

ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВЕТЛОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ, ЗАГРЯЗНЯЕМЫХ ВЫБРОСАМИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДОВ

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области
в рамках научного проекта № 20-44-380009.*



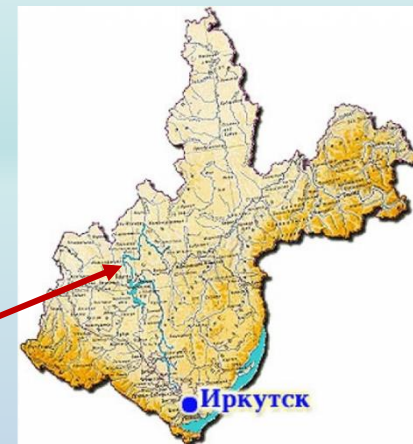
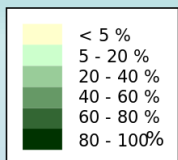
О.В. Калугина¹,
Л.В. Афанасьева²,
Т.М. Харпухаева²,
Т.А. Михайлова¹

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск

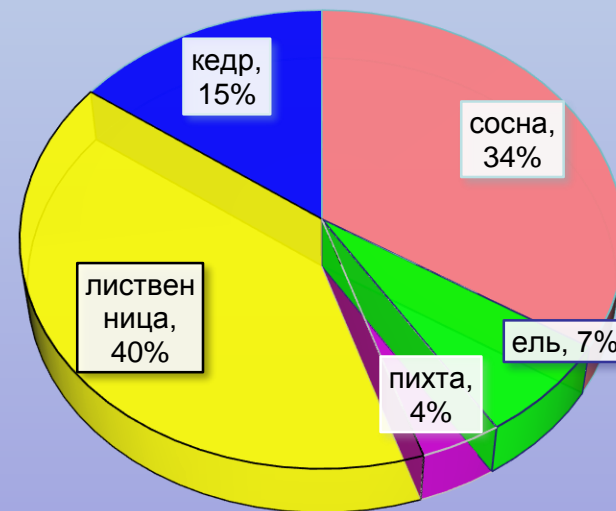
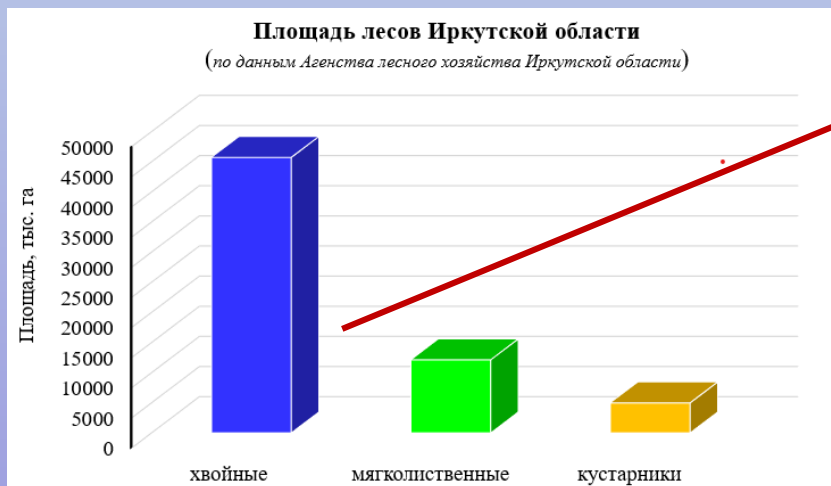
²Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

2022 год

Карта лесистости регионов России



Лесистость Иркутской области составляет 83%

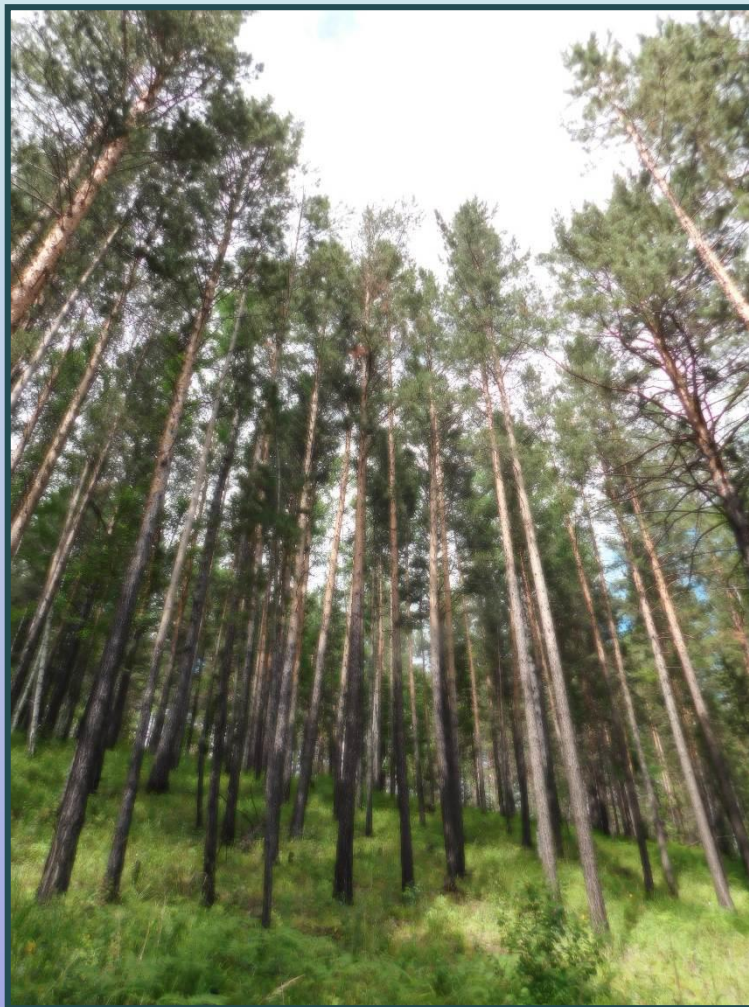


Породный состав хвойных лесов Иркутской области

Функции лесов

Средообразующие

Водоохранные



Санитарно-гигиенические

Эстетические

Средостабилизирующие

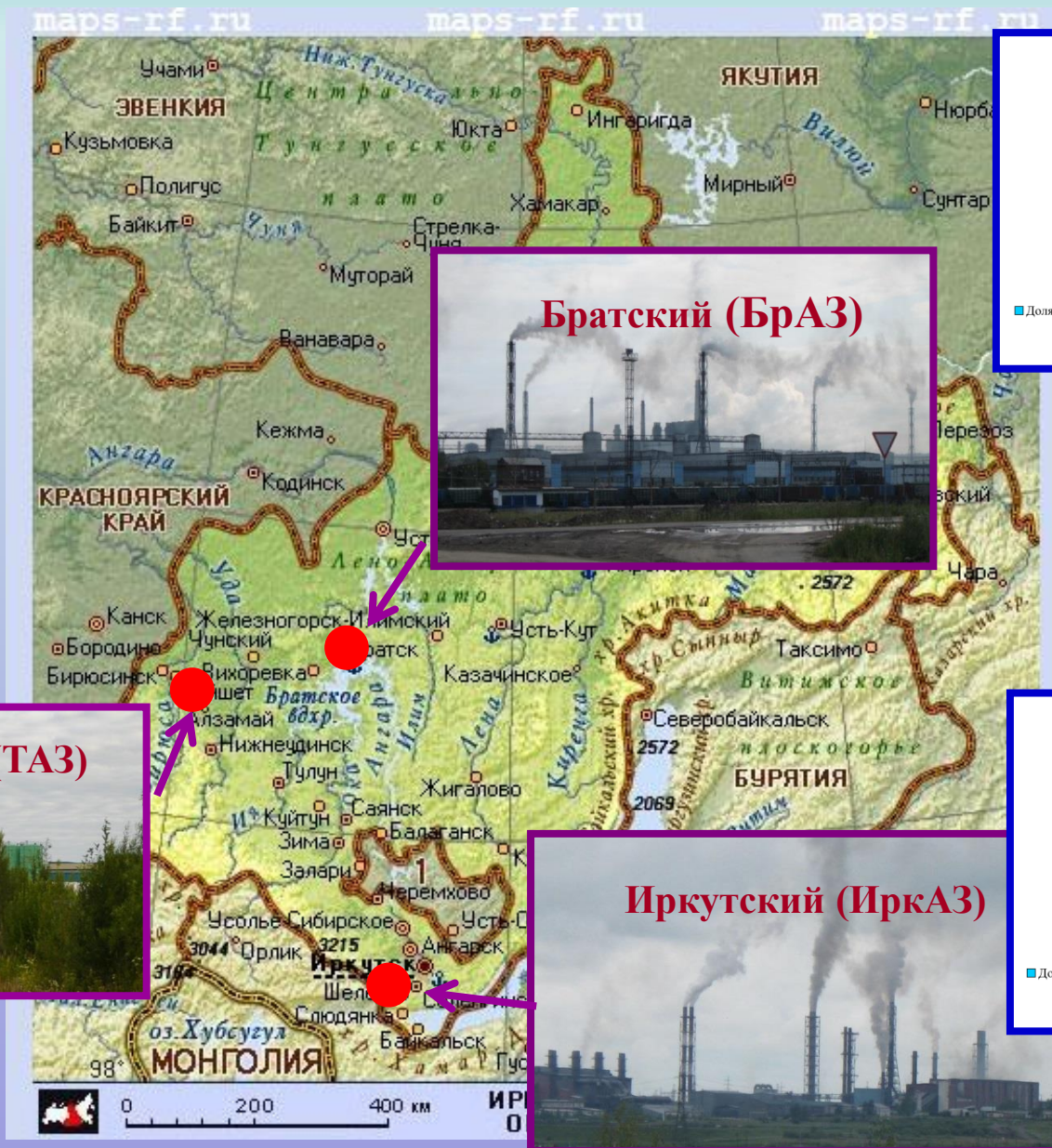
Негативные факторы, оказывающие влияние на лесные экосистемы



Промышленность Иркутской области



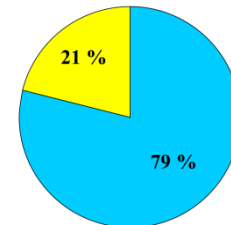
Алюминиевые заводы в Иркутской области



Братский (БрАЗ)



Братский промпцентр



■ Доля выбросов БрАЗа ■ Доля выбросов других предприятий

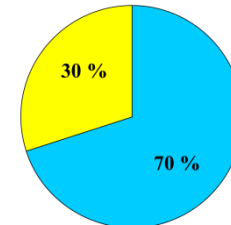
Тайшетский (ТАЗ)



Иркутский (ИркАЗ)



Шелеховский промпцентр



■ Доля выбросов ИркАЗа ■ Доля выбросов других предприятий

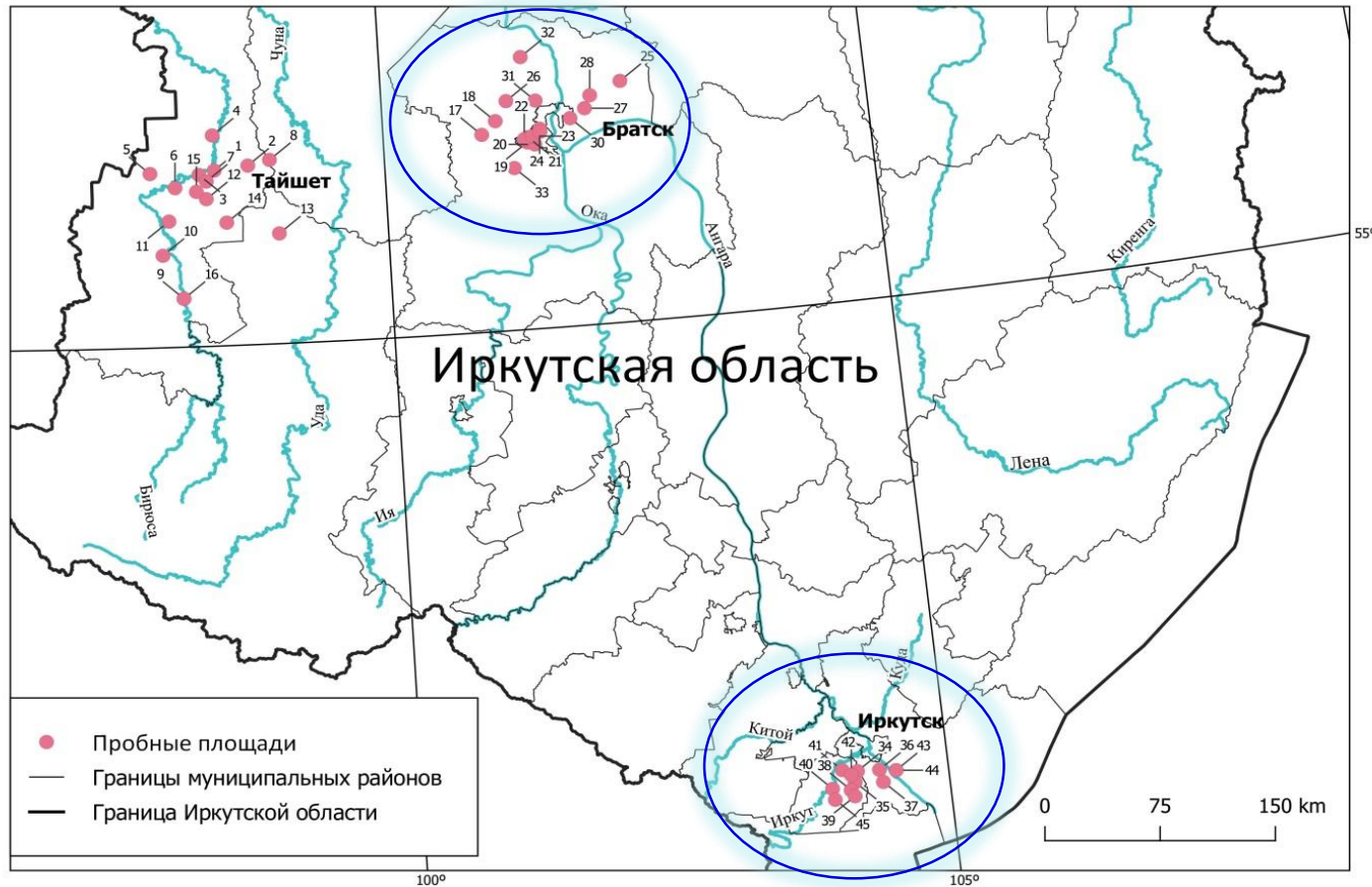
Наиболее токсичные компоненты выбросов алюминиевых заводов:

- Фторсодержащие соединения (фтористый водород и твердые фториды)
- Диоксид серы
- Оксид углерода
- Неорганическая пыль
- Смолистые возгоны, содержащие полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)

Цель работы:

оценить жизненное состояние сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) по нарушению элементного состава хвои и изменению морфоструктурных параметров деревьев в условиях воздействия эмиссий Братского и Иркутского алюминиевых заводов.

Территории обследования



Объекты исследования



Сосна обыкновенная
Pinus sylvestris L.



Лиственница сибирская
Larix sibirica Ledeb.

Содержание химических элементов (среднее значение, мг/кг сухой массы) в хвое сосны и лиственницы на разном удалении от БрАЗа и фоновых территориях

СОСНА

Элемент	Расстояние от БрАЗа, км						Фон
	0-0,5	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80	
N	19226 ^a	18945 ^a	18248 ^a	16714 ^b	16652 ^b	15324 ^b	15943^b
K	2364 ^b	2532 ^b	2465 ^b	3456 ^a	3494 ^a	3792 ^a	3820^a
Ca	5438 ^a	4845 ^a	4884 ^a	4715 ^b	3514 ^b	3014 ^c	3082^c
P	1842 ^b	1964 ^b	2062 ^b	2136 ^a	2033 ^b	2433 ^a	2462^a
Mg	1444	1234	1294	1314	1282	1082	1042
Si	1860 ^a	1510 ^b	1220 ^b	667 ^c	462 ^d	477 ^d	492^d
S	1140 ^a	975 ^{ab}	953 ^{ab}	817 ^b	481 ^c	442 ^c	319^d
Mn	631 ^a	115 ^c	151 ^d	201 ^c	226 ^{bc}	256 ^b	261^b
Al	1305 ^a	765 ^b	472 ^c	272 ^d	171 ^e	161 ^e	159^e
Fe	242 ^a	184 ^b	77,8 ^c	70,1 ^c	84,1 ^c	85,4 ^c	55,7^d
Zn	63,3 ^a	57,5 ^{ab}	50,8 ^b	46,7 ^b	40,6 ^b	39,3 ^b	41,8^b
Na	78,7 ^a	91,4 ^a	56,3 ^b	74,2 ^{ab}	64,8 ^b	38,6 ^c	35,9^c
F	831 ^a	434 ^b	252 ^c	212 ^c	115 ^d	38,4 ^e	19,1^e
Sr	4,78 ^c	5,33 ^{bc}	8,50 ^a	4,43 ^c	4,85 ^c	6,52 ^b	6,43^b
Ti	15,07 ^a	8,86 ^b	8,74 ^b	7,69 ^b	5,57 ^{bc}	4,24 ^c	4,58^c
Ni	15,01 ^a	13,5 ^a	4,89 ^b	3,50 ^c	4,29 ^b	3,78 ^{bc}	3,82^{bc}
Ba	6,47 ^a	5,72 ^b	4,05 ^c	4,73 ^c	4,62 ^c	3,12 ^d	3,13^d
Cu	3,07 ^a	2,51 ^b	2,27 ^b	2,21 ^b	2,41 ^b	1,84 ^b	1,96^b
Sc	0,43 ^b	0,54 ^a	0,49 ^{ab}	0,49 ^{ab}	0,46 ^{ab}	0,46 ^{ab}	0,45^{ab}
Cr	1,58 ^a	0,99 ^b	1,29 ^{ab}	0,76 ^c	0,72 ^c	0,74 ^c	0,37^d
V	1,91 ^a	1,64 ^a	0,88 ^b	0,26 ^c	0,24 ^c	0,24 ^c	0,18^c
Pb	0,25 ^{de}	0,69 ^a	0,50 ^b	0,31 ^d	0,41 ^c	0,42 ^c	0,17^e
As	0,48 ^a	0,35 ^b	0,19 ^c	0,15 ^d	0,16 ^d	0,16 ^d	0,15^d
Li	1,96 ^a	0,24 ^b	0,22 ^b	0,24 ^b	0,22 ^b	0,16 ^c	0,13^d
Sb	0,13	0,14	0,12	0,14	0,12	0,12	0,12
Mo	0,15 ^a	0,11 ^b	0,07 ^{cd}	0,08 ^c	0,07 ^{cd}	0,07 ^{cd}	0,06^d
La	0,03 ^c	0,05 ^b	0,12 ^a	0,06 ^b	0,04 ^{bc}	0,04 ^{bc}	0,04^{bc}
Ce	0,03 ^c	0,06 ^b	0,17 ^a	0,07 ^b	0,03 ^c	0,04 ^c	0,04^c
Co	0,10 ^a	0,09 ^a	0,04 ^b	0,03 ^b	0,04 ^b	0,04 ^b	0,04^b
Cd	0,10^a	0,06^c	0,09^{ab}	0,11^a	0,09^{ab}	0,09^{ab}	0,03^c

ЛИСТВЕННИЦА

Элемент	Расстояние от БрАЗа, км						Фон
	0-0,5	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80	
N	23805	24115	22632	21164	19748	19008	19296
Si	12737 ^a	8140 ^b	8430 ^b	7085 ^{bc}	6418 ^c	6326 ^c	6455^c
K	5336	5468	5322	4748	4404	4645	4814
Ca	6091 ^a	6790 ^a	5352 ^{ab}	5016 ^b	4030 ^c	3308 ^c	3377^c
P	1645 ^b	1892 ^b	2796 ^a	2662 ^a	2272 ^a	2572 ^a	2408^a
Mg	2471 ^a	2534 ^a	2378 ^a	2356 ^a	1884 ^b	1788 ^b	1767^b
S	2035 ^a	1863 ^a	1856 ^a	1422 ^b	757 ^c	764 ^c	561^d
Mn	834 ^a	125 ^d	129 ^d	141 ^d	183 ^c	286 ^b	301^b
Al	1904 ^a	662 ^b	446 ^c	265 ^d	158 ^e	152 ^e	160^e
Fe	268 ^a	259 ^a	185 ^b	157 ^b	88,9 ^c	84,9 ^c	97,3^c
Ba	126 ^a	88,2 ^b	72,3 ^{bc}	63,9 ^c	47,6 ^d	44,2 ^d	45,1^d
Na	125 ^a	80,5 ^b	53,8 ^c	52,9 ^c	49,3 ^c	38,4 ^d	35,3^d
F	736 ^a	413 ^b	119 ^c	83,8 ^c	59,1 ^d	35,1 ^e	24,2^e
Sr	31,3 ^c	41,8 ^b	51,4 ^a	26,4 ^{cd}	25,1 ^{cd}	22,8 ^d	22,6^d
Zn	35,3 ^a	36,4 ^a	22,5 ^b	21,6 ^b	21,8 ^b	18,2 ^{bc}	16,3^c
Ti	13,9 ^a	12,1 ^{ab}	11,3 ^b	9,62 ^b	9,12 ^b	9,08 ^b	6,82^c
Ni	12,9 ^a	10,5 ^a	6,33 ^b	4,97 ^c	5,62 ^{bc}	4,82 ^c	4,54^c
Cu	4,33 ^b	6,91 ^a	3,82 ^b	3,04 ^b	3,61 ^b	3,28 ^b	3,34^b
Sc	1,10 ^a	0,99 ^a	0,93 ^a	0,75 ^b	0,86 ^{ab}	0,84 ^{ab}	0,76^b
Cr	2,84 ^a	0,81 ^b	0,48 ^d	0,61 ^c	0,49 ^d	0,39 ^d	0,41^d
V	2,85 ^a	2,09 ^b	0,97 ^c	0,76 ^d	0,41 ^e	0,42 ^e	0,31^e
Pb	0,30 ^b	0,66 ^a	0,33 ^b	0,28 ^b	0,20 ^c	0,19 ^c	0,20^c
Sb	0,29 ^a	0,26 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,24 ^b	0,24 ^b	0,21 ^b	0,20^b
As	0,74 ^a	0,55 ^b	0,77 ^a	0,27 ^c	0,24 ^c	0,20 ^c	0,19^c
Mo	0,15 ^a	0,11 ^b	0,11 ^b	0,09 ^{bc}	0,08 ^c	0,08 ^c	0,09^{bc}
Li	2,91 ^a	0,22 ^b	0,11 ^c	0,09 ^{cd}	0,10 ^c	0,08 ^d	0,07^d
La	0,07 ^{bc}	0,11 ^a	0,07 ^{bc}	0,08 ^b	0,06 ^c	0,07 ^{bc}	0,07^{bc}
Cd	0,14 ^a	0,12 ^b	0,16 ^a	0,11 ^b	0,14 ^a	0,11 ^b	0,06^c
Co	0,14 ^a	0,12 ^{ab}	0,11 ^{ab}	0,12 ^{ab}	0,08 ^b	0,06 ^c	0,06^c
Ce	0,06^c	0,12^a	0,09^b	0,09^b	0,05^c	0,05^c	0,05^c

Соотношения* концентраций элементов в хвое сосны обыкновенной и лиственницы сибирской на разном удалении от БрАЗа и на фоновых территориях

***Над чертой – данные для сосны, под чертой – для лиственницы.*

Соотношения элементов	Расстояние от БрАЗа, км						Фоновые территории
	0-0,5	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80	
N:P:K	<u>82:8:10**</u>	<u>81:8:11</u>	<u>80:9:11</u>	<u>75:10:15</u>	<u>75:9:16</u>	<u>74:10:16</u>	<u>72:11:17</u>
	78:5:17	77:6:17	74:9:17	74:9:17	74:9:17	78:5:17	73:9:18
N:S	<u>94:6</u>	<u>95:5</u>	<u>95:5</u>	<u>95:5</u>	<u>97:3</u>	<u>98:2</u>	<u>98:2</u>
	92:8	93:7	92:8	94:6	96:4	97:3	97:3
Ca:K	<u>70:30</u>	<u>66:34</u>	<u>66:34</u>	<u>58:42</u>	<u>50:50</u>	<u>47:53</u>	<u>45:55</u>
	53:47	55:45	50:50	51:49	48:52	46:54	41:59
Ca:P	<u>75:25</u>	<u>71:29</u>	<u>70:30</u>	<u>69:31</u>	<u>63:37</u>	<u>58:42</u>	<u>56:44</u>
	79:21	78:22	66:34	65:35	64:36	62:38	58:42
Ca:S	<u>83:17</u>	<u>83:17</u>	<u>84:16</u>	<u>85:15</u>	<u>88:12</u>	<u>88:12</u>	<u>91:9</u>
	72:25	78:22	74:26	78:22	84:16	87:13	86:14
P:S	<u>62:38</u>	<u>67:33</u>	<u>68:32</u>	<u>72:28</u>	<u>81:19</u>	<u>85:15</u>	<u>89:11</u>
	45:55	50:50	60:40	65:35	75:25	80:20	81:19
P:F	<u>69:31</u>	<u>82:18</u>	<u>89:11</u>	<u>91:9</u>	<u>95:5</u>	<u>98:2</u>	<u>99:1</u>
	69:31	82:18	96:4	97:3	97:3	98:2	99:11
Na:F	<u>16:84</u>	<u>30:70</u>	<u>27:73</u>	<u>28:72</u>	<u>45:55</u>	<u>68:32</u>	<u>73:27</u>
	56:44	69:31	82:18	82:18	89:11	91:9	91:9
Mn:S	<u>36:64</u>	<u>11:89</u>	<u>14:86</u>	<u>20:80</u>	<u>32:68</u>	<u>37:63</u>	<u>45:55</u>
	29:71	6:94	6:94	9:91	19:81	31:69	35:65
Mn:Fe	<u>72:28</u>	<u>38:62</u>	<u>66:34</u>	<u>74:26</u>	<u>73:27</u>	<u>75:25</u>	<u>82:18</u>
	78:22	33:67	47:53	49:51	69:31	80:20	86:14
Mn:F	<u>44:56</u>	<u>21:79</u>	<u>37:63</u>	<u>49:51</u>	<u>66:34</u>	<u>86:14</u>	<u>93:7</u>
	39:61	23:77	52:48	63:37	76:24	86:14	93:7

Индекс биогеохимической трансформации (Zbt).

$$Zbt = \sum_{l=1}^{n1} EF + \sum_{l=1}^{n2} DF - (n1 + n2 - 1),$$

где EF – индекс концентрации, а DF – индекс деконцентрации, $n1$ и $n2$ число элементов с $EFl > 1.5$ и $DFl > 1.5$, соответственно, EF вычисляется как отношение $Cpol/Cb$, а индекс деконцентрации – $Cb/Cpol$, где $Cpol$ and Cb концентрации элементов на загрязненных и фоновых территориях, соответственно.

Коэффициент Zbt является количественным выражением дисбаланса химических элементов в растениях, возникающего в результате техногенной нагрузки.

Он имеет пять градаций: минимальную (10-20), среднюю (21-30), высокую (31-40), очень высокую (41-60), чрезвычайно высокую (61 и более) (Kasimov et al., 2012).

Древесная порода	Расстояние от алюминиевых заводов, км					
	0-0,5	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80
БрАЗ						
сосна	112 ^a ±10,8	61,7 ^b ±4,9	36,9 ^c ±3,8	22,4 ^d ±0,2	12,3 ^e ±0,2	4,7 ^f ±0,1
лиственница	100 ^a ±8,8	49,8 ^b ±0,9	25,2 ^c ±0,6	16,5 ^d ±0,4	5,9 ^e ±0,8	-
ИркАЗ						
сосна	42,9 ^a ±14,8	27,8 ^b ±8,9	26,6 ^b ±3,8	12,7 ^c ±2,1	6,7 ^d ±3,2	-
лиственница	53,1 ^a ±4,8	21,9 ^b ±4,4	18,5 ^c ±3,6	12,9 ^c ±3,8	6,1 ^d ±0,1	-

Деревья сосны и лиственницы, угнетенные выбросами БрАЗа и фоновые древостои



сосна



лиственница

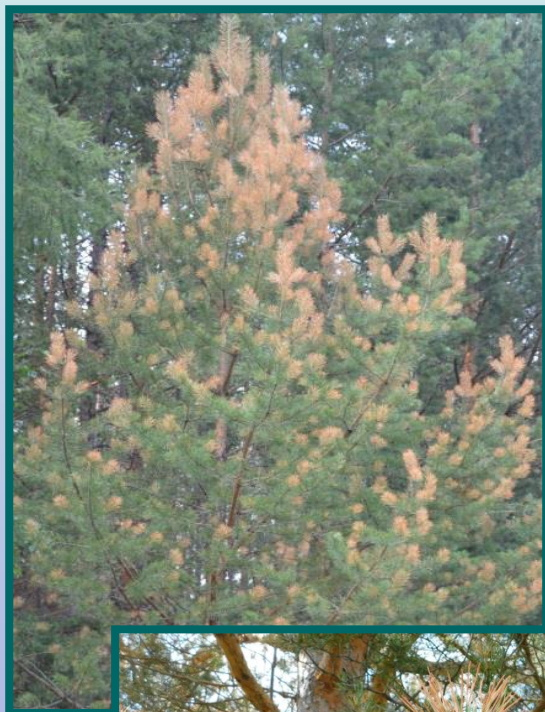


лиственница

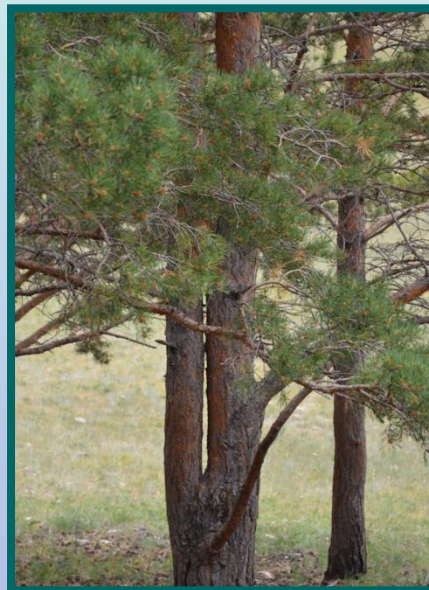
Некрозы хвои сосны в окрестностях ИркаЗа



Некротизированная хвоя сосны и лиственницы в зоне воздействия выбросов БрАЗа



Суховершинность, флагообразная форма кроны и дефекты стволов деревьев на территории, загрязняемой выбросами БрАЗа



Морфоструктурные параметры побегов и хвои деревьев сосны обыкновенной на разном удалении от алюминиевых заводов в сравнении со фоновыми значениями

Параметры	Расстояние от алюминиевых заводов, км						Фоновые значения
	Промзона (0-0,5)	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80	
БрАЗ							
Длина побега, мм	55,92±19,57	61,78±18,29	69,60±28,42	81,88±26,04	135,07±3,56	153,30±13,72	162,14±35,68
Масса побегов 2-го года жизни, г	0,40±0,18	0,54±0,30	0,69±0,46	0,89±0,63	2,02±0,94	2,64±0,67	2,71±0,99
Масса хвои с 1 побега, г	2,29±1,28	2,71±0,81	2,82±1,29	3,30±0,96	4,97±1,69	5,42±1,29	6,35±1,14
Масса 1 хвоинки, мг	28,86±1,86	31,88±2,67	29,37±2,19	28,33±2,77	39,60±3,05	34,07±3,85	39,00±2,67
Количество пар хвоинок, шт.	39,67±17,04	42,50±7,86	48,01±6,83	58,25±13,95	62,75±17,56	79,54±8,26	81,40±26,73
Длина хвои, мм	54,51±5,92	51,88±5,14	52,49±6,72	64,38±12,71	59,50±4,51	64,05±5,69	72,60±5,86
ИркАЗ							
Длина побега, мм	57,70±20,25	72,63±11,32	138,90±17,64	149,80±16,11	156,24±17,21	173,30±20,88	162,14±35,68
Масса побегов 2-го года жизни, г	0,47±0,15	0,89±0,26	1,87±0,71	1,89±0,79	2,07±0,28	2,48±0,63	2,71±0,99
Масса хвои с 1 побега, г	2,84±±0,61	3,42±0,34	5,88±1,50	6,14±1,49	6,18±1,19	6,28±1,11	6,35±1,14
Масса 1 хвоинки, мг	31,77±3,32	42,09±3,6	43,17±4,13	37,85±3,52	32,97±2,17	31,22±2,63	39,00±2,67
Количество пар хвоинок, шт.	44,70±13,80	40,63±6,59	68,10±21,91	81,10±11,26	93,72±14,51	100,60±12,27	81,40±26,73
Длина хвои, мм	55,69±3,63	61,92±6,33	68,40±7,92	66,24±5,17	66,29±4,74	67,09±2,42	72,60±5,86

Морфоструктурные параметры побегов и хвои деревьев лиственницы сибирской на разном удалении от алюминиевых заводов в сравнении со фоновыми значениями

Параметры	Расстояние от алюминиевых заводов, км						Фоновые значения
	Промзона (0-0,5)	1-5	6-20	21-40	41-60	61-80	
БрАЗ							
Длина побегов, мм	79,52±28,72	99,72±23,51	105,27±11,64	113,84±21,07	121,50±24,31	165,59±21,30	168,56±13,64
Масса побегов 2-го года жизни, г	0,27±0,14	0,42±0,13	0,47±0,23	0,64±0,16	0,78±0,39	0,81±0,26	0,83±0,11
Масса хвои с 1 побега, г	0,71±0,19	0,85±0,36	1,04±0,32	1,79±0,52	2,18±0,87	3,01±1,05	2,97±0,40
Количество брахибластов, шт.	9,60±3,41	13,67±3,39	14,76±3,58	20,18±4,97	25,12±7,44	20,78±3,83	18,94±2,07
Длина хвои, мм	18,86±2,47	24,54±3,72	27,73±4,21	33,49±3,68	34,66±3,10	36,269±3,81	36,62±2,48
ИркАЗ							
Длина побегов, мм	89,42±24,37	96,61±19,84	102,65±23,14	109,49±23,25	154,98±29,02	159,26±19,83	168,56±13,64
Масса побегов 2-го года жизни, г	0,36±0,07	0,34±0,13	0,38±0,10	0,54±0,21	0,57±0,24	0,78±0,14	0,83±0,11
Масса хвои с 1 побега, г	0,86±0,13	0,94±0,29	1,01±0,23	1,15±0,36	1,59±0,29	2,41±1,73	2,97±0,40
Количество брахибластов, шт.	11,12±2,14	11,14±3,78	14,21±2,78	15,62±3,74	16,91±3,69	18,34±3,21	18,94±2,07
Длина хвои, мм	31,46±1,95	32,44±1,56	33,95±2,79	33,25±2,96	34,41±2,59	35,99±2,87	36,62±2,48

Таким образом, загрязнение выбросами алюминиевых заводов, особенно Братского, охватывает обширные территории. В условиях нерегулируемого поступления элементов-поллютантов в ассимиляционных органах деревьев происходит их значительное накопление, приводящее к дисбалансу элементного состава и уменьшению ростовых параметров деревьев, что наиболее явно прослеживается у деревьев сосны. В результате на территориях, загрязняемых выбросами алюминиевых заводов, происходит формирование фауных древостоев, что существенно снижает качественные и эстетические характеристики древостоев, доминирующих в лесах Иркутской области.

Спасибо за внимание!

