

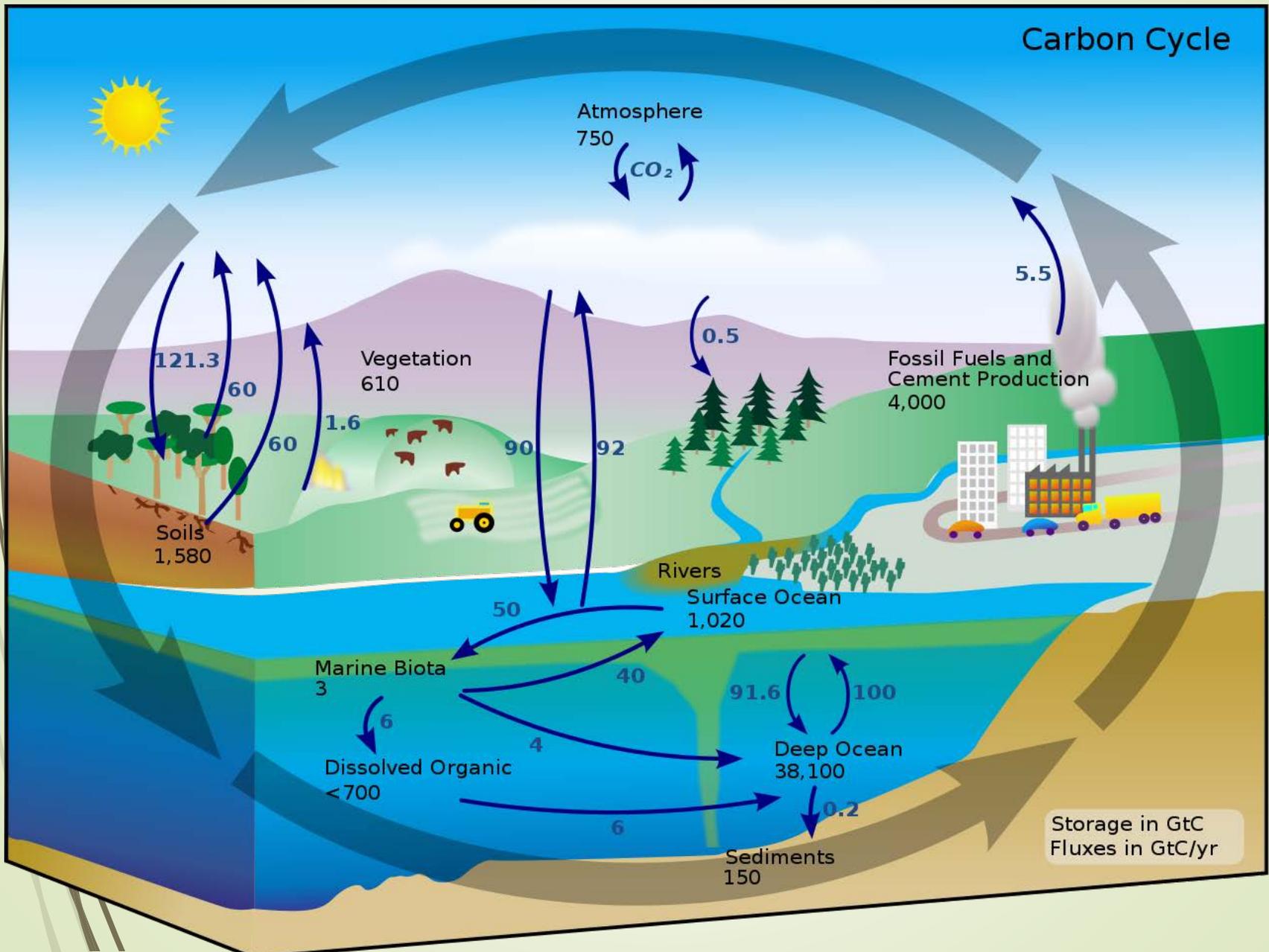


# Биогеохимический цикл углерода болотных экосистем

Головацкая Евгения Александровна

XVII Международная научная Школа-конференция  
молодых ученых по фундаментальным проблемам  
дистанционного зондирования Земли из космоса

# Биогеохимический цикл углерода



# Роль наземных экосистем в биогеохимическом цикле углерода

- ✓ Вклад наземных экосистемы России составляет около 1/4 общего стока  $\text{CO}_2$  в наземные экосистемы мира и примерно 45% - в наземные экосистемы Северного полушария.
- ✓ Основную роль в общем стоке  $\text{CO}_2$  играют лесные экосистемы - 67.7%, при этом доля российских лесов составляет 18% от поглощения  $\text{CO}_2$  всеми лесами мира;
- ✓ Почвенный пул органического С в 1-метровом слое почвы составляет 20% мировых запасов Сорг. В минеральных почвах 17 кг/м<sup>2</sup> в торфяных 36-81 кг/м<sup>2</sup>

# Биогеохимический цикл углерода

- ✓ Пространственная и временная неоднородность
- ✓ Высокая степень неопределенности экспериментальных данных, обусловленная разными методами и подходами
- ✓ Фрагментарность экспериментальных оценок, не позволяющая получить корректные оценки при их обобщении даже на региональном уровне

**Необходимо:**

**Организация системы мониторинга**

**Привлечение данных дистанционного зондирования**

**Моделирование**

# Биогеохимический цикл углерода болотных экосистем

## ❖ Незамкнутость цикла углерода

В результате процесса торфообразования происходит закрепление С в стабильных пулах органического вещества (ОВ) торфа с временем пребывания  $>1000$  лет

## ❖ Динамичность цикла углерода

Обусловлена высокой чувствительностью к климатическим изменениям и к возрастающему антропогенному воздействию.

**Болото** - участок ландшафта, характеризующийся избыточным увлажнением, влаголюбивым живым напочвенным покровом. Для болота характерно отложение на поверхности почвы не полностью разложившегося органического вещества, превращающегося в дальнейшем в торф.



# Водно-болотное угодье или болото?

Водно-болотное угодье (ВБУ) – это официальный перевод англ. термина **Wetland**

- **Водно-болотное угодье** – «модное» понятие последних лет, распространившееся в связи с *Конвенцией о водно-болотных угодьях...* (**Рамсарской конвенцией**).
- Понятие ВБУ включает широкий спектр природных и искусственных объектов, для которых **вода – основной фактор**, контролирующей состояние окружающей среды и определяющий условия жизни растений и животных.
- ВБУ объединяет морские мелководные, прибрежные, устьевые, озерные, речные, болотные и подземные объекты, включая антропогенные (пруды, орошаемые земли, дренажные каналы и пр.).

# Водно-болотные угодья

Переувлажненные  
минеральные земли

Заболоченные  
земли

Торфяное  
болото

Болото

Торфяное  
месторождение  
(торфяник)

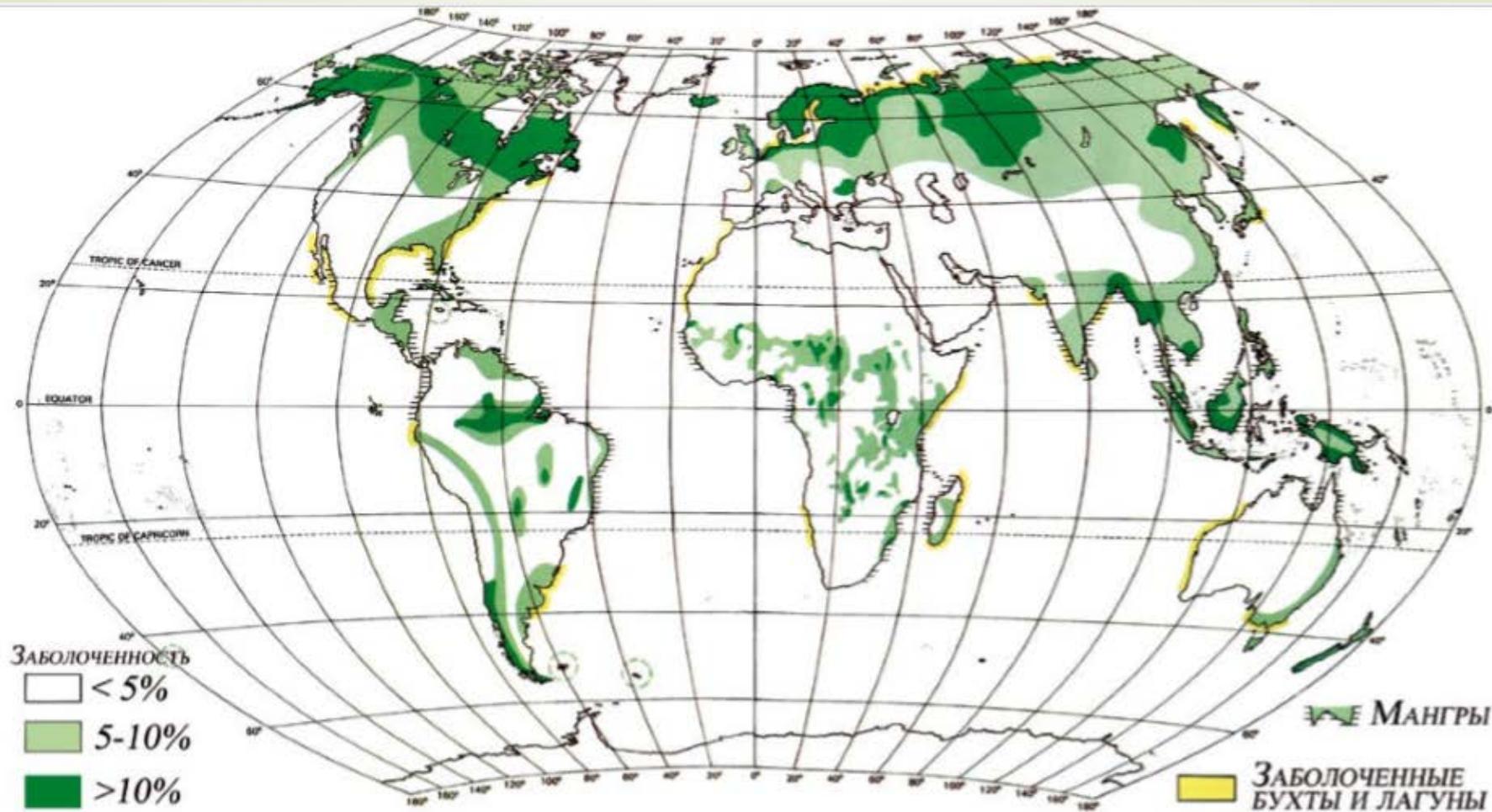
> 0

> 30

> 70-100 см

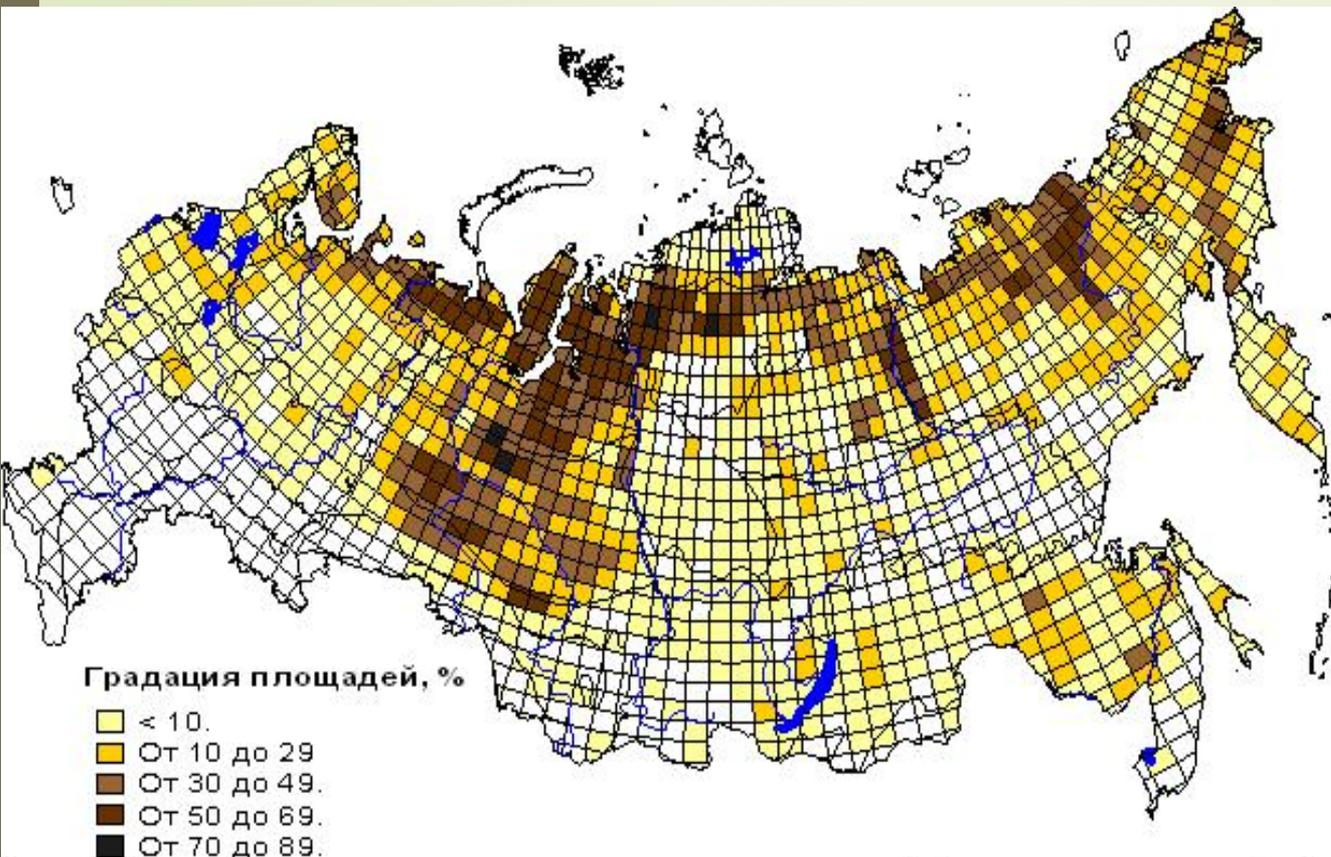
← наличие торфа →

# Распространение болотных экосистем



**Заболоченность земного шара**

# Болота России



Площадь болот с глубиной торфа более 30 см в % от площади территории (Вомперский и др., 1999)

В настоящее время естественные болотные экосистемы служат в основном стоком углерода из атмосферы, о чем свидетельствуют многочисленные оценки.

При изменении климатических условий или антропогенном воздействии болота из стока могут превратиться в источник парниковых газов.

# Болота Западной Сибири

Площадь - 592 440 км<sup>2</sup>

Запасы торфа - 148 Гт

Запасы углерода - 70 Гт



Sheng, Y., L. C. Smith, G. M. MacDonald, K. V. Kremenetski, K. E. Frey, A.A. Velichko, M. Lee, D. W. Beilman, and P. Dubinin (2004), A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB3004, doi:10.1029/2003GB002190.

**Координаты** 55°35' и 58°40' СШ, 74°30' и 83°30' ВД

**Протяженность болота с запада на восток около 550 км, с севера на юг в осевой части в среднем 50-80 км, с учетом отрогов - до 270 км.**

**Площадь БВБ > 55 тыс. км<sup>2</sup>**

**Абсолютные отметки поверхности занятых болотами водораздельных пространств 130-150 м.**

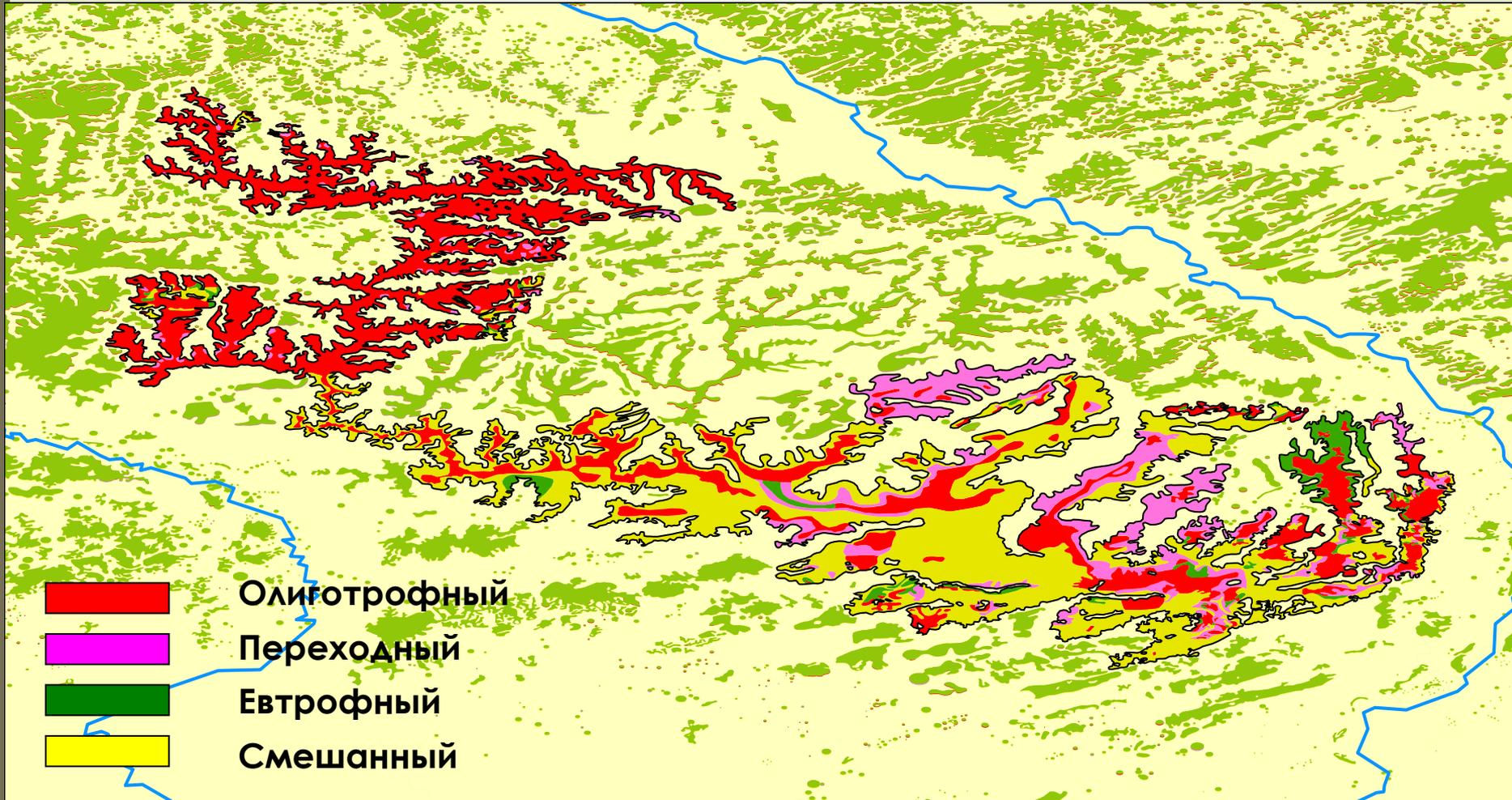
**Возраст - 10 000 лет**

**Средняя глубина - 2.4 м**

**Максимальная глубина – 7 м**



# Типы торфяной залежи БВБ



Верховые болота - 32%,

Открытые переходные и низинные болота - 35%

Лесные болота - 33%.

## **БВБ представляет собой целостную, генетически и экологически взаимосвязанную систему достаточных размеров, которая:**

- ▶ отражает процессы развития болотных экосистем от начала голоцена до настоящего времени;
- ▶ включает местообитания типичной флоры и фауны региона, редких и исчезающих видов животных и растений, а также ключевые местообитания мигрирующих и кочующих видов животных;
- ▶ является «хранителем» ценной палеогеографической и палеоэкологической информации;

**Отсутствие населенных пунктов и трудная доступность этой территории обеспечивают высокий уровень сохранности экосистем и их биологического разнообразия.**

# Антропогенное воздействие



**Болота депонируют С и переводят N из биологического круговорота в геологический**

Хранители биологического разнообразия

Поглощение  $\text{CO}_2$  из атмосферы с 1 га болот в 7-15 раз эффективнее чем на лесной территории такого же размера.

Болотная растительность поставляет ежегодно  $1,6 \times 10^8$  т кислорода в атмосферу

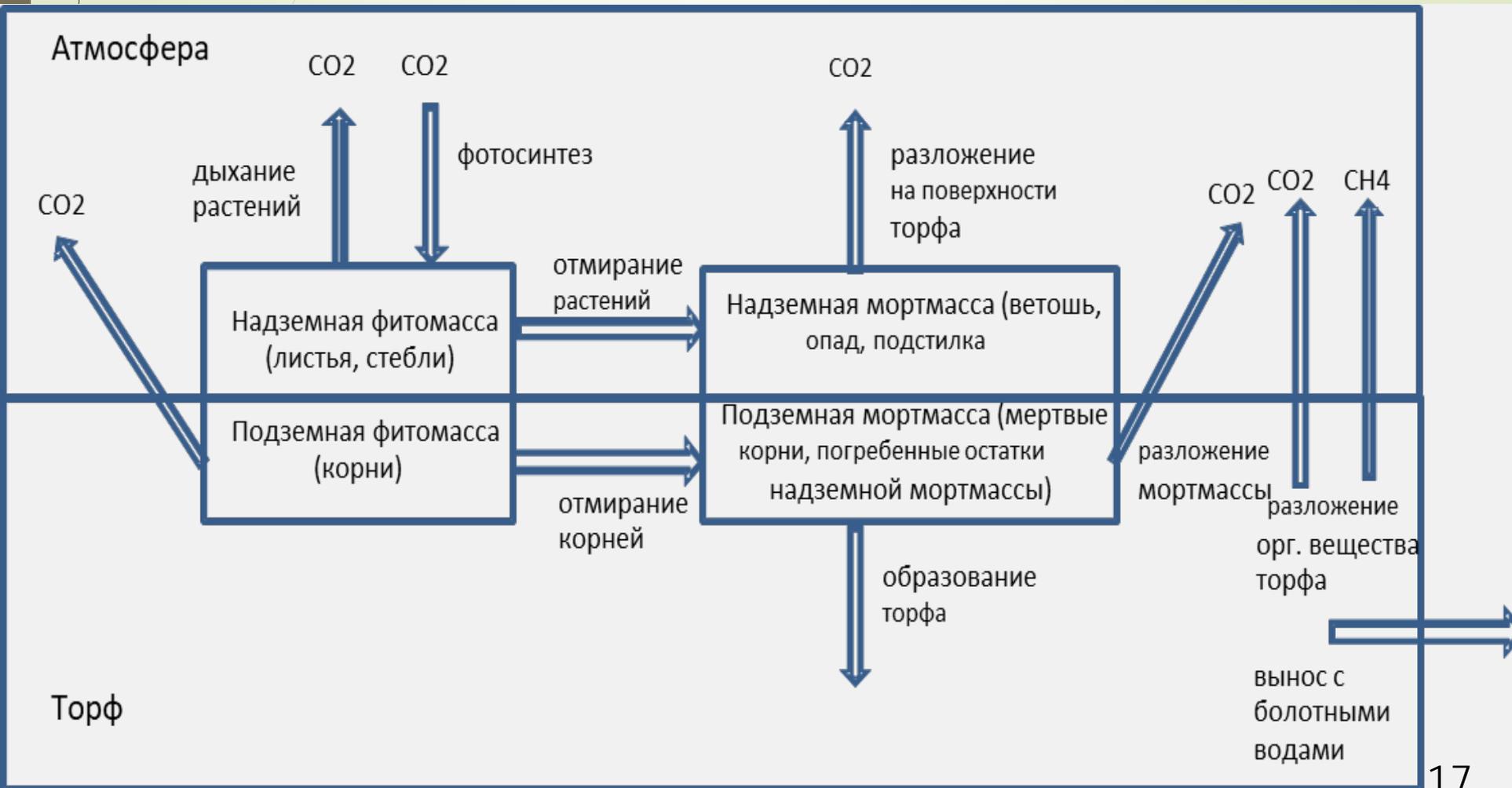
### **Функции болот в биосфере**

Источник палеогеографической и палеоклиматической информации

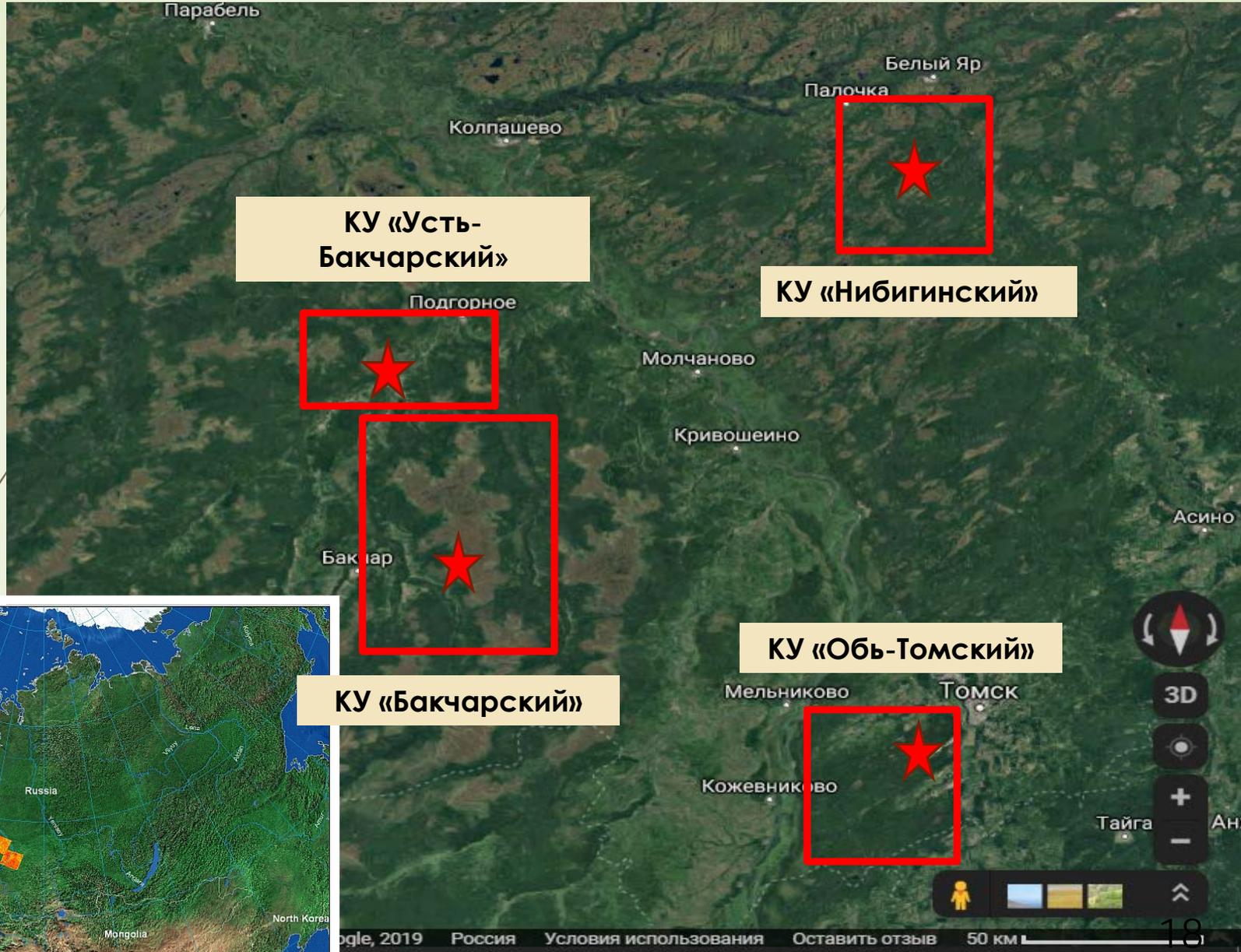
Болота являются хранилищем пресной воды, многие реки начинаются с болот

Болота влияют на климат прилегающих территорий

# Схема потоков углерода в болотных биогеоценозах



# Объекты исследования



# КУ «Бакcharский» олиготрофное болото «Бакcharское»



Высокий ряб – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз - ВР



Низкий ряб – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз - НР

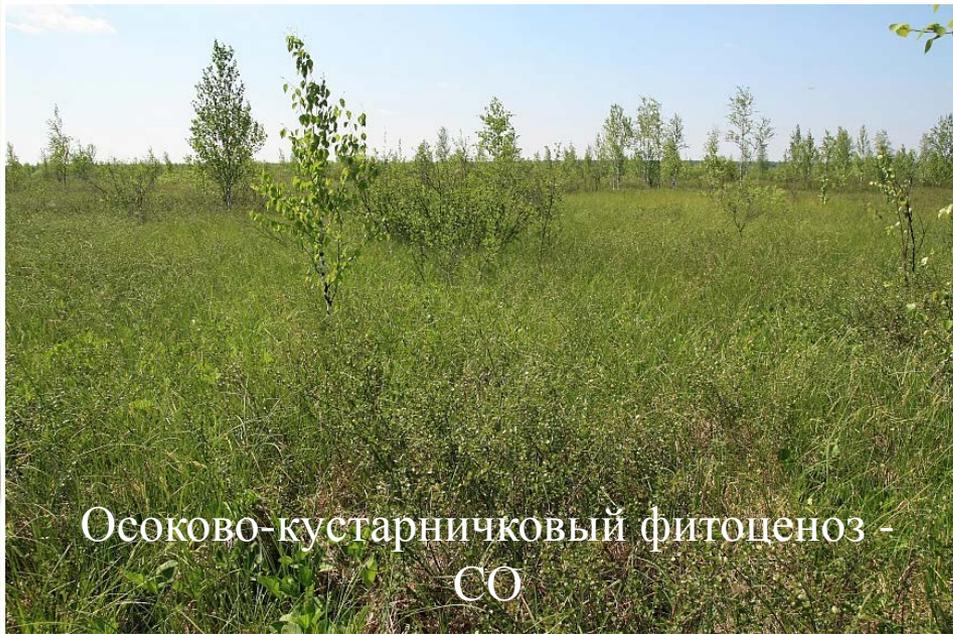


Грядово-мочажинный комплекс - ГМКГ; ГМКМ



Осоково-сфагновая топь - ОТ

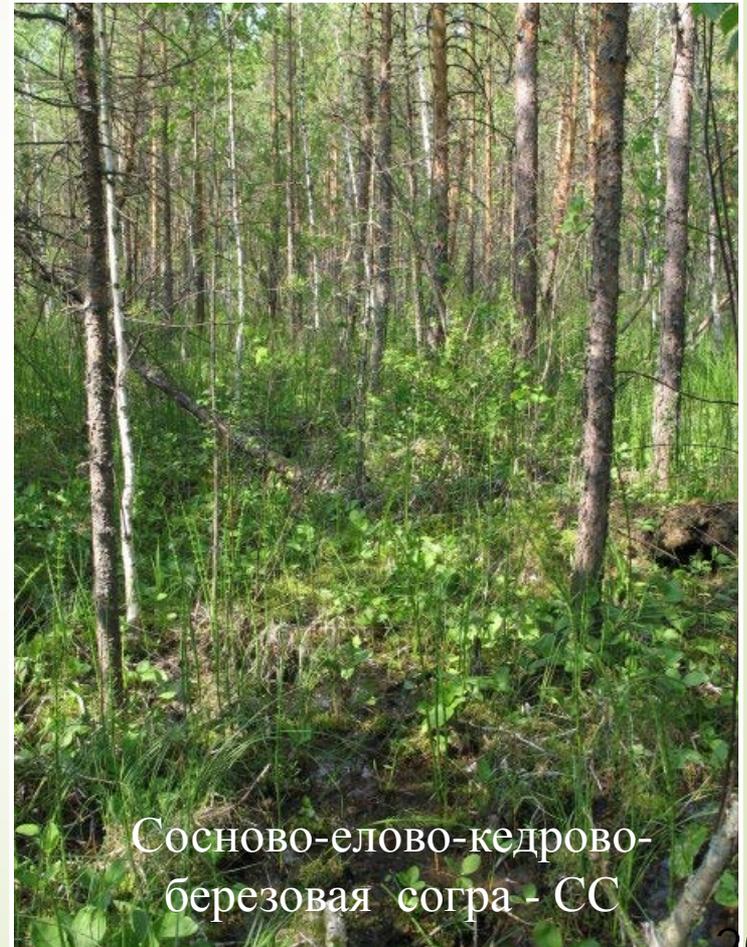
**Ключевой участок  
«Бакcharский»  
эвтрофное болото  
«Самара»**



Осоково-кустарничковый фитоценоз -  
СО



Ерниково-осоковый фитоценоз -  
СЕ



Сосново-елово-кедрово-  
березовая согра - СС

# Ключевой участок «Тимирязевский»



Сосново-кустарничково-сфагновый  
фитоценоз - ТР



Сосново-кустарничково-сфагновый  
фитоценоз - КР



Осоково-сфагновая топь - ТТ

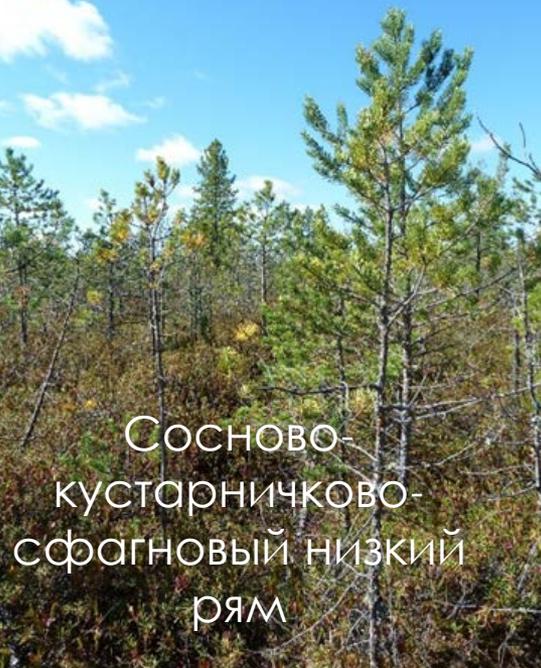


Осоково-сфагновая топь- КТ

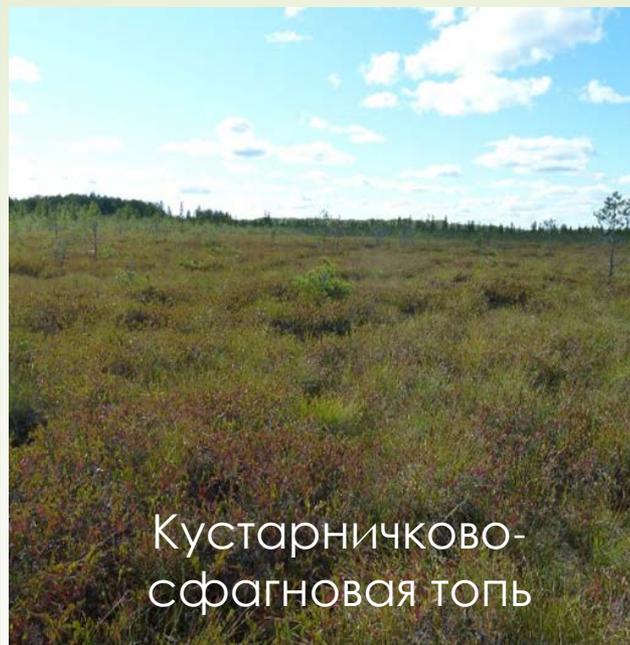
«Тимирязевское» болото

«Кирсановское» болото

# Ключевой участок «Усть-Бакчарский»



Сосново-кустарничково-сфагновый низкий рям



Кустарничково-сфагновая топь



Шейхцериево-сфагновая топь

## Осушенное болото



Кустарничково-сфагновый фитоценоз



Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз после пожара

## Ключевой участок «Нибигинский»



Грядово-крупномочажинный комплекс (болото Центральное)



Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (болото Центральное)

# Методы исследования

Биологическая  
продуктивность



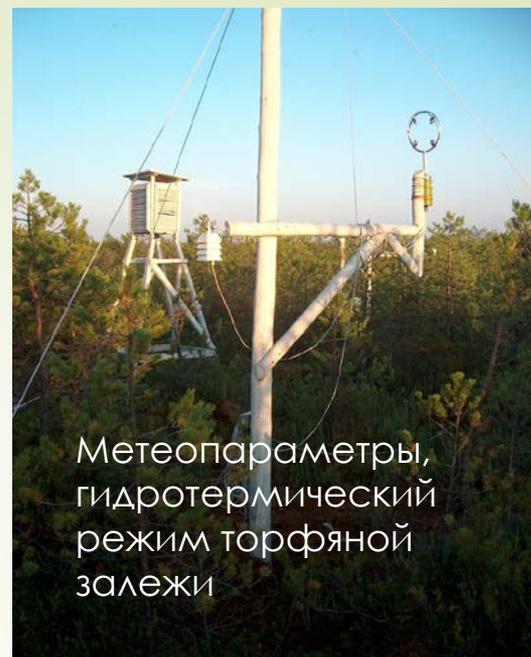
Определение скорости  
разложения



ЭМИССИЯ CO<sub>2</sub>



Лабораторные  
эксперименты



Метеопараметры,  
гидротермический  
режим торфяной  
залежи



Отбор образцов торфа



Геоботанические  
описания, нивелировка  
поверхности,  
зондирование торфяной  
залежи

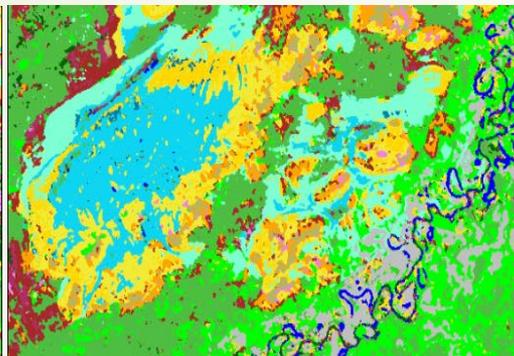
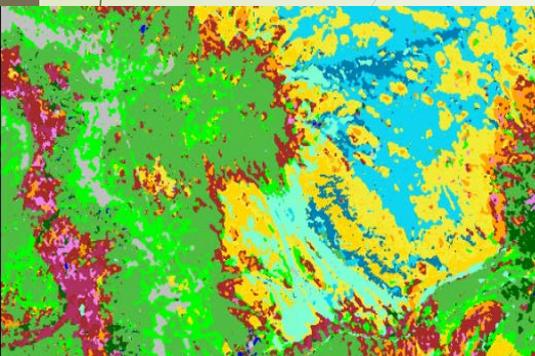


Дешифрирование  
космоснимков и  
картирование ключевых  
участков

# Фрагменты карты растительного покрова для ключевых участков

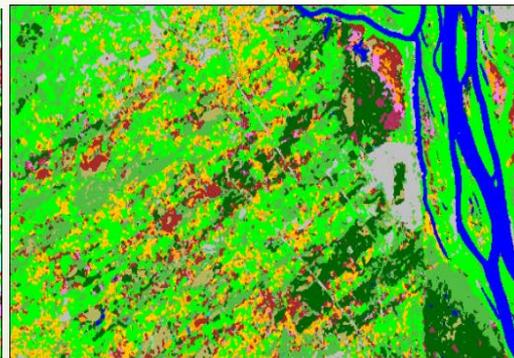
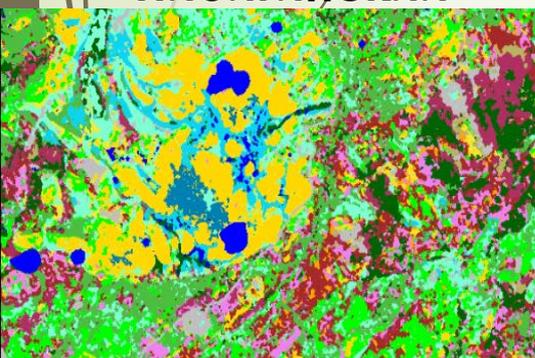
Бакчарский

Усть-Бакчарский



Нибиги́нский

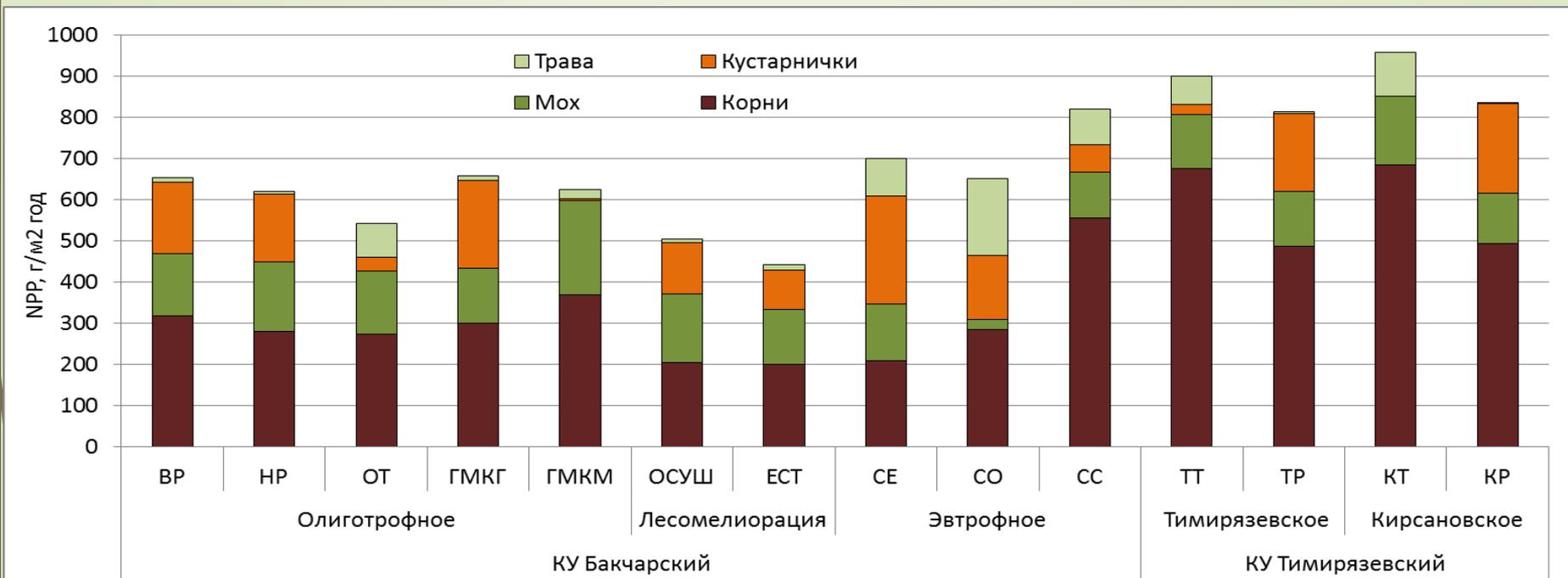
Обь-Томский



## Площади классов растительного покрова

№	Подгруппа / (тип)	Площадь, км2	Площадь, %
	<b>Леса</b>	<b>56 678</b>	<b>50.6</b>
1	Темнохвойные	16 330	14.6
2	Лиственные	16 803	15.0
3	Смешанные	21 911	19.6
4	Сосновые	1 634	1.5
	<b>Болота олиготрофные</b>	<b>35 336</b>	<b>31.5</b>
5	Древесно-кустарниково-моховая (сомкнутость 0,4-0,7)	10 119	9.0
6	Древесно-кустарниково-моховая (сомкнутость 0,2-0,4)	2 970	2.7
7	Древесно-травяно-моховая (рямово-мочажинный тип)	5 607	5.0
8	Моховая (грядово-мелкомочажинный тип)	4 289	3.8
9	Моховая (сфагновый тип)	1 078	1.0
10	Моховая (грядово-мочажинный тип)	4 619	4.1
11	Травяно-моховая	6 654	5.9
	<b>Болота эвтрофные</b>	<b>6 356</b>	<b>5.7</b>
12	Древесная (согра)	2 584	2.3
13	Древесно-травяно-моховая	3 022	2.7
14	Кустарниково-травяно-моховая	750	0.7
	<b>Прочие</b>	<b>13 637</b>	<b>12.2</b>
15	Поля, луга, пашни	5 092	4.5
16	Гари	2 626	2.3
17	Водные объекты	5 919	5.3
	<b>Всего</b>	<b>112 007</b>	<b>100</b>

# Биологическая продуктивность



## Коэффициенты корреляции между NPP и гидротермическими параметрами

Фитоценоз	Температура воздуха	Количество осадков	ГТК	УБВ
BP	0,64	-0,50	-0,31	0,57
HP	-	-0,65	-0,37	-0,30
OT	0,69	-	-	-
CE	-0,44	-	-	-0,56

## Регрессионные уравнения для общей NPP и фитомассы разных фракций растительности

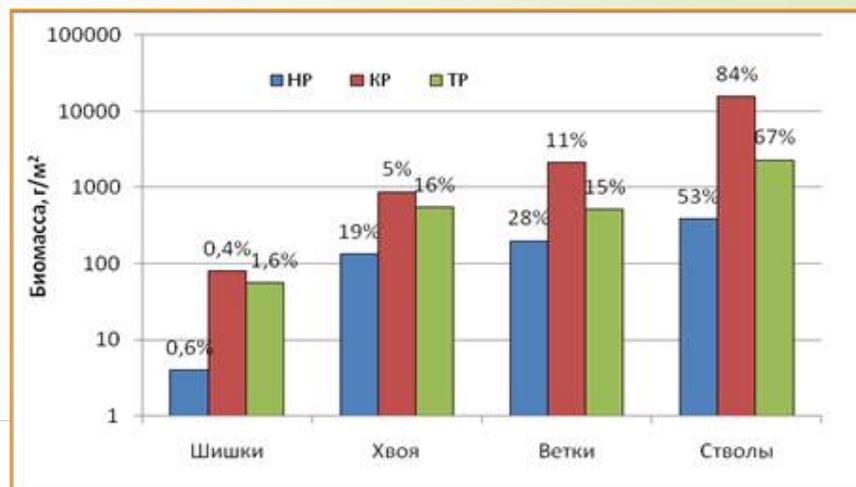
Уравнения регрессии	N	R <sup>2</sup>
NPP трав олиготроф.	33	0,94
NPP кустарн. олиготр.	33	0,58
BNP олиготроф.	33	0,44
NPP олиготроф.	33	0,49
NPP эвтрофного	17	0,45
ANP эвтрофного	17	0,46

# Биологическая продуктивность

## Характеристика древостоя

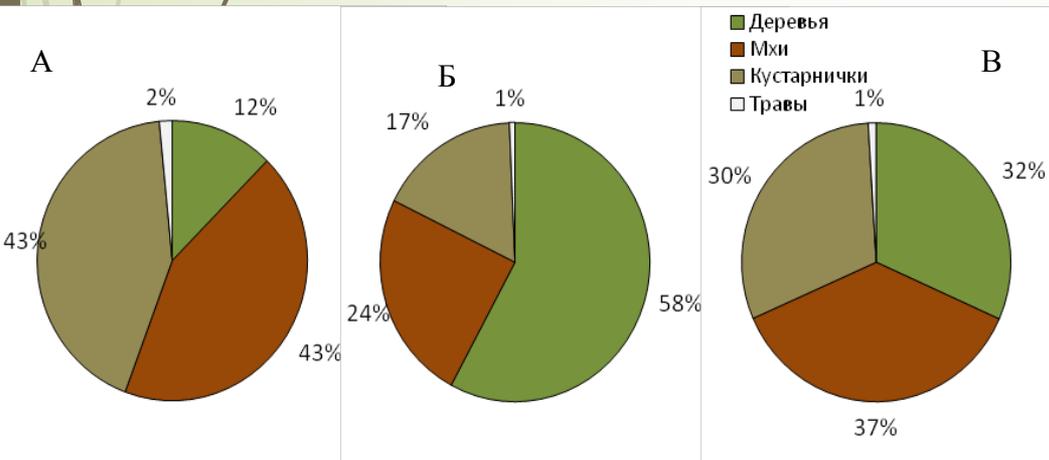


## Запасы биомассы древесного яруса



	Высота деревьев, средняя и макс., м	Диаметр ствола, средний и макс., см	Кол-во, шт/га	Подрост, шт/га
Бакчарское (А)	1,4(3,6)	1,4(7,0)	12560	19600
Кирсановское (Б)	4,0(10,1)	5,3(24,3)	10080	1440
Тимирязевское (В)	3,3(8,3)	4,1(14,6)	11600	10400

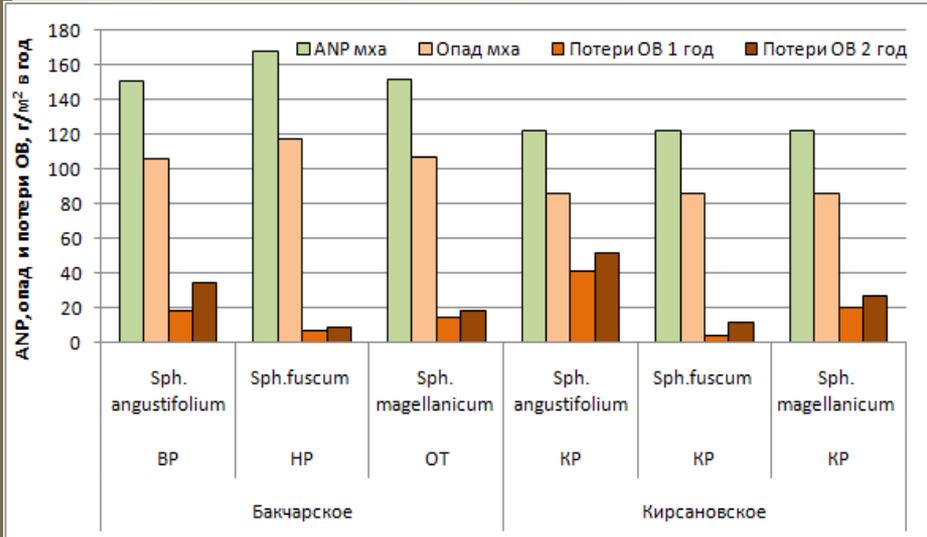
## АНР рядов с учетом древесного яруса



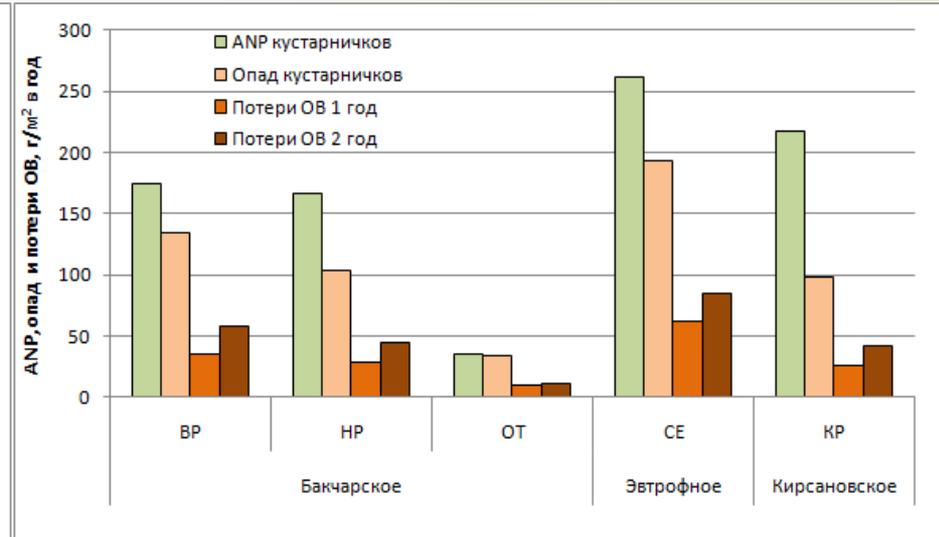
Вклад древесного яруса в запасы фитомассы и продукцию исследованных болотных экосистем составляет **43-92 %** для общих запасов фитомассы и **12-58 %** для АНР.

# Продукция, опад и потери органического вещества при разложении растительных остатков

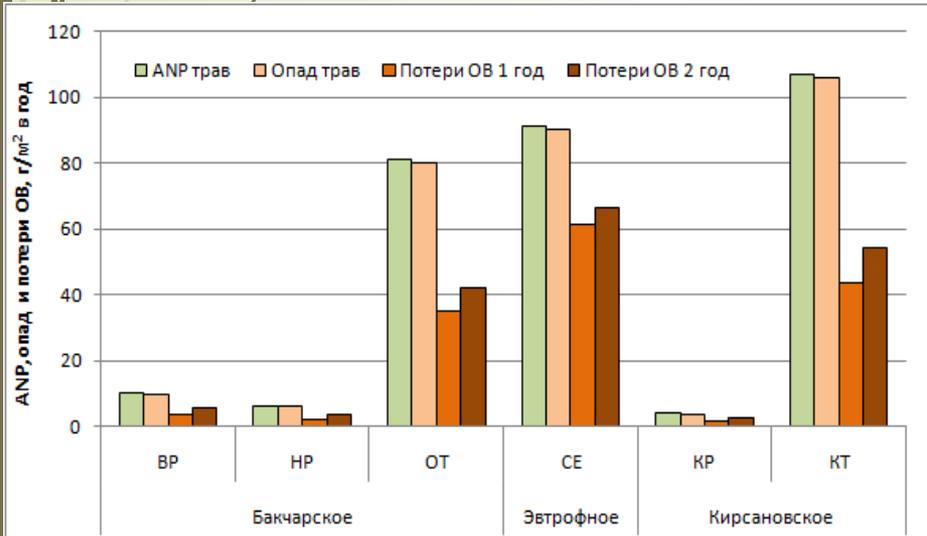
## Сфагновые мхи



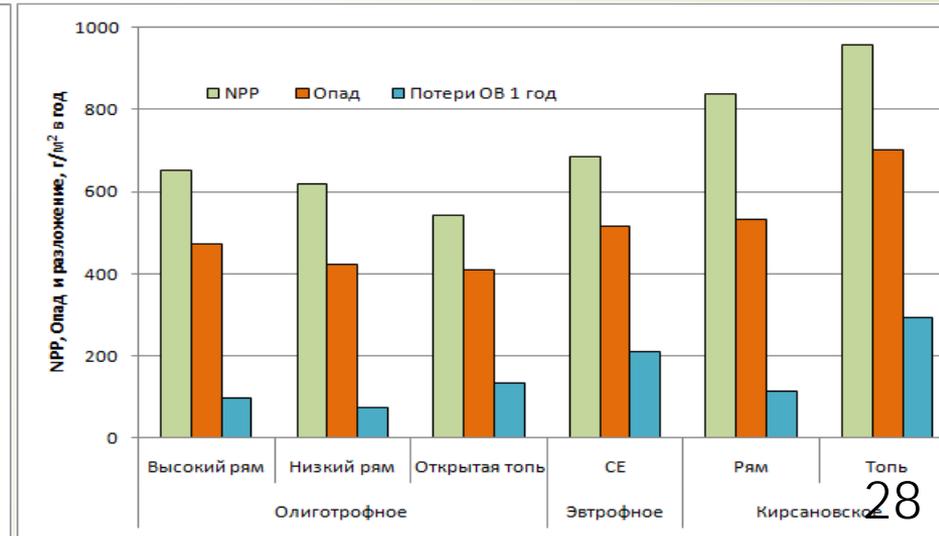
## Кустарнички



## Травы



## Фитоценоз



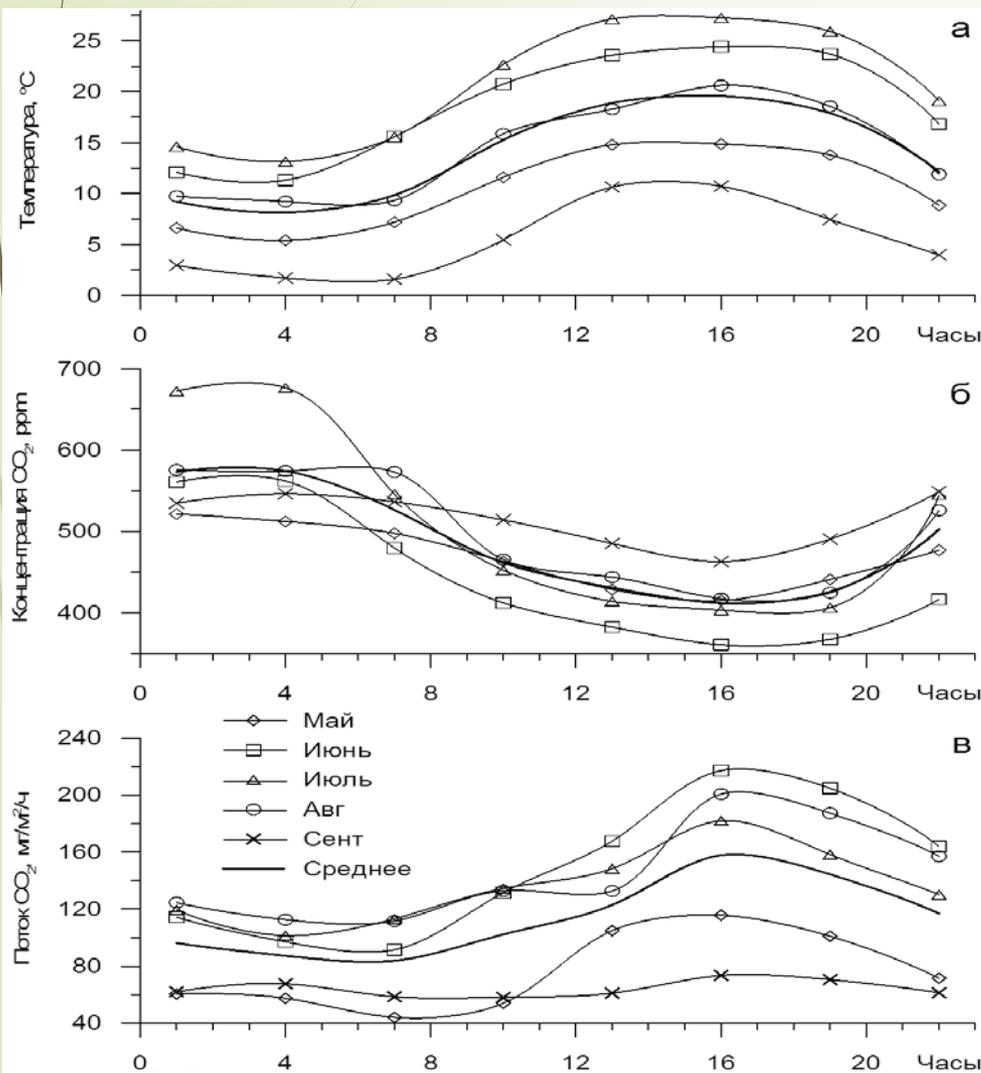
# Депонирование углерода при разложении растительных остатков

Болото, фитоценоз		NPP	Ежегодный опад	Потери углерода при разложении опада	Ежегодное депонирование углерода в опаде
«Бакчарское»	ВР	294	212	45	167
	НР	279	195	34	161
	ОТ	243	184	60	124
«Самара»	СЕ	315	232	95	137
«Кирсановское»	КР	377	240	51	189
	КТ	431	315	132	183

Количество углерода, запасаемого в процессе фотосинтеза, значительно превышает потери углерода при разложении растительных остатков, как для отдельных видов растений (в **2–25 раз** в зависимости от вида растений), так и для фитоценоза в целом (в **3–7 раз** в зависимости от фитоценоза).

# Эмиссия $\text{CO}_2$ с поверхности торфяной залежи

Суточная динамика температуры воздуха (а), концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе (б) и эмиссии  $\text{CO}_2$  (в) для разных месяцев. Средние значения за 2005-2007гг.



Использование только дневных измерений потока  $\text{CO}_2$  при вычислении ежегодной эмиссии  $\text{CO}_2$  приводит к переоценке потоков  $\text{CO}_2$  на 20–50 %.

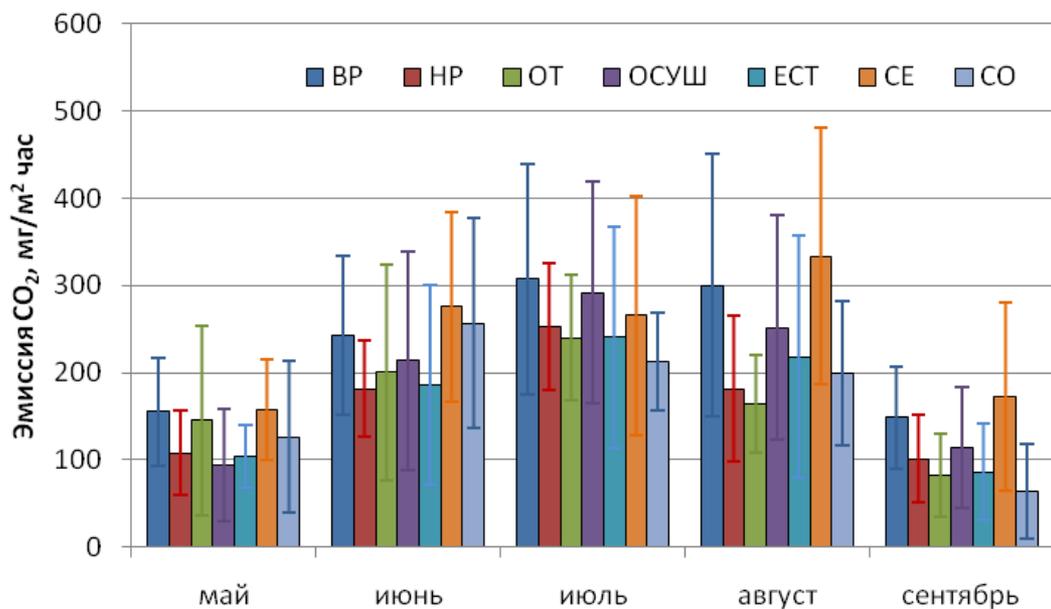
Наиболее значимым фактором, влияющим на интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  является температура воздуха и торфяной залежи.

# Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности торфяной залежи

## Сезонная динамика эмиссии CO<sub>2</sub>

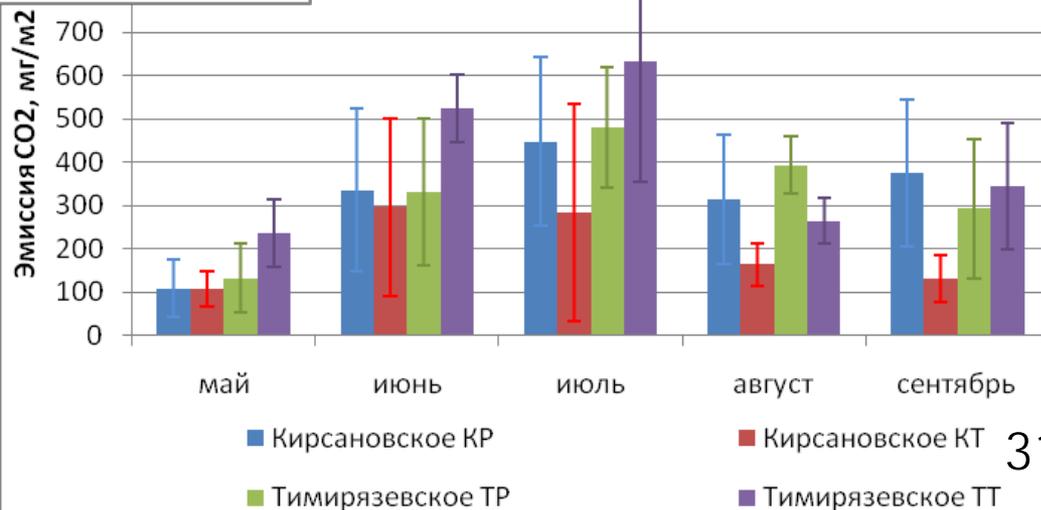
Среднемесячная эмиссия CO<sub>2</sub>

КУ «Бакчарский»



Среднемесячная эмиссия CO<sub>2</sub>

КУ «Тимирязевский»

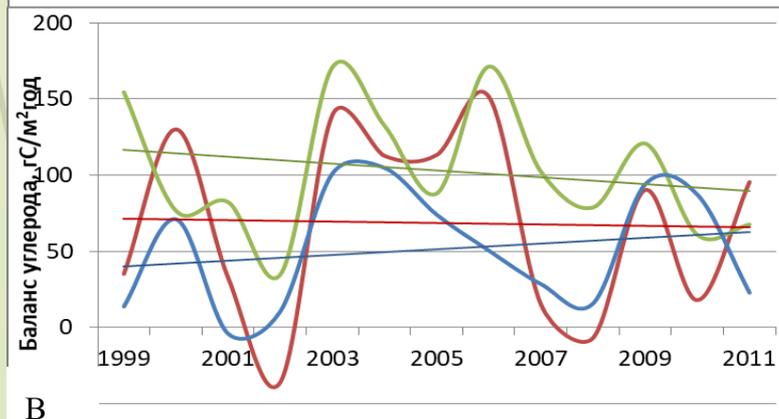
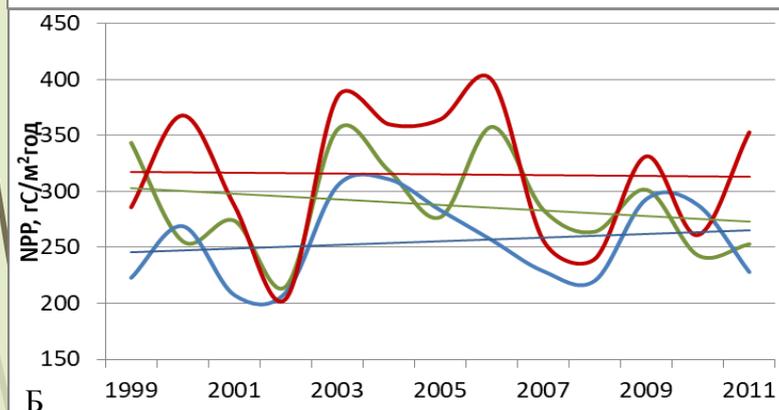
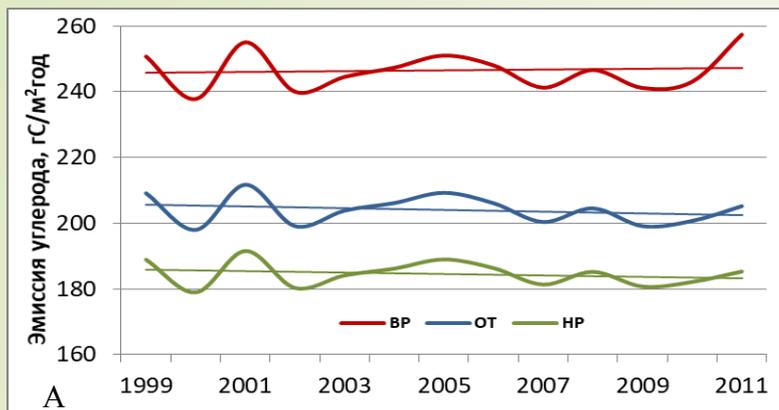


# Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности торфяной залежи

Эмпирические модели и температурные коэффициенты Q<sub>10</sub>, отражающие взаимосвязь между интенсивностью эмиссии CO<sub>2</sub> и температурой воздуха

	Фитоценоз	Число измерений	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>	Q <sub>10</sub>
<b>Бакcharское болото</b>	Высокий рям	72	$F=69,89e^{0,060x}$	0,44	1,8
	Низкий рям	77	$F=56,06e^{0,054x}$	0,49	1,7
	Открытая топь	72	$F=67,45e^{0,054x}$	0,47	1,7
	ГМКГ	15	$F=73,76e^{0,062x}$	0,52	1,9
	ГМКМ	15	$F=64,66e^{0,059x}$	0,47	1,8
<b>т.м. Васюганское</b>	Осуш	50	$F=27,94e^{0,116x}$	0,41	3,2
	Ест	38	$F=33,34e^{0,089x}$	0,43	2,4
<b>Эвтрофное болото Самара</b>	СЕ	35	$F=54,51e^{0,084x}$	0,43	2,3
	СО	35	$F=32,24e^{0,107x}$	0,63	2,9
	СС	20	$F=86,59e^{0,080x}$	0,48	2,2
<b>Тимирязевское</b>	ТТ	29	$F=132,44e^{0,056x}$	0,51	1,8
	ТР	28	$F=89,35e^{0,062x}$	0,53	1,9
<b>Кирсановское</b>	КТ	26	$F=43,71e^{0,070x}$	0,51	2,0
	КР	28	$F=58,87e^{0,091x}$	0,63	2,5

# Межгодовая вариабельность эмиссии С (А), NPP (Б) и баланса углерода - NEP (В)



Изменение погодных условий в период с 1999 по 2011 гг.

Динамика баланса углерода (NEP) в период 1999–2011 гг. не имеет значимого тренда изменения. Межгодовая изменчивость очень велика, и в отдельные годы наблюдаются отрицательные значения NEP, что свидетельствует о преобладании процессов выделения углерода над его поглощением.

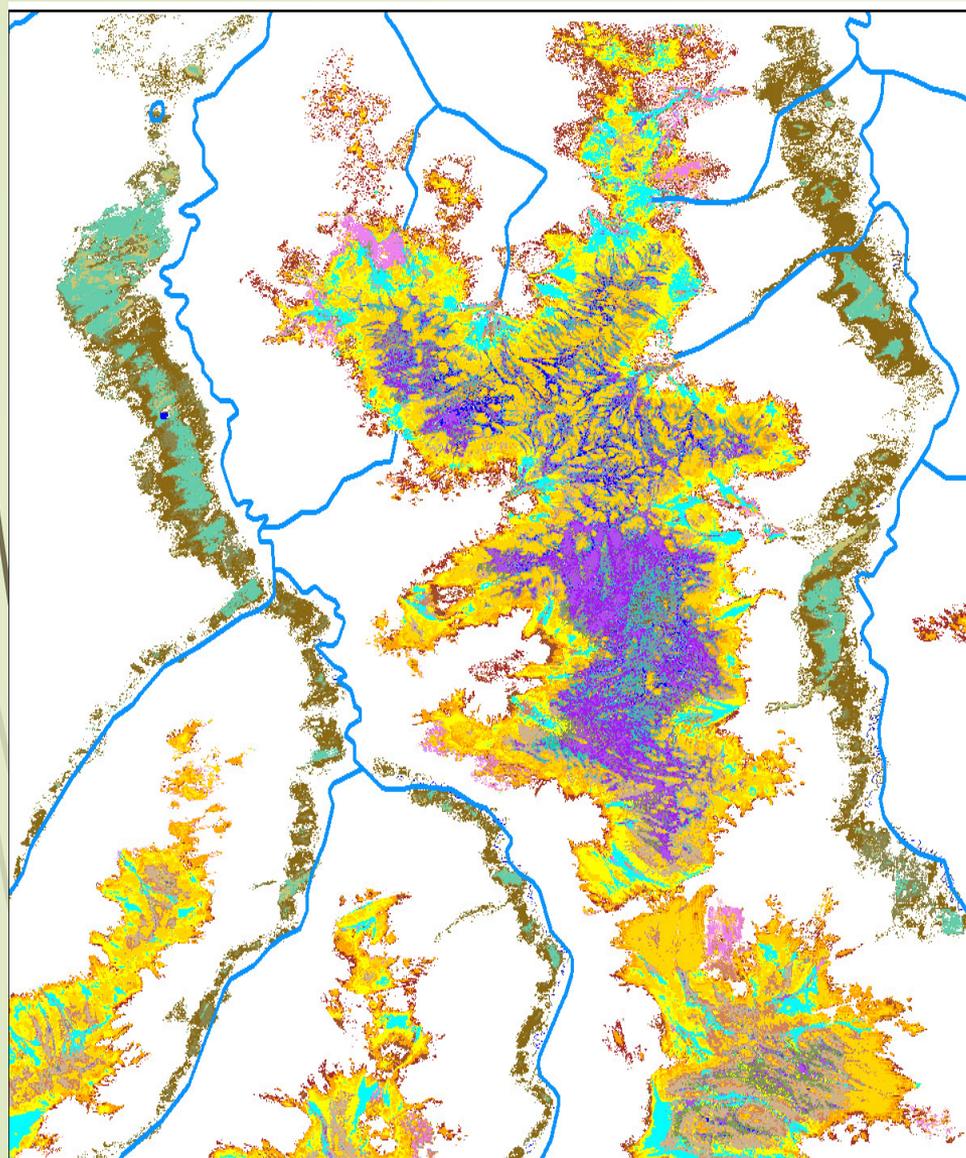
# Потоки и баланс С в болотных фитоценозах

Болото	Фитоценоз	Потоки углерода, гС/м <sup>2</sup> год				NEP	Чистая аккумуляция С в торфе	Чистая аккумуляция С в растительности
		1	2	3	4			
Бакчарское	ВР	167	294	122	167	<b>127</b>	<b>45</b>	<b>82</b>
	НР	93	279	59	161	<b>186</b>	<b>102</b>	<b>84</b>
	ОТ	132	243	72	124	<b>111</b>	<b>52</b>	<b>59</b>
Самара	СЕ	196	315	101	137	<b>119</b>	<b>6</b>	<b>113</b>
Кирсановское	КР	310	377	241	203	<b>67</b>	<b>-38</b>	<b>105</b>
	КТ	263	431	131	183	<b>168</b>	<b>52</b>	<b>116</b>

Прим.: 1 – суммарный поток С;  
 2 – NPP;  
 3 – потери С при разложении торфа;  
 4 – остаток опада в экосистеме;  
 5 – чистая экосистемная продукция (NEP),  
 6 – чистая аккумуляция С в торфе;  
 7 – чистая аккумуляция С в растительности

Все исследованные болотные фитоценозы являются стоком С из атмосферы, который накапливается как в виде торфа, так и в виде растительности. Из-за различия в интенсивности потоков углерода с поверхности торфяной залежи болотных фитоценозов, при близких значениях NPP, чистая экосистемная продукция (NEP) может отличаться для разных фитоценозов в 1,5–2 раза.

# Региональная оценка баланса углерода на примере КУ «Бакчарский»



Фитоценоз	Площадь	
	га	%
1 Высокий рям	8 149	3,8
2 Высокий рям влажный	8 324	3,9
3 Редкий рям	22 237	10,5
4 Рямово-мочажинный комплекс	32 334	15,3
5 Низкий рям	26 266	12,4
6 Низкий рям	6 051	2,9
7 ГМК мелкомочажинный	12 390	5,8
8 ГМК мелкомочажинный	1 893	0,9
9 Сфагновая топь	3 298	1,6
10 ГМК среднемочажинный	4 113	1,9
11 ГМК мелкомочажинный	8 549	4,0
12 ГМК среднемочажинный	5 134	2,4
13 ГМК среднемочажинный	8 870	4,2
14 ГМК крупномочажинный	3 819	1,8
15 Осоково-сфагновая топь	12 900	6,1
16 Ос.-сф.топь затопляемая	2 141	1,0
17 Ерниково-осоковый	4981	2,4
18 Осоково-ерниковый	8363	3,9
19 Согра	32084	15,1

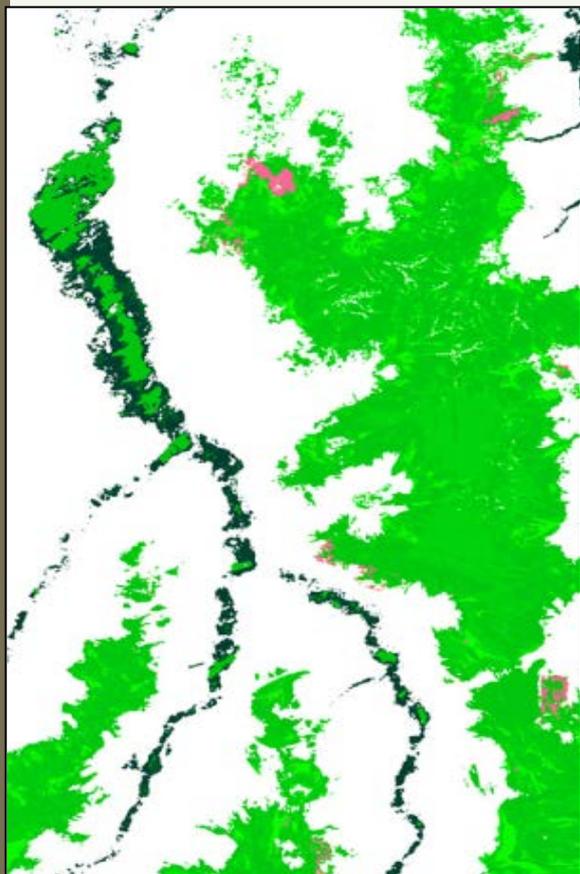
**Болотные экосистемы КУ «Бакчарский»**

ИТОГО площадь болот

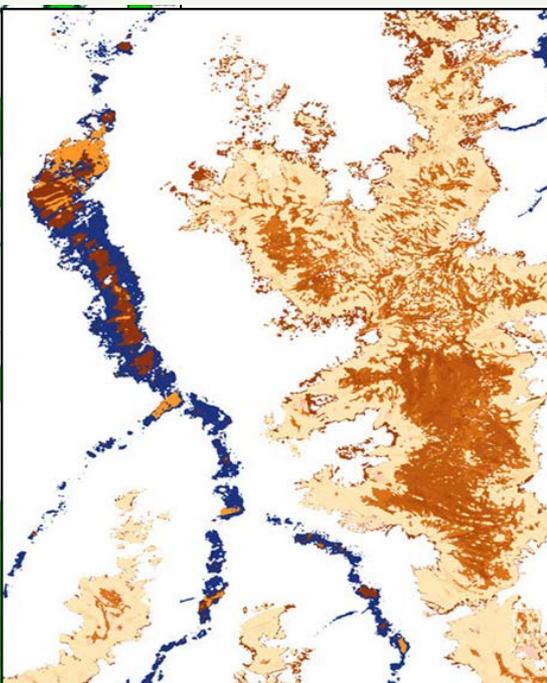
211 895

# Региональная оценка баланса углерода на примере КУ «Бакчарский»

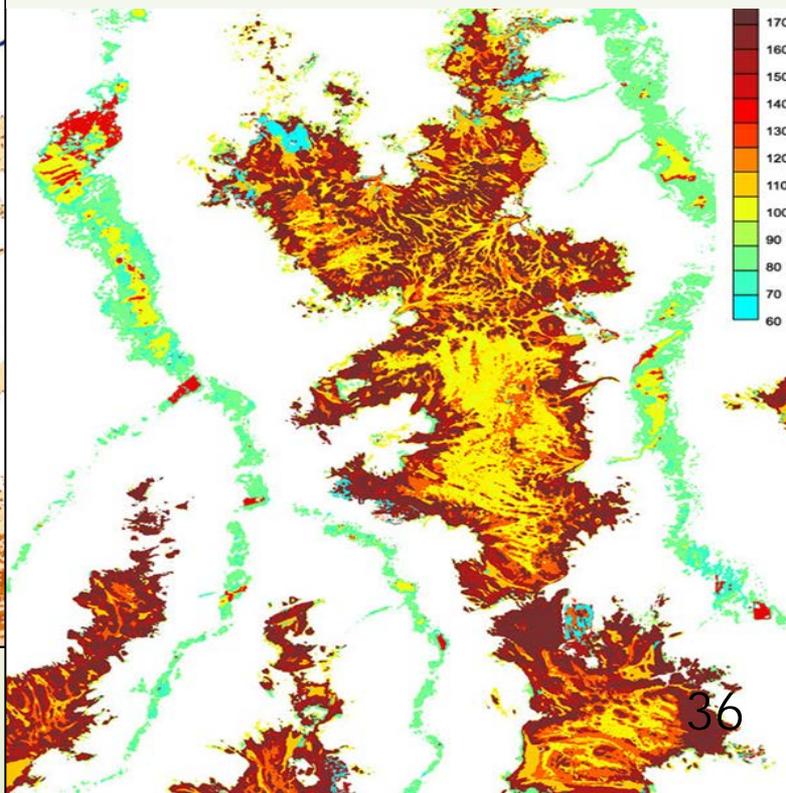
Карта чистой первичной продукции



Карта суммарного потока углерода с поверхности торфяной залежи



Карта баланса углерода



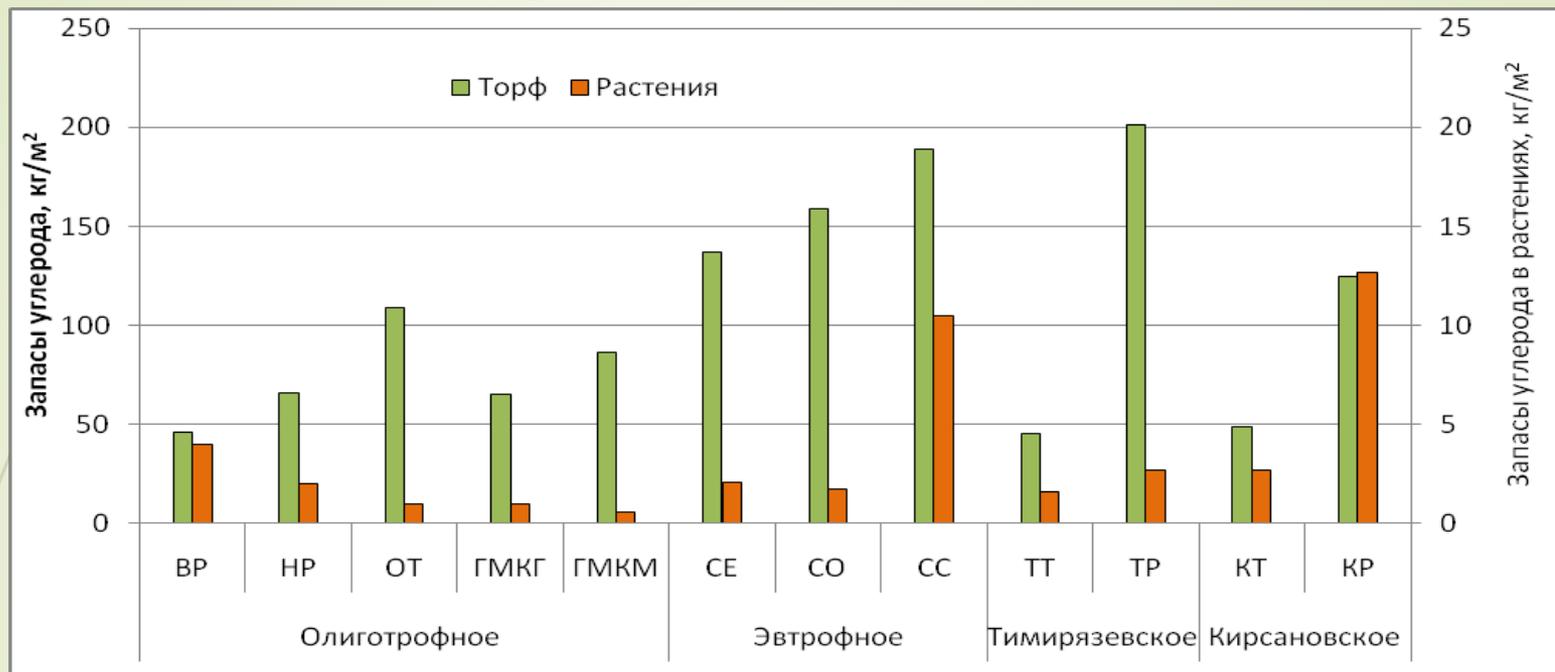
Ежегодное поглощение углерода болотными экосистемами ключевого участка «Бакчарский» площадью 212 тыс. га составляет около 300 тыс. тонн.

# Депонирование углерода болотными экосистемами

	Площадь, км <sup>2</sup>	Поглощение углерода, тС в год	Поглощение углерода, гС/м <sup>2</sup> в год	Источник
КУ «Бакчарский»	2 120	$3 \times 10^5$	51	Настоящая работа
Болота южнотаежной подзоны Западной Сибири	327 000*	$9,2 \times 10^6$ **	28	*Efremov, Efremova, 2001 **Настоящая работа
Болота Западной Сибири	824 000*	$0,5-2 \times 10^7$ **	15-65**	*Ефремов, Ефремова, 2004, **Титлянова с соавт., 1996
Болота России	1 400 000	$5 \times 10^7$ $3,7 \times 10^7$	35,7 26,4	Вомперский, 1994 Кобак и др., 2012
Болота мира (кроме тропических)	3 300 000	$9,57 \times 10^7$	29,0	Gorham, 1991

Полученные оценки скорости современного депонирования углерода в 1,5–2 раза выше по сравнению с глобальными оценками депонирования углерода болотами России и мира

# Запасы углерода в исследуемых торфяных залежах и растительности болот



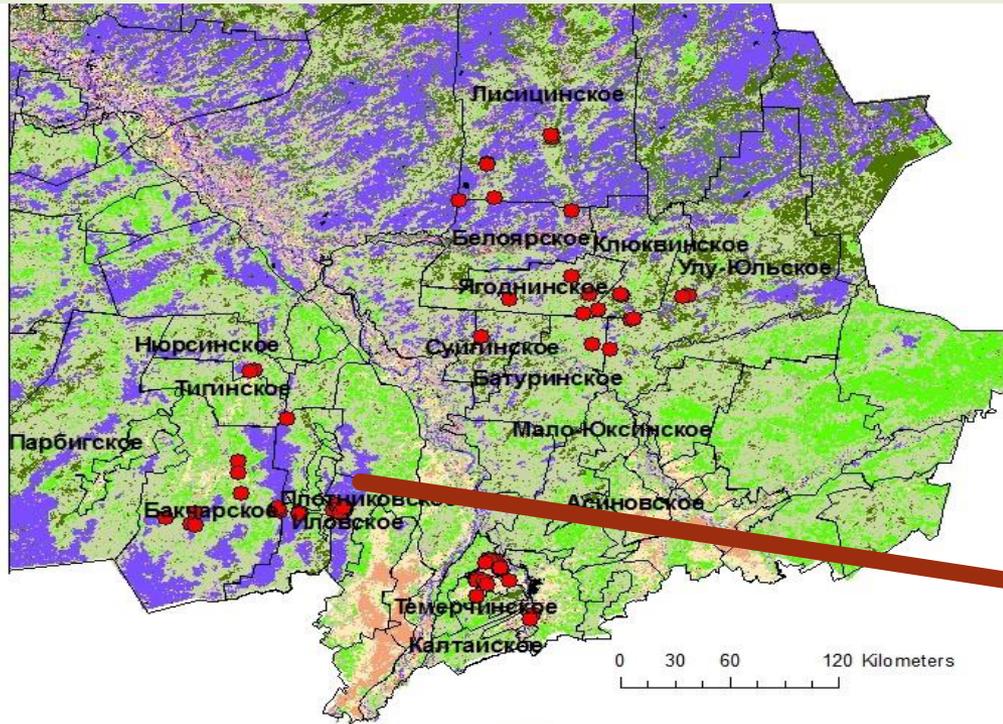
Средние оценки содержания углерода в исследуемых болотных экосистемах варьируют от 46 по 200 кг/м<sup>2</sup>, в зависимости от мощности торфяной залежи. В среднем для исследуемой территории они составляют 92 кг/м<sup>2</sup>.

Запасы углерода в болотных водах в 200–300 раз ниже по сравнению с запасами углерода в торфе.

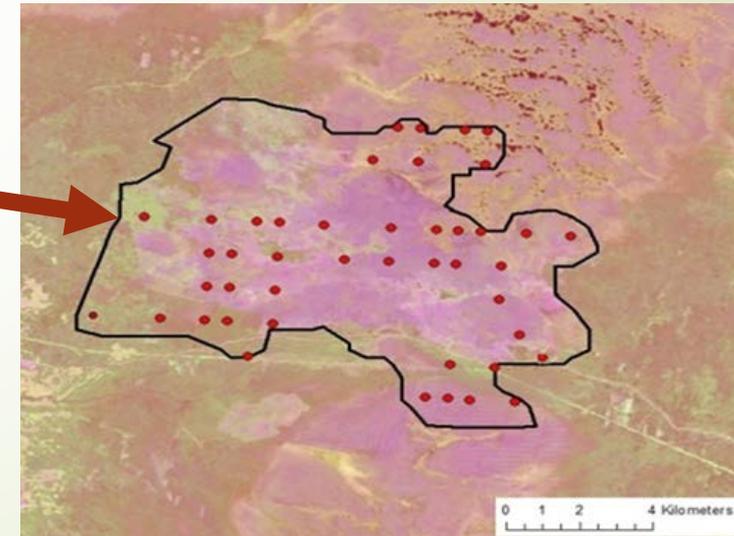
Запасы углерода в виде органического вещества растений в среднем в 50 раз ниже, чем во всей торфяной залежи.

# Пожары в лесоболотных комплексах и их последствия

## Характеристика пожаров и восстановления гарей лесоболотных комплексов в Томской области по спутниковым данным



Фрагмент космоснимка Landsat от 13.07.2007 г. с контуром гари (пожар 1998 г.) на Иксинском болоте



Карта растительности с обозначенной сеткой лесхозов и точками пожаров 2011-2016 гг.

# Масса выбросов вредных веществ в атмосферу при пожаре 1998 г. на ключевом участке Икса

Микро-ландшафт	Масса сгораемых	Выброс загрязняющих веществ, т								
		СО	СН	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	Дым (ультра-	тонный)	аэрозоль	Озон
1										1,2
2										1,2
3										0,5
4										1,3
5										5,5
6										17,7
7										35,2
8										31,7
9	3,0	27600	3726	2594	11,2	39	1518	2070		27,6
<b>всего</b>	<b>37.4</b>	<b>121957</b>	<b>16464</b>	<b>11464</b>	<b>49.4</b>	<b>171</b>	<b>6708</b>	<b>9147</b>		<b>122.0</b>

В результате торфяных пожаров в атмосферу выделяется огромное количество углерода, накопленного болотными экосистемами в течение сотен лет. Согласно расчетам потери углерода в этом пожаре в **14 раз** превышают ежегодную аккумуляцию углерода болотами. Кроме того, в результате пожара в атмосферу выделяется большое количество различных химических веществ, которые торф, как природный сорбент, накапливает в себе. Торфяные пожары наносят существенный вред окружающей среде.

1 – Согра; 2 – Сфагново-осоковые болота (топи); 3 – Грядово-мочажинные болота; 4 – Сфагново-сосновое болото (низкий рям); 5 – Сфагново-сосновое болото (рослый рям); 6 – Заболоченные сфагновые сосновые леса; 7 – Слабозаболоченные сфагновые леса смешанного состава; 8 – Слабозаболоченные зеленомошные болотнотравные леса; 9 – Автоморфные леса



**Спасибо за внимание!**