



**О.С. Железнова**, к.б.н., лаборант

**С.А. Тобратов**, к.б.н., руководитель лаборатории  
геохимии ландшафтов Рязанского государственного  
университета имени С.А. Есенина

**РОЛЬ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РЕГУЛИРОВАНИИ  
МАССОПОТОКОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В  
ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ  
(НА ПРИМЕРЕ МЕЩЕРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ)**

## Упрощенное уравнение масс-баланса для оценки устойчивости экосистем к антропогенному поступлению тяжелых металлов

$$M_{dep} = M_{upt} + M_{leach},$$

где  $M_{dep}$  – общее поступление металла с осадками и «сухими» выпадениями из атмосферы,

$M_{upt}$  – допустимое накопление металла в ежегодном приросте древесной растительности,

$M_{leach}$  – допустимый вынос металла со стоком.

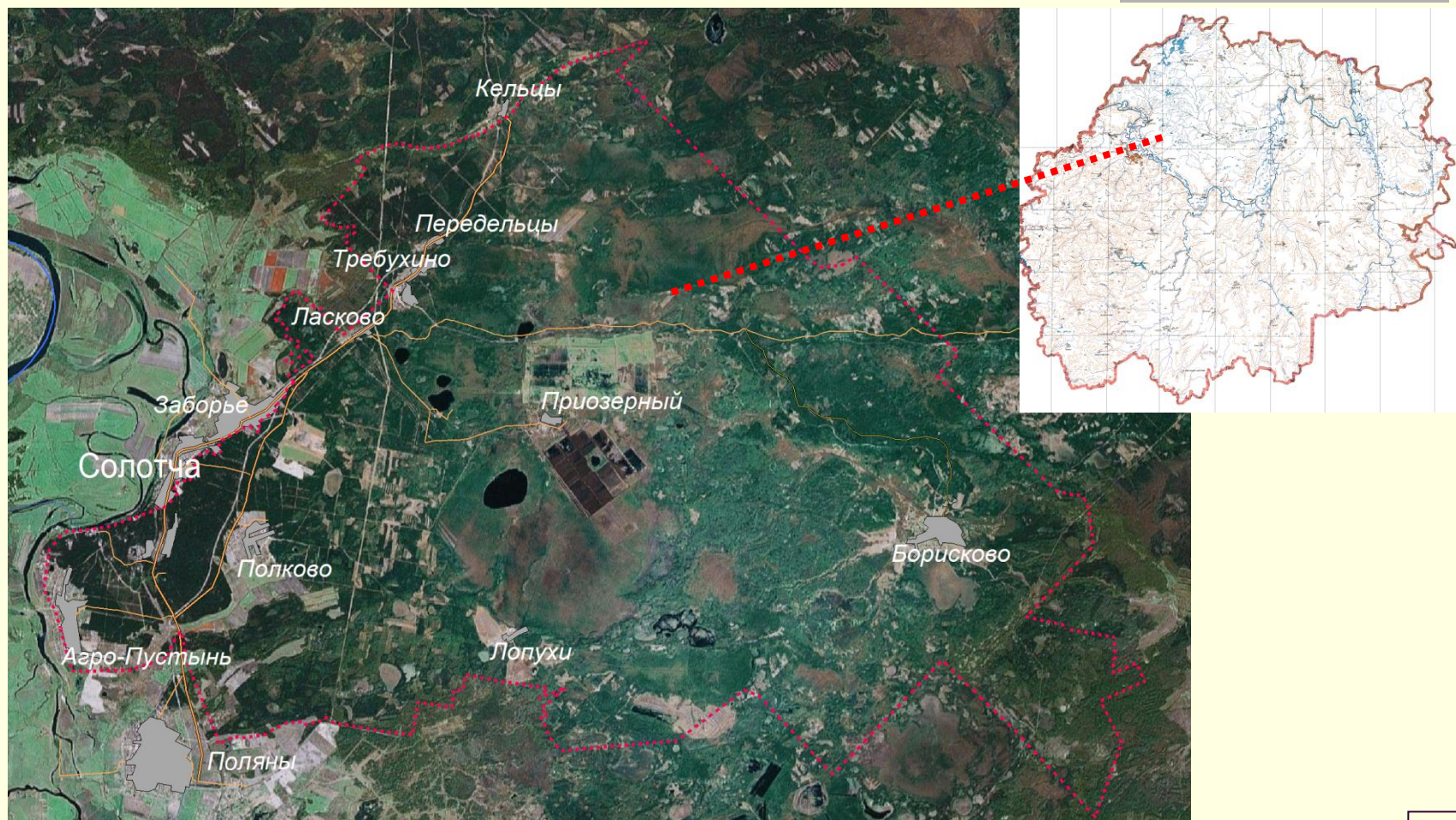
# Цель исследования –

---

- рассмотреть факторы, определяющие регулируемую роль растительности лесных экосистем по отношению к потокам тяжелых металлов (на примере *Cu*, *Zn*, *Cd*) и оценить потенциал фитомассы по их долговременной иммобилизации.



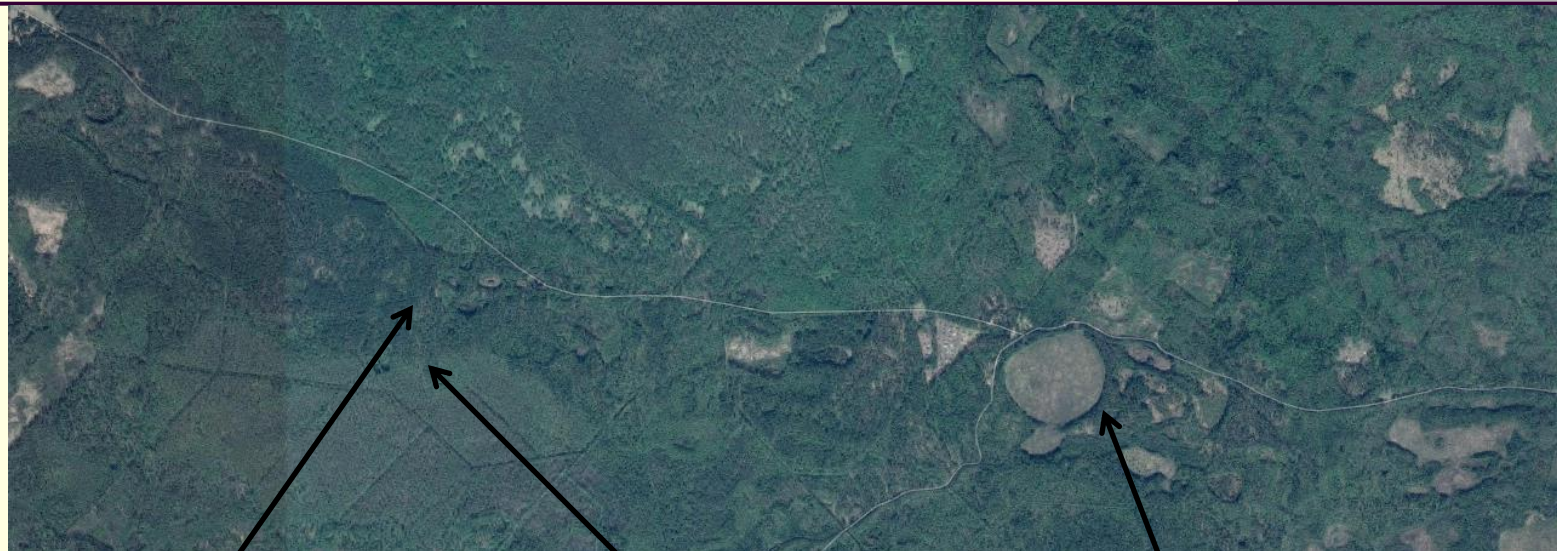
# Объект исследования



**Рис. 1. Локализация объекта исследований – подтаежных лесных экосистем Южной Мещеры**



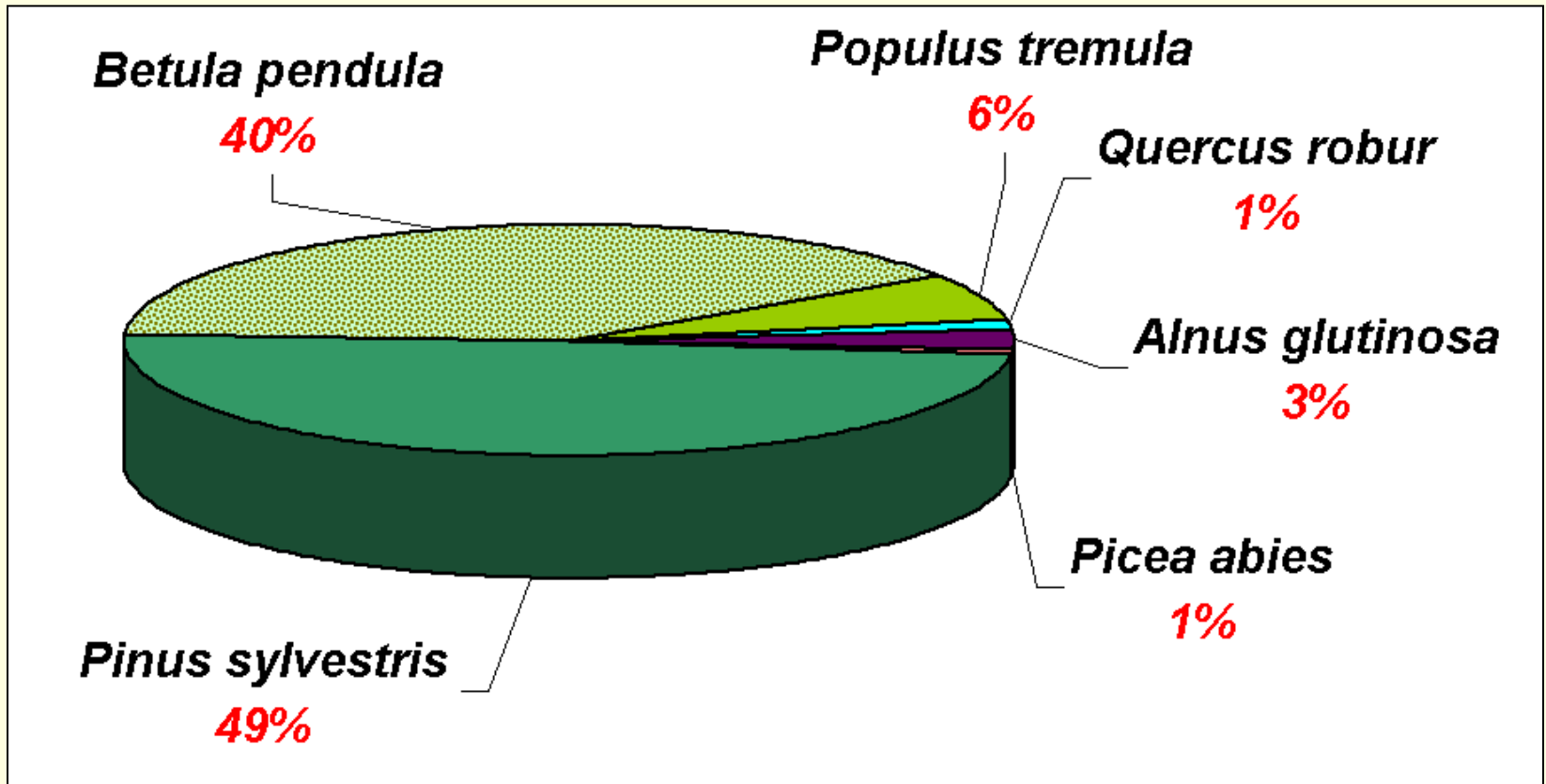
## Рис. 2. Мозаичность ландшафтной структуры Мещеры (на примере Дорофеевской равнины VIII)



5



Рис. 3. Породный состав древостоев территории исследования, %

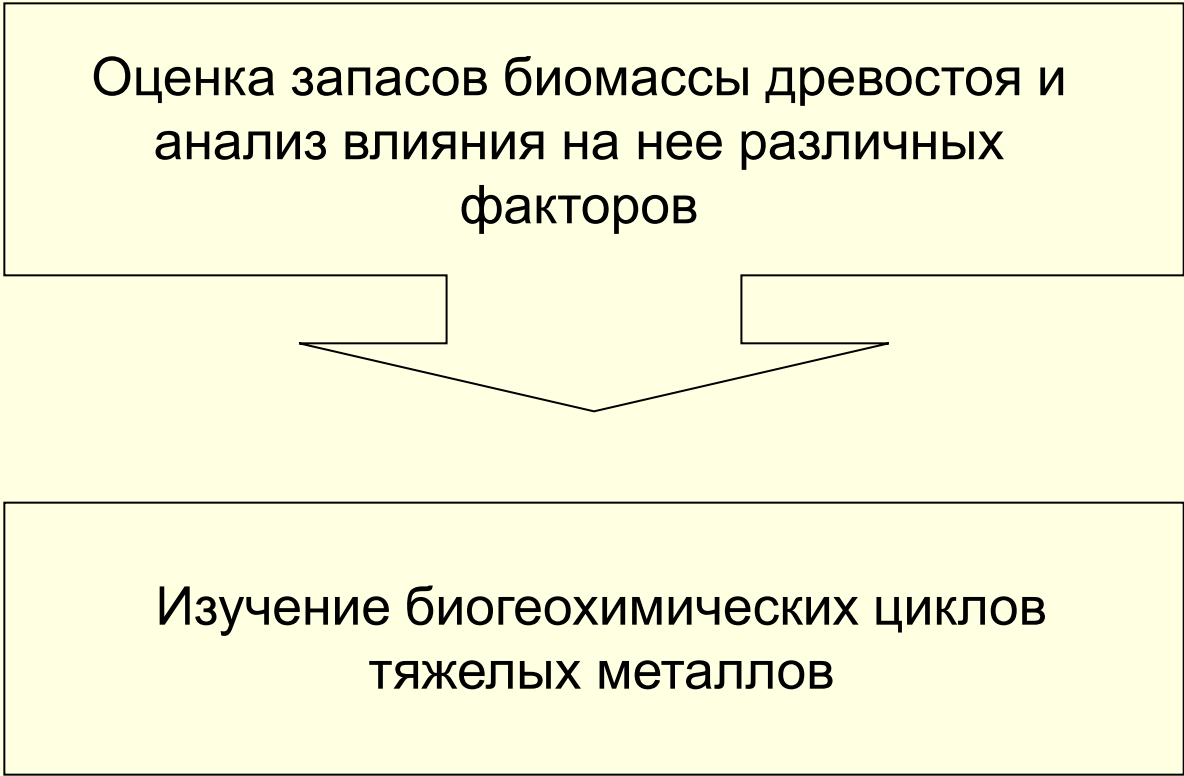


# Этапы работы

---

1)

Оценка запасов биомассы древостоя и  
анализ влияния на нее различных  
факторов



2)

Изучение биогеохимических циклов  
тяжелых металлов

# Методы исследования

---

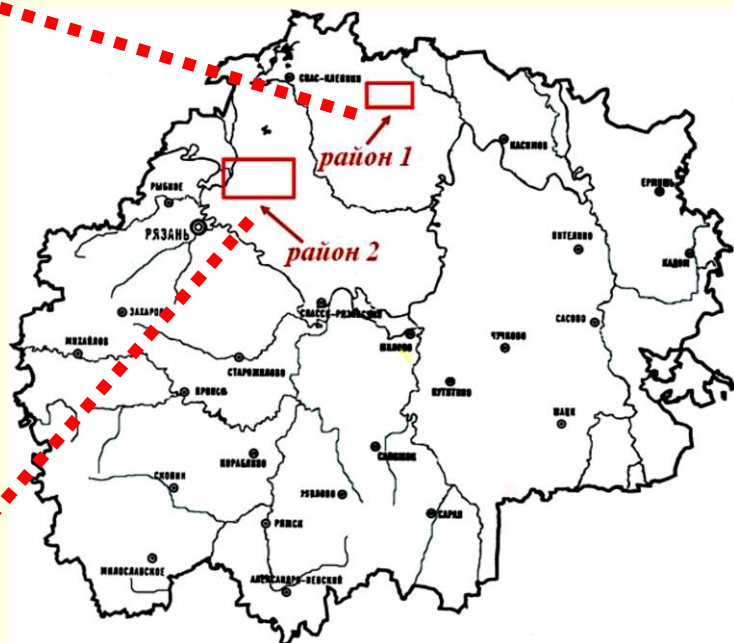
- Обработка данных Государственного учета лесного фонда (материалов лесной таксации) для Солотчинского лесхоза (300 лесных кварталов, более 3000 выделов).
- Запасы отдельных фракций фитомассы рассчитывались на основе разработанных нами регрессионных зависимостей запасов (из базы данных В.А. Усольцева) от таксационных показателей древостоя.
- При анализе ландшафтной структуры территории использованы топографические карты и данные бурения недр, применялись метод профилирования и фациально-урочищный анализ.



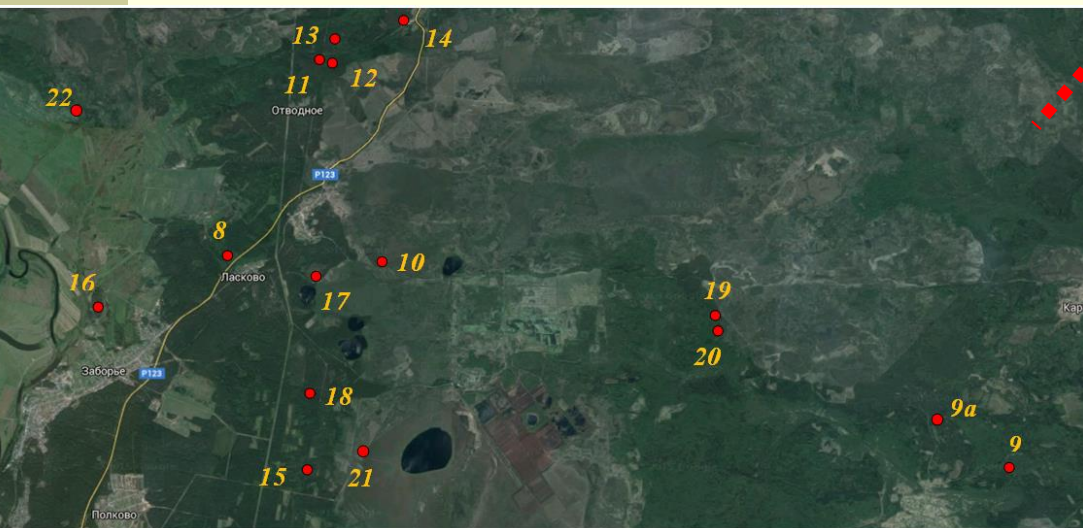
# Рис. 4. Локализация ключевых участков почвенно-биогеохимического опробования в пределах районов исследования



**Район 1** - Бассейн р. Игловка  
(Тумский морфоструктурный блок)



**Район 2** – Солотчинско-  
Деулинский ландшафт  
(Приокский морфоструктурный блок)



**Табл. 1. Методы химического анализа образцов  
фитомассы и почв**

Определение	Методы определения	Объем измерений
<p align="center"><u>тяжелых</u> <u>металлов</u> (<i>Cu, Zn, Cd</i>)</p>	<p align="center"><i>Атомно-абсорбционный метод</i></p> <p align="center">(ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002; МУК 4.1.985-00; РД 52.18.191-89; ГОСТ 17.4.4.02-84; Методические рекомендации...,1981 Методические указания ...,1992)</p>	<p align="center">Свыше 400 образцов</p>

**Табл. 2. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах  
Южной Мещеры в сравнении с экологическими  
нормативами содержания металлов (ЭН) для песчаных и  
торфяных почв**

ТМ Форма		<i>Cu</i>		<i>Zn</i>		<i>Cd</i>	
		Минер.	Торф.	Минер.	Торф.	Минер.	Торф.
<i>ААБ</i>	Мещера	0,10 (0,07-0,14)	0,17 (0,10-0,23)	1,82 (0,90-3,45)	<b>7,72</b> <b>(5,25-12,00)</b>	<b>0,06</b> <b>(0,04-0,09)</b>	<b>0,18</b> <b>(0,12-0,22)</b>
	ЭН	0,24	0,32	6,00	2,45	0,06	0,08
<i>Вал.</i>	Мещера	<b>2,77</b> <b>(2,34-4,08)</b>	5,30 (4,43-6,38)	24,67 (8,15-56,21)	27,05 (20,37-37,55)	0,14 (0,05-0,31)	0,31 (0,15-0,43)
	ЭН	2,35	17,50	165,00	57,00	0,34	0,40

Примечание: ЭН – верхний предел накопления элемента в почве данного типа при отсутствии техногенного загрязнения (с учетом типологических и региональных особенностей почвообразования).

В скобках указан диапазон варьирования концентраций ТМ в пределах участков почвенно-биогеохимического опробования.

*ААБ* – подвижные формы металла (экстракция ацетатно-аммонийным буфером с рН 4,8).

*Вал.* – валовые несиликатные формы.

Минер. – минеральные почвы;

Торф. – торфяные почвы



# Результаты и обсуждение

---

Регулирующая роль растительности по отношению к потокам ТМ и в целом биогеохимическая устойчивость лесных экосистем к поступлению поллютантов определяются следующими основными факторами:

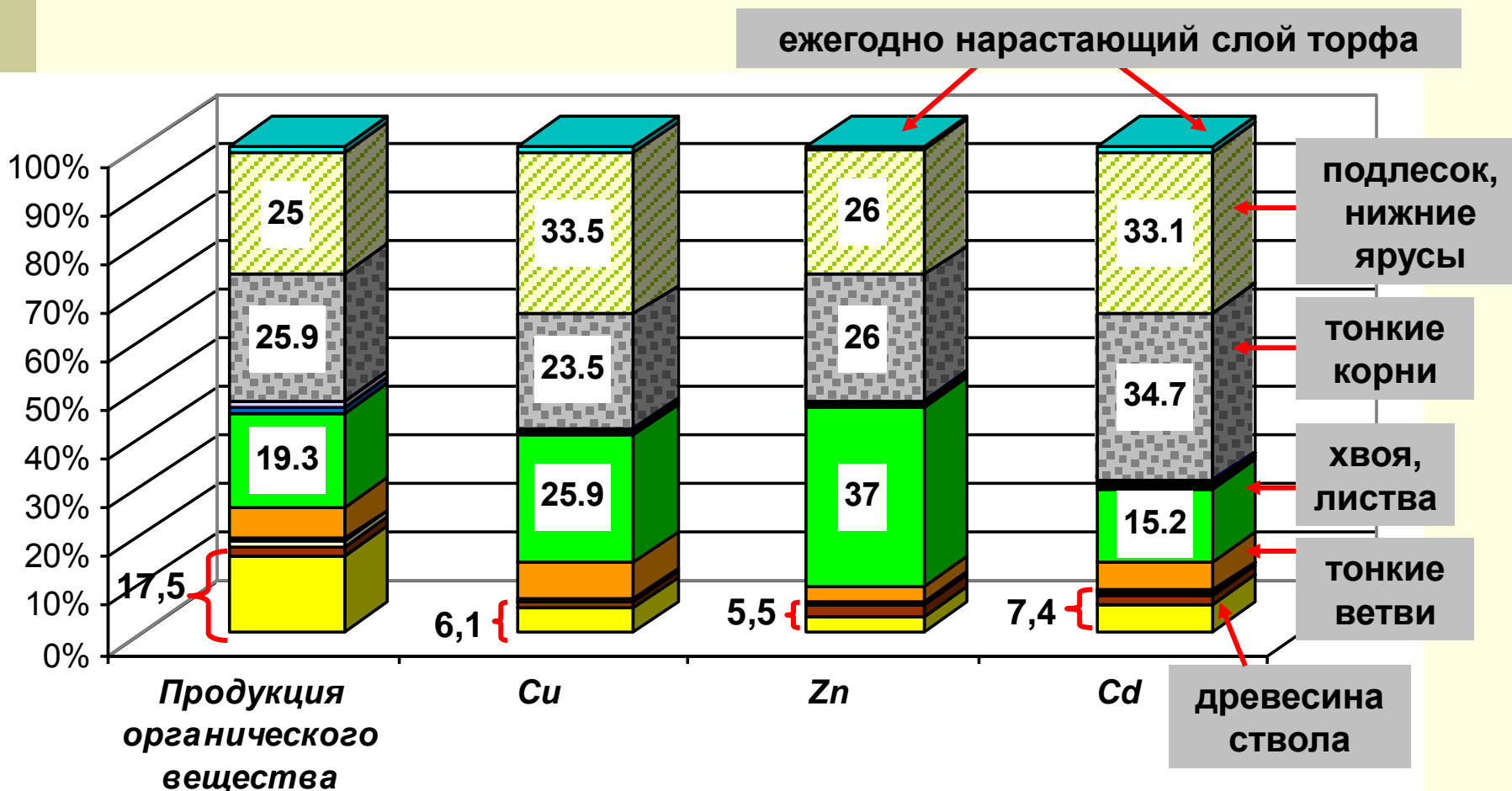
- 1) закономерностями транслокации и аккумуляции ТМ в растительных органах;
- 2) видовым составом растительности и геохимической специализацией видов;
- 3) уровнем биологической продуктивности древостоя;
- 4) структурой земель лесного фонда, в том числе долей антропогенно нарушенных земель.

# 1<sup>ый</sup> фактор – закономерности транслокации и аккумуляции ТМ в растительных органах

**Табл. 3. Запасы органического вещества и тяжелых металлов в лесных экосистемах Южной Мещеры**

Ярусы, фракции фитомассы		Фитомасса		Тяжелые металлы в фитомассе					
				Cu		Zn		Cd	
		<i>т/га</i>	%	<i>г/га</i>	%	<i>г/га</i>	%	<i>г/га</i>	%
Древесный ярус	<b>Надземная часть</b>	<b>84.24</b>	<b>77.4</b>	<b>199.27</b>	<b>67.8</b>	<b>1863.37</b>	<b>68.1</b>	<b>18.39</b>	<b>61.2</b>
	<i>в т.ч. в древесине ствола</i>	63.91	58.7	116.80	39.7	617.69	22.6	11.00	36.6
	<i>в т.ч. в коре ствола</i>	6.72	6.2	20.54	7.0	502.76	18.4	2.48	8.3
	<i>в т.ч. в тонких ветвях*</i>	3.87	3.6	24.24	8.2	225.04	8.2	1.59	5.3
	<i>в т.ч. в хвое и листьях</i>	3.70	3.4	26.43	9.0	337.68	12.3	1.26	4.2
	<b>Подземная часть</b>	<b>19.05</b>	<b>17.5</b>	<b>59.12</b>	<b>20.1</b>	<b>601.74</b>	<b>22.0</b>	<b>8.78</b>	<b>29.2</b>
	<i>в т.ч. в тонких корнях**</i>	4.24	3.9	21.00	7.1	234.07	8.6	2.69	8.4
Подлесок, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы		5.52	5.1	35.69	12.1	269.18	9.9	2.89	9.6
<b>Итого по фитоценозу</b>		<b>108.81</b>	<b>100</b>	<b>294.08</b>	<b>100</b>	<b>2734.29</b>	<b>100</b>	<b>30.06</b>	<b>100</b>

**Рис. 5. Биологическая продуктивность лесных экосистем Южной Мещеры и ежегодная фиксация ТМ в приросте структурных компонентов фитоценозов (%)**





# Наиболее общие закономерности распределения элементов в биомассе древесных пород

- 1) активная транслокация Cu и Zn в надземные органы и повышенная аккумуляция Cd в тканях корней;
- 2) повышение селективности биопоглощения в направлении: корни < тонкие ветви < листья, что связано с необходимостью защиты фотосинтетического аппарата от избытка ТМ, которые могут вызвать токсические эффекты;
- 3) накопление в древесине Cd в связи с его ксилемным транспортом преимущественно в форме свободного иона Cd<sup>2+</sup>;
- 4) повышенная аккумуляция в древесине Cu, связанная с ее важной ролью в лигнификации ксилемы и высоким сродством к материалу клеточных стенок.
- 5) Указанные закономерности могут существенно варьировать в зависимости от видовой специфики растений. Например, *Populus tremula* накапливает высокие концентрации Cd в листьях, что связано не только с ее гумидокатностью и спецификой мембранных транспортных систем, но и с особенностями метаболизма тиоловых соединений.

## 2<sup>ой</sup> фактор – видовой состав и геохимическая специализация растений

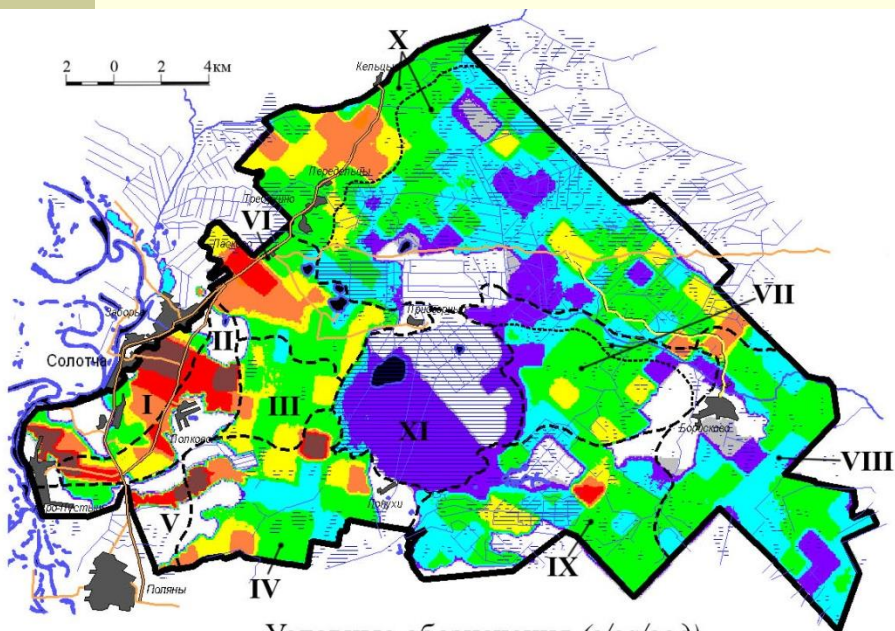
**Табл. 4. Корреляция ( $k$ ) параметров биогенной миграции тяжелых металлов – ежегодной иммобилизации в тканях ствола и комля ( $M_{upt}$ ) и рецикличной миграции ( $M_{cycl}$ ) – с породным составом древостоя**

ТМ \ Параметр	$k$ между $M_{upt}$ ( $M_{cycl}$ ) и	
	% сосны	% березы и осины
<b><i>Cu</i></b>	<b>0.45</b> (0.04)	<b>-0.43</b> (-0.05)
<b><i>Zn</i></b>	<b>-0.51</b> (-0.23)	<b>0.56</b> (0.26)
<b><i>Cd</i></b>	<b>-0.01</b> (-0.14)	<b>0.04</b> (0.15)

Примечание: при расчете рецикличной миграции ( $M_{cycl}$ ) учтены периодически обновляющиеся ткани и органы растений древесного яруса (хвоя и листья, тонкие ветви (диаметр  $\leq 5$  мм), тонкие корни (диаметр  $\leq 5$  мм)), растения травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Коэффициенты корреляции, выделенные полужирным шрифтом, значимы на высоком уровне ( $p < 0.05$ ).

# 3<sup>ий</sup> фактор – уровень биологической продуктивности древостоя

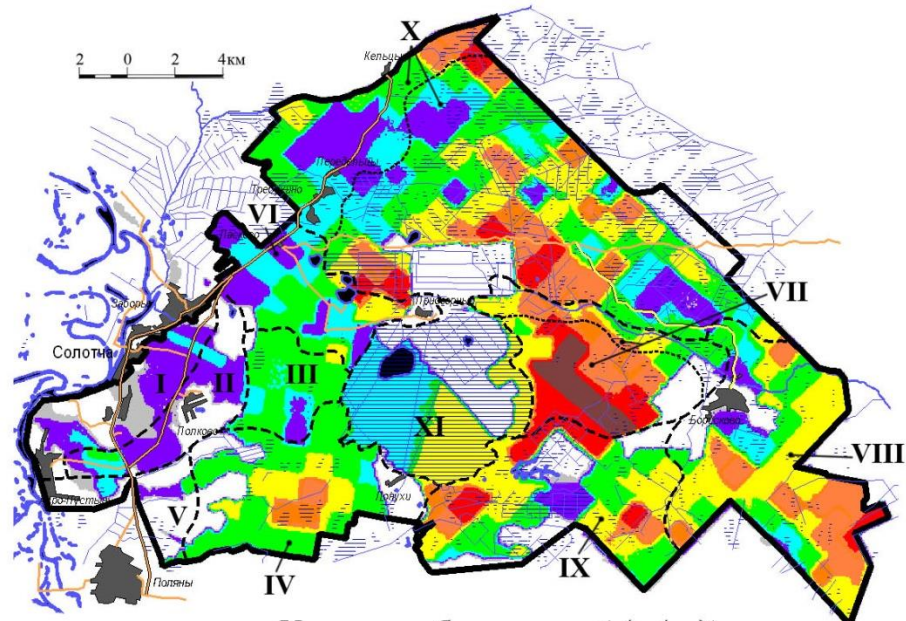
**Рис. 6. Ежегодная иммобилизация тяжелых металлов в биомассе ствола и комля древостоев подтаежных экосистем Южной Мещеры**



Условные обозначения (г/га/год)

менее 1,90	2,65 - 3,30	4,40 - 5,00
1,90 - 2,30	3,30 - 3,75	свыше 5,00
2,30 - 2,65	3,75 - 4,40	

**Cu**



Условные обозначения (г/га/год)

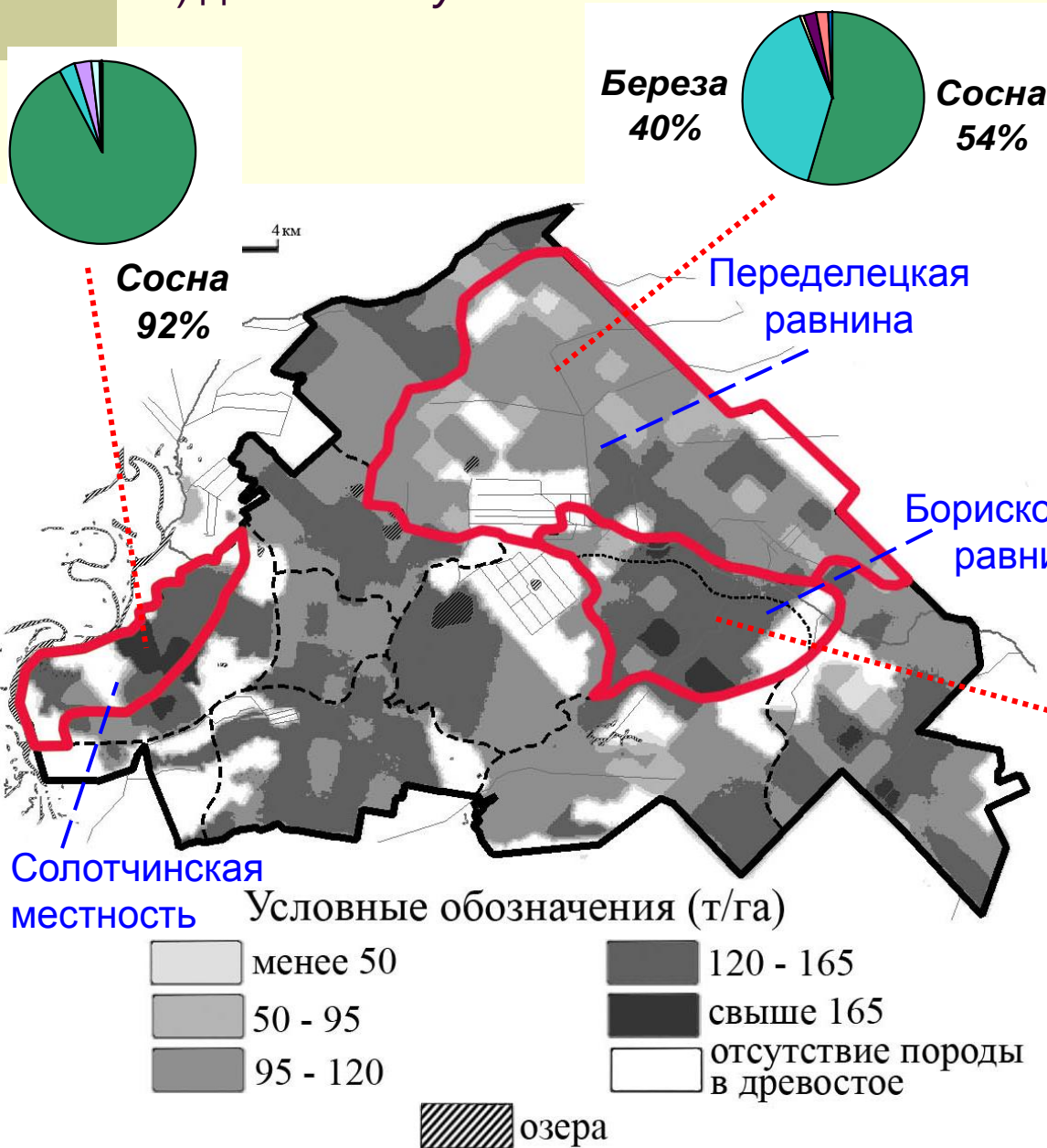
менее 9,0	19,0 - 30,0	46,0 - 53,0
9,0 - 15,5	30,0 - 36,5	свыше 53,0
15,5 - 19,0	36,5 - 46,0	

**Zn**

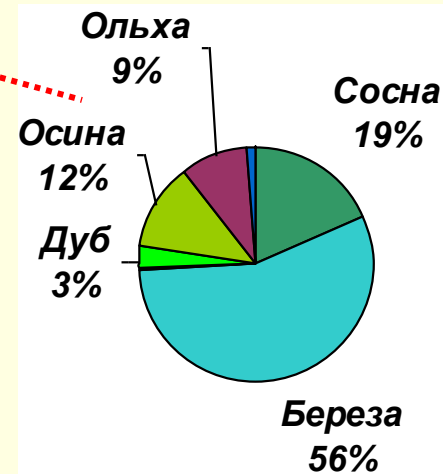


# Рис. 7. Запасы фитомассы стволов с корой

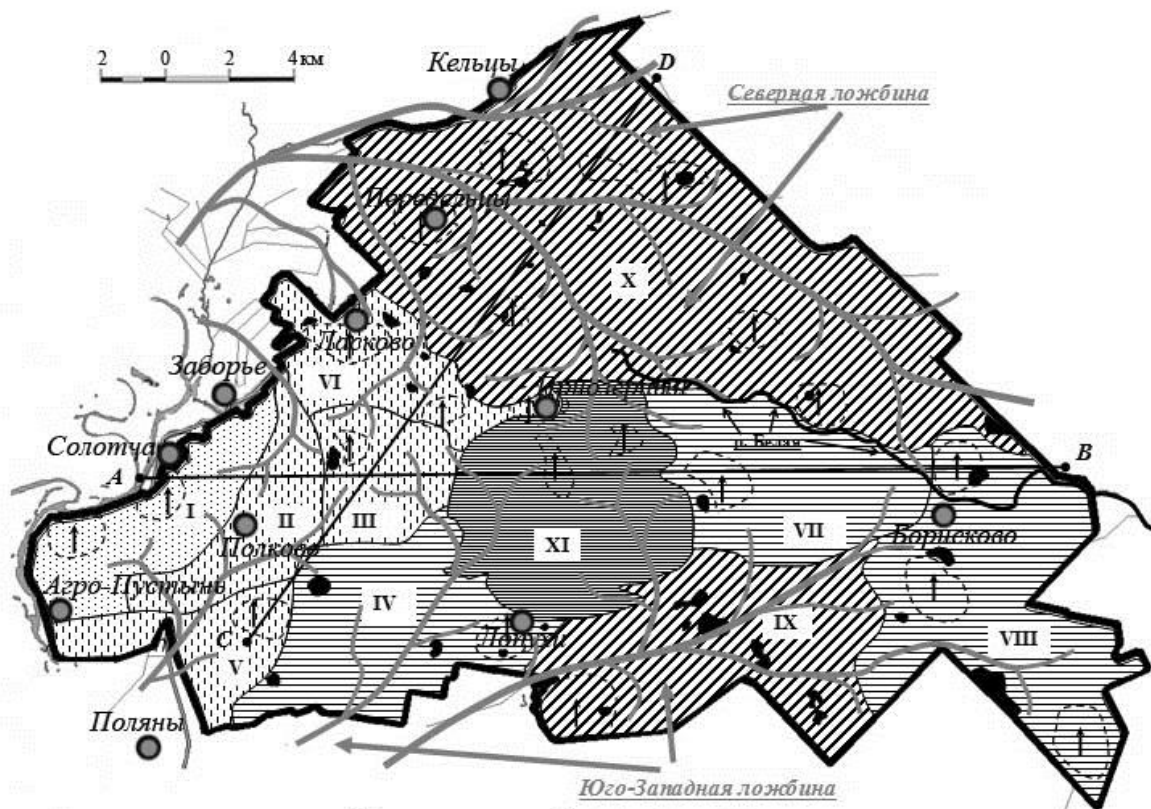
а) для *Pinus sylvestris*



б) для *Betula pendula*



# Рис. 8. Основные элементы ландшафтной структуры территории исследования



## Условные обозначения

Типизация ландшафтных местностей по преобладающим условиям увлажнения

- сухие равнины
- влажные равнины
- сырые равнины
- заболоченные равнины
- верховые болота

- массивы остаточного рельефа
- западины и котловины, заболоченные по верховому типу
- наиболее вероятная конфигурация неоген-эоплейстоценовой эрозийной сети
- населенные пункты

I-XI – основные геолого-геоморфологические неоднородности:

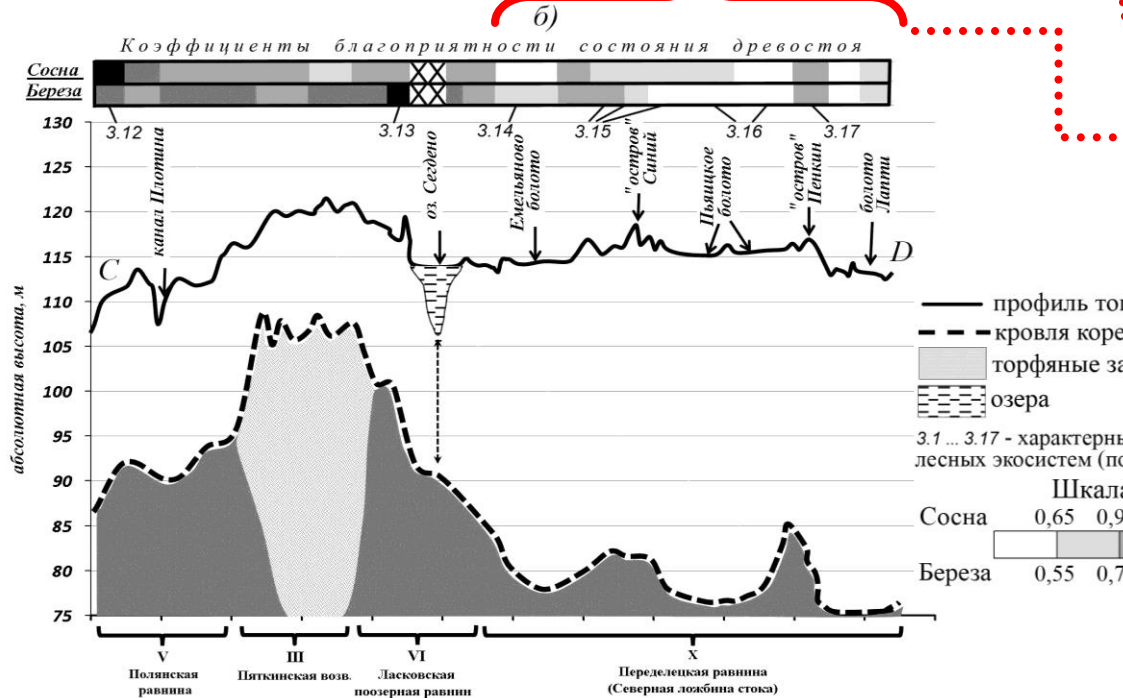
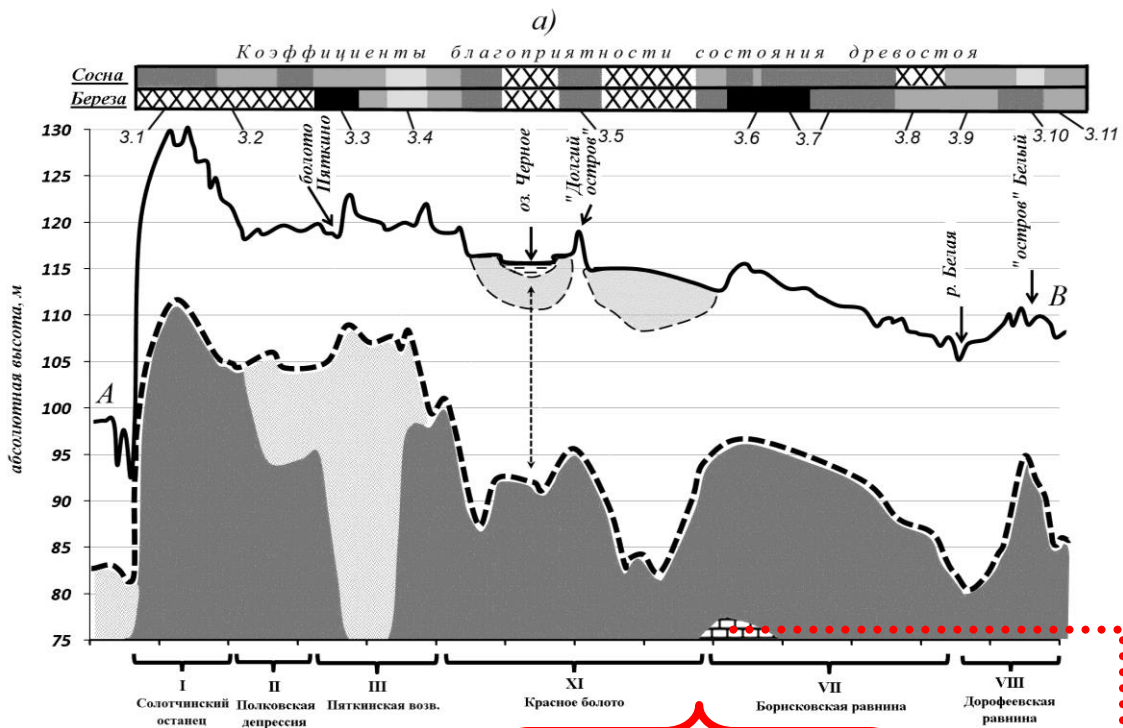
- I – Солотчинская останцовая местность;
- II – Полковская депрессия;
- III – Пяткинская возвышенность;
- IV – Лопуховская наклонная равнина;
- V – Полянская наклонная равнина;
- VI – Ласковская поозерная равнина;
- VII – Борисковская равнина;
- VIII – Дорофеевская равнина;
- IX – Темновская равнина (бывшая Юго-Западная ложбина стока);
- X – Переделецкая равнина (бывшая Северная ложбина стока);
- XI – Красное болото.

A-B; C-D – линии геолого-геоморфологических профилей



Рис. 9.

**Пространственные отношения элементов литогенной основы и биопродуктивности: результаты профилирования по линиям А-В (а) и С-Д (б)**



Бельский известняковый останец, максимальная продуктивность древостоев

Минимальная продуктивность древостоев

Условные обозначения

- профиль топографической поверхности
- - - кровля коренных пород
- торфяные залежи
- озера
- юрские глины
- неогеновые озерно-аллювиальные пески
- четвертичные отложения (пески, алевриты)
- известняки

3.1 ... 3.17 - характерные вариации продуктивности лесных экосистем (пояснения в тексте)

Шкала Кб\*

Сосна 0,65 0,90 1,15 1,45

Береза 0,55 0,70 0,85 1,00

XXX территории, где данная порода отсутствует

# 4<sup>ый</sup> фактор – структура земель фонда

лесного

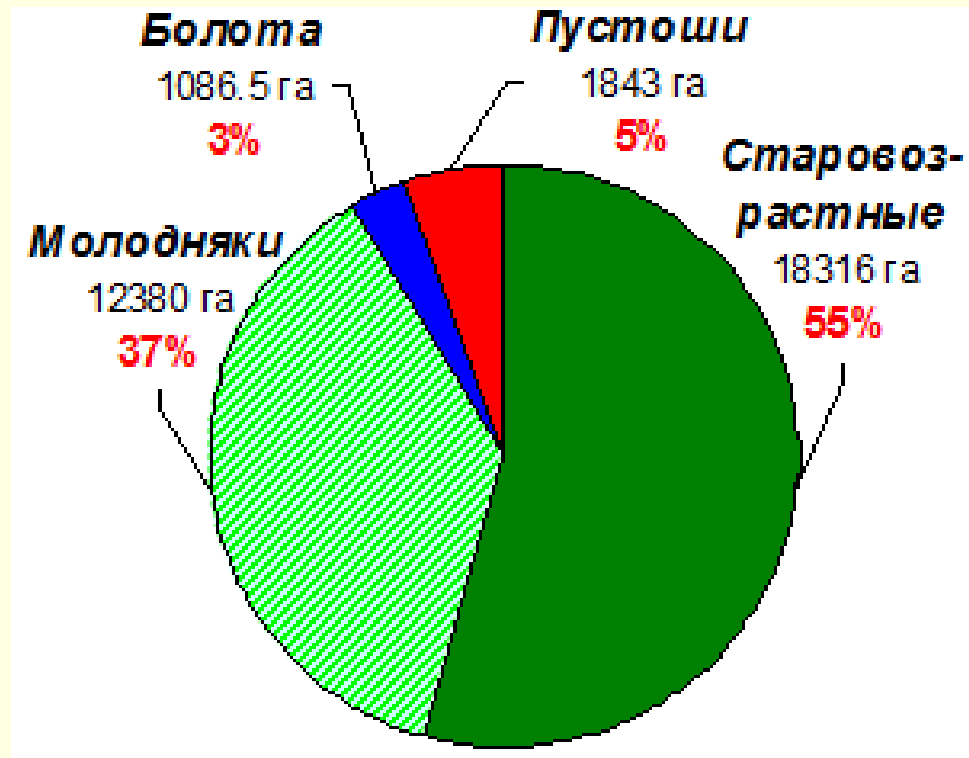
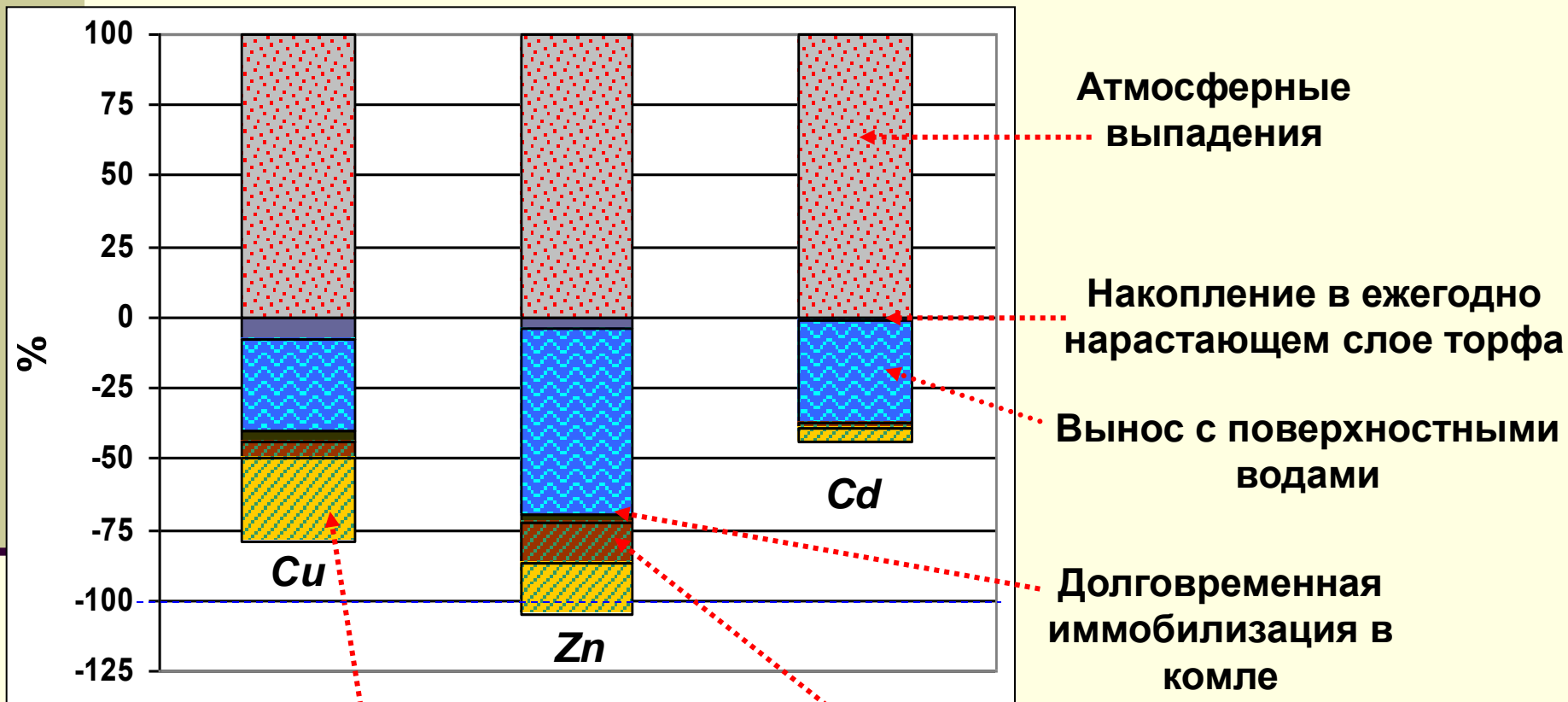


Рис. 10. Структура земель лесного фонда Солотчинского лесхоза



Рис. 11. **Баланс тяжелых металлов в лесных экосистемах Южной Мещеры**



Долговременная  
иммобилизация в  
древесине ствола

Долговременная  
иммобилизация в комле  
ствола

# Выводы

- Таким образом, растительность может играть существенную роль в регулировании потоков загрязняющих веществ в подтаежных лесных экосистемах, иммобилизуя и выводя из миграционных потоков до 46% атмосферных выпадений ТМ. Наименьшая регулирующая роль растительности проявляется в отношении типичных токсикантов: например, долговременной иммобилизации Cd в фитомассе подвергается менее 10% его атмосферной поставки.
- Основными факторами, определяющими емкость и интенсивность биокруговоротов ТМ и в целом биогеохимическую устойчивость лесных экосистем к поступлению поллютантов, являются закономерности транслокации и аккумуляции элементов в растительных органах, видовая специфика накопления ТМ, уровень биологической продуктивности древостоя, а также структура земель лесного фонда.
- Изучение пространственных закономерностей аккумуляции ТМ в ежегодном приросте тканей ствола показало, что приоритетная роль в определении масштабов иммобилизации ТМ в фитомассе принадлежит породному составу древостоя. Сообщества с преобладанием ариданитной породы – сосны – наиболее эффективно иммобилизуют Cu. При преобладании гумидокатных березы и осины активно иммобилизуются Zn и Cd. Поскольку уровень биопродуктивности древостоя и его породный состав являются функцией ландшафтной структуры территории, данный фактор также можно считать одним из определяющих при оценке регулирующей роли растительности по отношению к потокам ТМ. Установленные нами закономерности геохимических и биопродукционных процессов актуальны для большинства подтаежных ландшафтов полесского типа.



**Благодарю за внимание!**