившихся в почве, подстилке, коре и древесине деревьев.

Вместе с аэрозольными частицами эти вещества могут переноситься на тысячи километров. Поэтому исследования миграции тяжелых металлов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах посвящены в основном составу дымовых аэрозолей. Однако с помощью «наземных» методов можно получить ценные сведения о поведении этих элементов не только «снаружи», но и «внутри» экосистемы.

ЩЕРБОВ Борис Леонидович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов и экзогеохимии Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 242 научных работ





● Места проведения подземных ядерных взрывов в мирных целях на территории СССР в 1965—1988 гг.

В случае возникновения пожаров потенциально особо опасными являются места, подвергнутые радиоактивному заражению

ГОРЯТ ЧЕРНОБЫЛЬСКИЕ ЛЕСА... МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

В зоне отчуждения Чернобыльской АЭС около половины территории занимают леса, преимущественно сосновые. После аварии 1986 г. они оказались сильно загрязнены радиоактивными продуктами, особенно в центральной, западной и северной частях зоны.

Проблема радиационной опасности лесных пожаров, образования и переноса вторичных радиоактивных аэрозолей в дымовых шлейфах была осознана летом 1992 г., когда около 20 % зоны отчуждения оказались пройденными огнем. По статистике созданного тогда предприятия «Чернобыльлес», за 1993—2004 гг. в зоне было зарегистрировано 976 пожаров, т. е. около 80 пожаров ежегодно. Судя по пробам аэрозолей с 30 стационарных пунктов контроля радиационной обстановки в зоне отчуждения, концентрация изотопа ^{137}Cs в атмосфере при этом возрастала в 10—100 раз даже на удалении нескольких километров от очага пожара.

Особенность пиролизических аэрозолей состоит в обогащении радиоцезием по отношению к другим радионуклидам. Более высокие соотношения $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}/^{238}\text{Pu}$ по сравнению с первоначальными выпадениями аэрозолей на местности были зафиксированы в пробах, взятых из дымовых шлейфов при пожарах 1992, 1993, 2002 гг. Причина заключается в том, что сам цезий и два его оксида имеют высокую летучесть и испаряются в диапазоне температур 550—670 °С. В дальнейшем они оседают на атмосферных ядрах конденсации и продуктах горения, что приводит к образованию субмикронных аэрозолей радиоцезия.

Таким образом, при лесных пожарах на радиоактивно-загрязненных территориях дополнительную радиационную опасность представляет не столько увеличение внешнего облучения от дымового шлейфа, сколько вдыхание аэрозолей, особенно их субмикронной фракции.

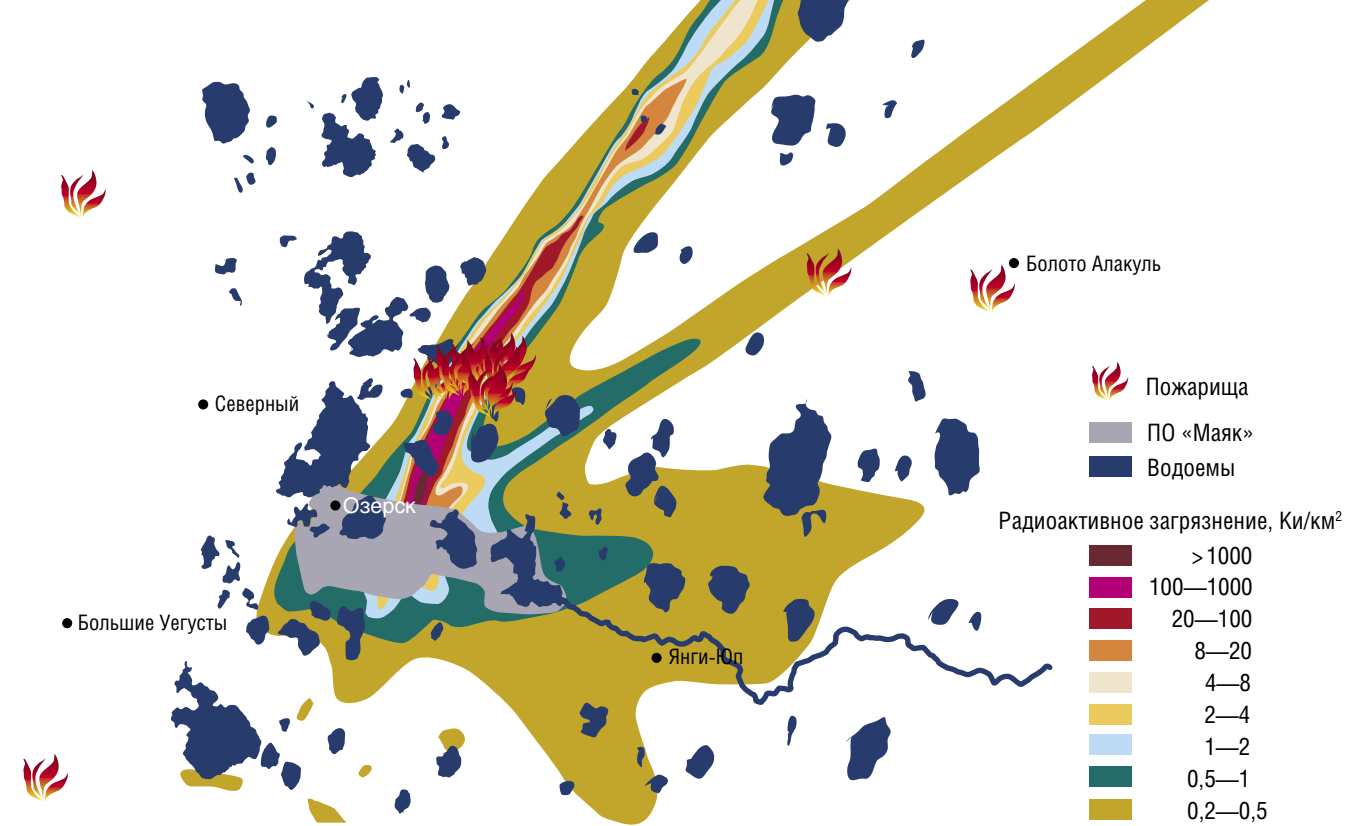
К. П. Куценогий (д. ф.-м. н., Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск)

Химическая атака

Индикатором биогеохимической ситуации на планете служат донные осадки. Изучение микроэлементного состава донных отложений озер Алтайского края показало, что за прошлый век поступление мышьяка, кадмия, цинка, свинца и ртути в водные экосистемы увеличилось здесь примерно в полтора раза, и это несмотря на то, что Алтай нельзя отнести к промышленно нагруженным регионам.

В планетарном масштабе к концу прошлого века антропогенная эмиссия многих тяжелых металлов за счет металлургии, автотранспорта, сжигания топлива, химической промышленности, существенно превысила природную, образующуюся за счет эрозии почв, вулканов, космической пыли, лесных пожаров. Так, отношение антропогенных выбросов к природным (*коэффициент мобилизации*) для сурьмы составило 34, свинца — 16, кадмия — 7,7, меди — 7, цинка — 5,5, ртути — 0,3 (Малахов, Махонько, 1990).

Что касается ртути, то имеются и другие данные, свидетельствующие о гораздо более серьезных



● Болото Алакуль
● Северный
● Озерск
● Большие Угусты
● Янги-Юп

● Пожарища
■ ПО «Маяк»
■ Водоемы

Радиоактивное загрязнение, Ки/км²

- > 1000
- 100—1000
- 20—100
- 8—20
- 4—8
- 2—4
- 1—2
- 0,5—1
- 0,2—0,5

масштабах ее антропогенной эмиссии в атмосферу. Например, указывается, что в начале 1980-х гг. она превысила природную почти в 1,5 раза — 3600 и 2500 т в год соответственно (Nriagu, 1988). В среднем же по Сибири антропогенная составляющая выбросов ртути примерно в пять раз больше природной — 340 против 70 т в год (Ягольницер и др., 1995).

Несмотря на развитую промышленность, Сибирь тем не менее не относят к регионам с высокой техногенной нагрузкой благодаря ее огромным пространствам. Вместе с тем некоторые ее районы загрязняются достаточно ощутимо. Например, в 1997 г. выбросы в атмосферу в Томской, Новосибирской, Омской областях и в Алтайском крае не превышали 461 т, зато в Кемеровской области они достигли 1221 т, а в Тюменской — 2982 т! Причем на протяжении последних лет эти цифры неуклонно растут.

Очевидно, что рядом с такими крупными промышленными центрами как Кузбасс, природные экосистемы испытывают мощное химическое воздействие, следствием чего является повышенное содержание элементов-загрязнителей в живых объектах, подстилке и почве. В сибирском регионе основными источниками глобального переноса тяжелых металлов помимо области Кузнецкого бассейна служат также Норильский горно-металлургический комбинат, промышленные предприятия Байкальского региона и Якутии (Виноградова, Егоров, 1997).

В 1949—1963 гг. вся территория Сибири подвергалась влиянию радиоактивных выпадений от ядерных испытаний на Северном (о. Новая Земля) и Семипалатинском полигонах. Свой вклад внесли и так называемые

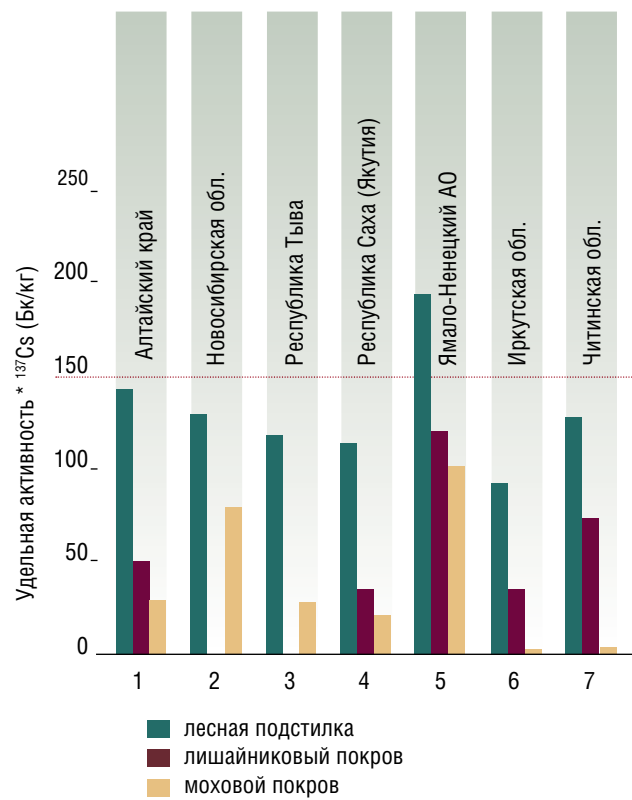
авария на производственном объединении «Маяк» в Челябинской обл. была одной из самых тяжелых в истории мировой атомной отрасли.

Из-за радиационного загрязнения сильно пострадали территории, расположенные в северо-восточном и восточном направлении от эпицентра аварии. В начале мая 2011 г. здесь произошел крупный лесной пожар, площадь которого по данным «Гринпис России» составила более 1000 га. По данным пожарной информационной системы FIRMS, <http://www.74-radsafety.ru>

«мирные» (подземные) взрывы. Из пятисот подобных ядерных испытаний большая часть была произведена на территории Сибири. Радиоактивное загрязнение региона, особенно его восточных районов, увеличили и ядерные испытания в Китае, проводившиеся на Лобнорском полигоне в 1964—1980 гг.

Еще один источник радиоактивного загрязнения — промышленные аварии. Одна из крупнейших произошла в 1957 г. на производственном объединении «Маяк» в Челябинской обл.; немалую лепту внесла и печально известная авария на Чернобыльской АЭС, после которой и началось собственно активное изучение поведения искусственных радионуклидов при лесных пожарах.

Кроме того, и сегодня на химических комбинатах в Томске и Красноярске продолжается накопление опасных радиоактивных отходов, часть которых в результате аварий может попасть в окружающую среду.



* Удельная активность – активность, приходящаяся на единицу массы вещества источника. В системе СИ единицей активности является беккерель (Бк, Вq); 1 Бк = с⁻¹. В образце с активностью 1 Бк происходит в среднем 1 распад в секунду. В научных публикациях также употребляется кюри (Ки), равная 3,7 · 10¹⁰ Бк.

Из всех составляющих лесной экосистемы самой информативной оказалась подстилка, поскольку ее другие компоненты – мхи, лишайники, травы и кустарники – встречались в обследованных лесах фрагментарно, а в некоторых совсем отсутствовали. На фото – сообщество лишайников и мхов, характерное для северных районов Сибири. После низового пожара лишайники на деревьях обогащаются ртутью, кадмием и цезием-137

Способность элементов накапливаться в живом веществе определяет их поведение в лесной экосистеме. Чем больше элемент вовлечен в метаболические процессы, тем интенсивнее он «вытягивается» из окружающей среды. К биофилам относятся как макроэлементы (N, C, O, H, Ca, Mg, Na, K, P, S, Cl, Si, Fe), так и микроэлементы (Cu, Co, Mn, Zn, V, Ni, Mo, Sr, B, Se, F, Br, I). Микроэлементы необходимы для нормальной жизнедеятельности живых организмов, однако избыток их в окружающей среде, так же как и недостаток, может быть чрезвычайно вредным.

Еще одним существенным показателем подвижности элемента является его температура кипения. Рудные элементы (Cu, V, Ni, Cr, Co), имеющие температуру кипения выше 2500 °С, остаются на месте пожарищ. Другое дело – кадмий, ртуть, радиоактивные цезий и стронций, имеющие низкую или относительно низкую температуру кипения и испарения: Cd – 765°, Hg – 357°, Cs – 690°, Sr – 1384° (по Цельсию). Эти элементы благодаря пожара могут вовлекаться в активную миграцию

Тяжелые, но подвижные

Целью исследователей из Института геологии и минералогии СО РАН стало выяснение поведения тяжелых металлов, некоторых других элементов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах различного типа, а также количественное определение их атмосферной эмиссии. В список определяемых элементов попали кадмий, ртуть, медь, цинк, свинец, марганец, хром, никель, кобальт, магний, мышьяк, сурьма, стронций (⁹⁰Sr), цезий (¹³⁷Cs), плутоний (²³⁸, ²⁴⁰Pu).

Всего в различных регионах Сибири и прилегающих районах Восточного Казахстана было обследовано более двух десятков пожарищ разного возраста и типа. Некоторые из них были изучены непосредственно после прекращения пожаров, другие значительно позже. На отдельных пожарищах к тому времени уже были проведены посадки лесных культур.

Для количественной оценки масштаба миграции отбирались пробы как с наветренного (фоновый) участка леса, так и выгоревшего. Разница концентраций позволила судить о том, какие химические элементы и в каком количестве были вынесены из экосистемы.

Результаты исследований показали, что чем сильнее пожар, тем большее количество элементов участвует в интенсивной миграции. Это связано с более глубоким выгоранием основных депонентов тяжелых металлов и радионуклидов – в первую очередь средних и нижних слоев лесной подстилки, а также мхов и лишайников. Однако последние широко распространены лишь на севере Западной Сибири и в Якутии.

При лесных пожарах через атмосферу активно мигрируют такие вещества первого класса опасности как ртуть, кадмий, мышьяк, радиоактивные цезий и стронций. В меньшей степени – свинец, плутоний и некоторые другие, менее опасные элементы – цинк, марганец, сурьма. Эмиссия элементов при сильном пожаре может достигать до половины от их исходного содержания.

Что касается других факторов, влияющих на объем атмосферной эмиссии, то показательным является сравнение выбросов элементов в результате двух пожаров в приобских борах – около д. Ерестная в Новосибирской области и возле пос. Вознесенка Алтайского края. Пожары прошли примерно в одно и то же время (апрель и начало мая), в схожих по своим ландшафтным и пирологическим параметрам условиях.

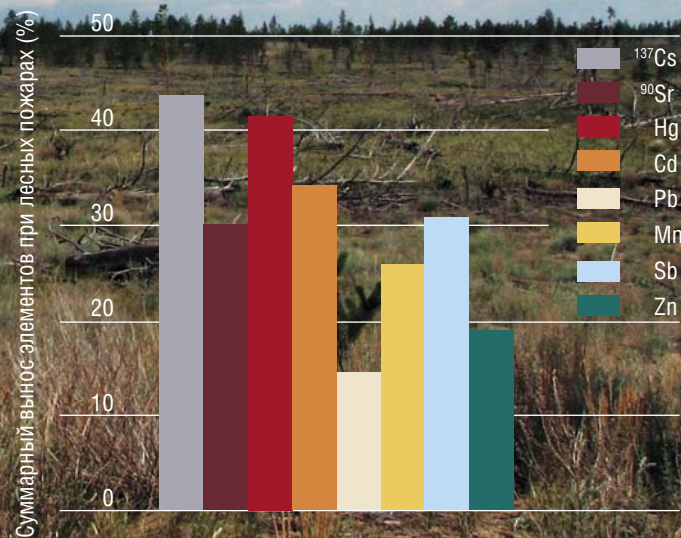
Оказалось, что участок у Ерестной отличался более высоким уровнем выноса ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, Hg, Cd и некоторых других элементов. Причина отличий заключалась в разных погодных условиях. В густом лесу в безветренную

После низовых пожаров в лесу можно собрать большой урожай грибов. К тому же в них будет содержаться меньше тяжелых металлов и радионуклидов



Характер выгорания зависит от влажности подстилки. Наиболее сильно выгорают те места, где весной в первую очередь стаял снег, например – приствольные круги деревьев





погоду пожар обеспечил подъем элементов с восходящим дымовым потоком, однако благодаря отсутствию горизонтального тока воздуха дымовые частицы могли конденсироваться и осесть на месте пожара. А довольно устойчивый ветер у Ерестной воспрепятствовал процессу конденсации.

Существенным фактором оказалась и влажность лесной подстилки. Чем она выше, тем слабее выгорание и меньше «химических потерь» несет лесная экосистема.

Низовые пожары в отличие от верховых характеризуются более слабым выносом всех элементов и могут способствовать их перераспределению на выгоревшей площади. При таких пожарах лишайники, растущие на деревьях, обогащаются кадмием, ртутью и радиоактивным цезием.

Да и в целом в компонентах лесной экосистемы на подветренных сторонах пожарищ или на останках внутри гари, обойденных огнем, фиксируется накопление мигрирующих элементов. Такое явление наблюдается практически везде, где огнем пройдены небольшие площади в несколько гектаров или выгорание на разных участках сильно отличается друг от друга по интенсивности.

Приведенные выше факты свидетельствуют, что поведение элементов при лесных пожарах зависит от целого комплекса факторов, куда входит и тип пожара, и состояние лесных горючих материалов, и погодные условия, и характер распределения элементов в компонентах лесной экосистемы, не считая геохимических особенностей самих элементов.

Суммарный вынос тяжелых металлов и радионуклидов может достигать половины от их исходного содержания в лесной подстилке и других компонентах лесной экосистемы. На фото – на месте этого пожарища в Алтайском крае зеленело около 4 тыс. га хвойного леса. Исходный видовой состав боров на месте пожарищ восстанавливается медленно – в первую очередь горельники зарастают светолюбивыми травами, кустарниками и березой

Опасное соседство

Результаты исследований позволили дать количественную оценку миграции элементов при пожарах. В качестве примера возьмем приобские и ленточные боры Обь-Иртышского междуречья, где было обследовано самое большое количество объектов. При анализе учитывалось среднее содержание элементов в подстилке, удельная активность элементов, а также средний вынос элементов из пожарищ.

Несложные математические расчеты показали, что в 1997 г. пожарами в атмосферу было вынесено 251 т марганца, 19,5 т цинка, 5 т свинца, 197 кг кадмия, 81,3 кг ртути, 166,8 кг сурьмы, цезия-137 с активностью $7,6 \cdot 10^{10}$ Бк, стронция-90 – $1,5 \cdot 10^{10}$ Бк.

Тем же способом можно приблизительно оценить эмиссию элементов по всем лесным пожарам в Сибири. Ежегодная площадь пожарищ, по различным данным, составляет здесь от 5 до 12 млн га, а запасы лесной подстилки в различных регионах колеблются от 5 до 70 т/га. Получается, что ежегодно в лесах Сиби-

ри при пожарах в атмосферную эмиссию вовлечено как минимум 8 100 т марганца, 511 т цинка, 145 т свинца, 5 т кадмия, 3 т ртути, 4 т сурьмы, а также цезия-137 с активностью $1,82 \cdot 10^{12}$ Бк (49,3 Ки) и стронция-90 – $4,75 \cdot 10^{11}$ Бк (12,8 Ки).

Отметим, что эти значения являются минимально возможными, поскольку в расчеты не были включены данные по другим компонентам экосистемы. Не включены вполне правомочно, так как в большинстве обследованных регионов хвоя, травы, кустарники, древесина и другие лесные горючие материалы содержат несравненно более низкие количества элементов, чем в подстилке.

Исключение представляет Ямало-Ненецкий автономный округ, где концентрация, например, цезия-137 в хвое или в широко распространенных кустистых лишайниках на порядок выше, чем в других местах. Поэтому вклад этих компонентов в количество мигрирующего в результате пожаров радиоцезия для севера Сибири может быть довольно существенным.

Следует также отметить, что дальний перенос мигрирующих элементов возможен только при верховых пожарах, а соотношение их числа с числом низовых пожаров трудно поддается прогнозированию.

Тяжелые металлы и радионуклиды рассеиваются по огромной территории Сибири, поэтому, если говорить об опасности химического загрязнения, эти цифры можно считать довольно «мирными». Однако, для людей, которые находятся вблизи пожаров, непосредственное вдыхание таких опасных токсикантов, как соединения ртути, кадмия и искусственных радионуклидов, может оказать весьма негативное воздействие на организм.

Биогеохимическая картина мира сильно изменилась за последние десятилетия. Отходы промышленного производства, испытания ядерной техники, радиоактивные аварии создают принципиально иное распределение микроэлементов, тяжелых металлов и радионуклидов на планете.

В этой ситуации лесные пожары могут сыграть роль спускового механизма, перевода депонированные в компонентах лесной экосистемы потенциально опасные химические элементы в активную летучую форму. И в этой связи они действительно представляют геохимическую угрозу.

В публикации использованы фото автора, а также И. Подгорного, Е. Лазарева и В. Страховенко

Литература

- Валендик Э.Н. Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири. Сибирский экологический журнал, 1996. № 1. С. 1–8.
- 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.
- 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.
- Ярмоненко С.П. «Фундаментальные» мифы, или алхимия XXI века. Химия и жизнь, 2007. № 1. С. 52–56.
- 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.
- Nriagu J.O. Global inventory of natural and antropogenic emission of trace metals to the atmosphere // Nature, 1989. № 279. P. 409–411.

Более 90 % лесных пожаров в мире происходит по вине человека. И если от низовых пожаров лес можно спасти опаживанием, то против верхового такая мера уже не поможет

