



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЮЖНО- ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ (ЮГ ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ, ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОЙ ЗАПОВЕДНИК)

*P. B. Сандлерский*

*исследование осуществлено при поддержке РФФИ, № 06-05-64937-а*

**Москва 2007**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА**

**ПАРАМЕТРЫ И МЕХАНИЗМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ЭНЕРГИИ В ЛАНДШАФТЕ**

**ПРОБЛЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ В СВЯЗИ СО  
СВОЙСТВАМИ ЛАНДШАФТА ПОД ДАННЫМ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА  
ПО ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА В  
ИССЛЕДОВАНИИ ГЕОСИСТЕМ**

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

ЦЕЛИ	ЗАДАЧИ	МЕТОДЫ
ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ преобразования энергии ландшафтом	Оценка составляющих энергетического баланса	расчет термодинамических характеристик
ВЕРИФИКАЦИЯ фундаментальных термодинамических соотношений для переменных	Проверка соответствия отношений между энергетическими характеристиками принятой модели	множественный регрессионный анализ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ термодинамических характеристик	Сезонная динамика Оценка термодинамических характеристик для различных типов геосистем Инвариантность	статистический анализ, интерпретация значений и отношений переменных

# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Возможности ДВ в исследовании энергетических систем

2. Теоретические представления:  
информационно-термодинамический  
подход

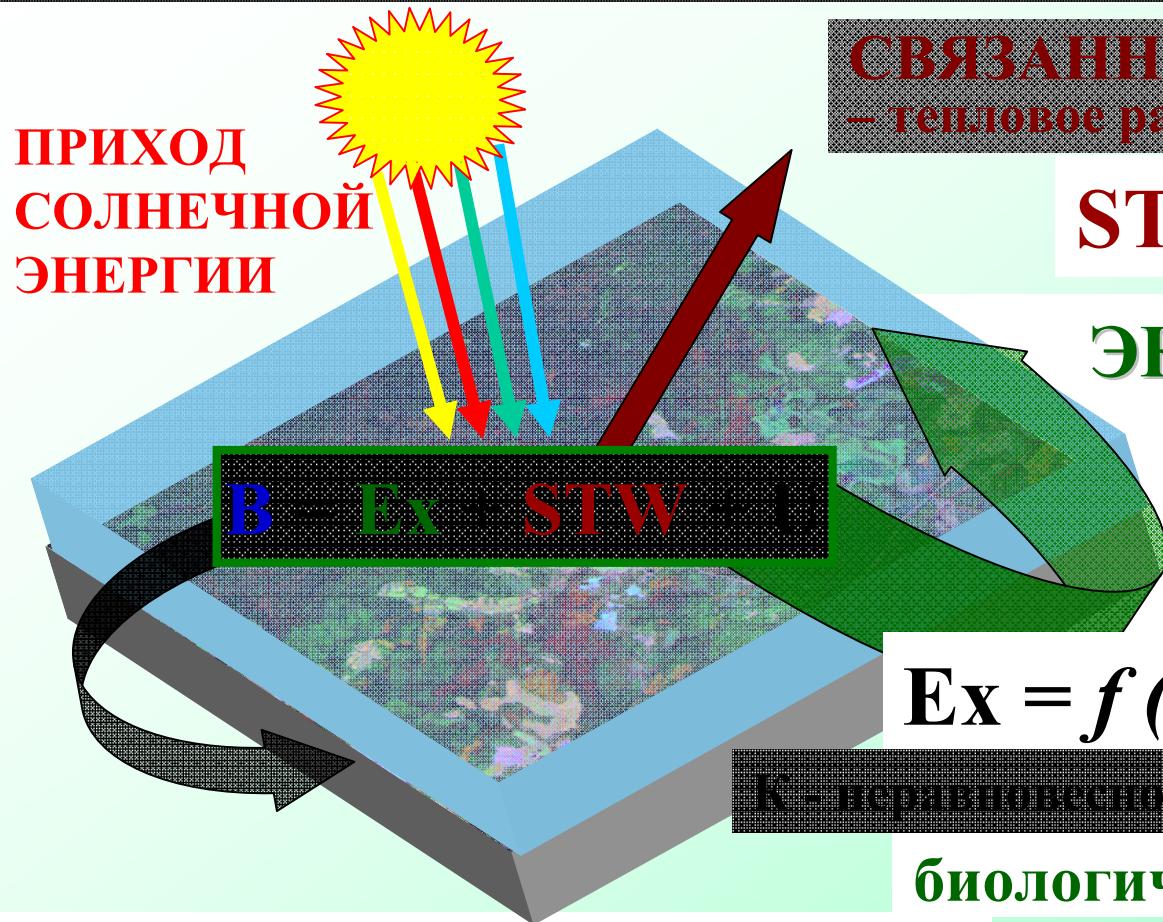
3. Методика расчета энергетических характеристик по ДВ

4. Проверка соответствия полученных временных рядов  
относительносогласованным временем

5. Построение по временным рядам  
энергетических характеристик

6. Информационный обмен в преобразовании энергии информацией

# ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД



**ПРИРАЩЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ (U)**  
– аккумуляция энергии системой:  
взаимодействие компонентов, видов,  
локальные круговороты

**СВЯЗАННАЯ ЭНЕРГИЯ - STW**  
– тепловое рассеяние энергии

$$STW = T^x S$$

**ЭКСЕРГИЯ - Ex**

– энергия идущая  
на осуществление  
полезной работы  
в геосистеме  
по поддержанию  
ее организации:  
круговорот влаги,  
биологическая продуктивность

$$Ex = f(BK)$$

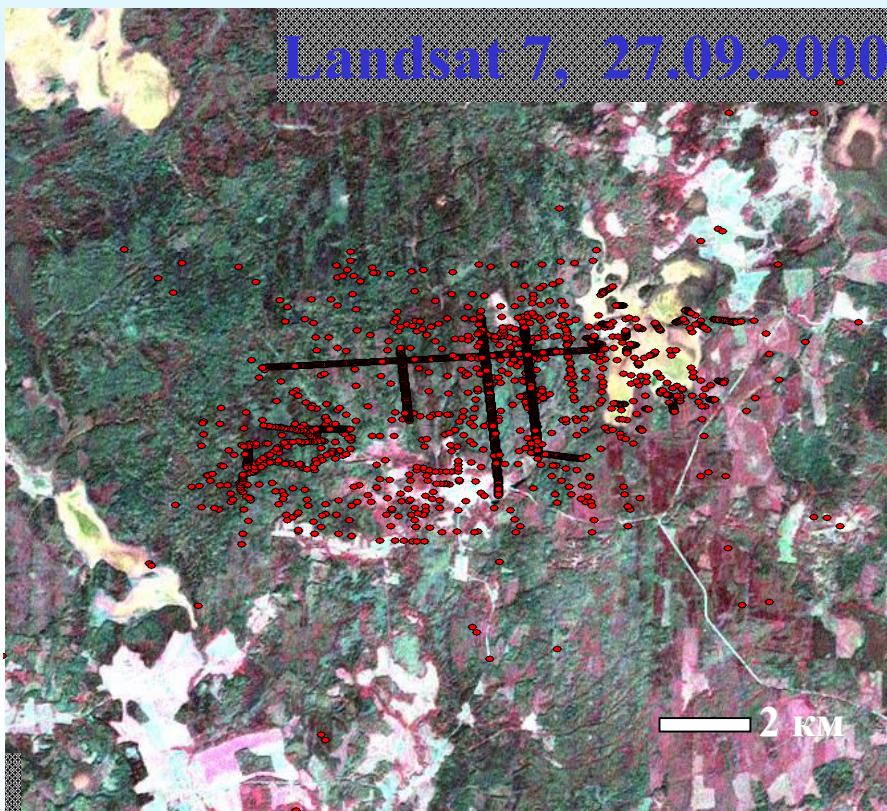
$$U = B - Ex - STW$$

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

**Целевая функция живого вещества –  
увеличение эксергии, то есть способности  
производить полезную работу,  
ЭВОЛЮЦИОНИРОВАНИЕ –  
УВЕЛИЧЕНИЕ ЭКСЕРГИИ**

по *Jorgensen S.V., Svirezhev Y. M. 2004  
TOWARDS A THERMODYNAMIC THEORY FOR  
ECOLOGICAL SYSTEMS*

# ЛАНДШАФТ

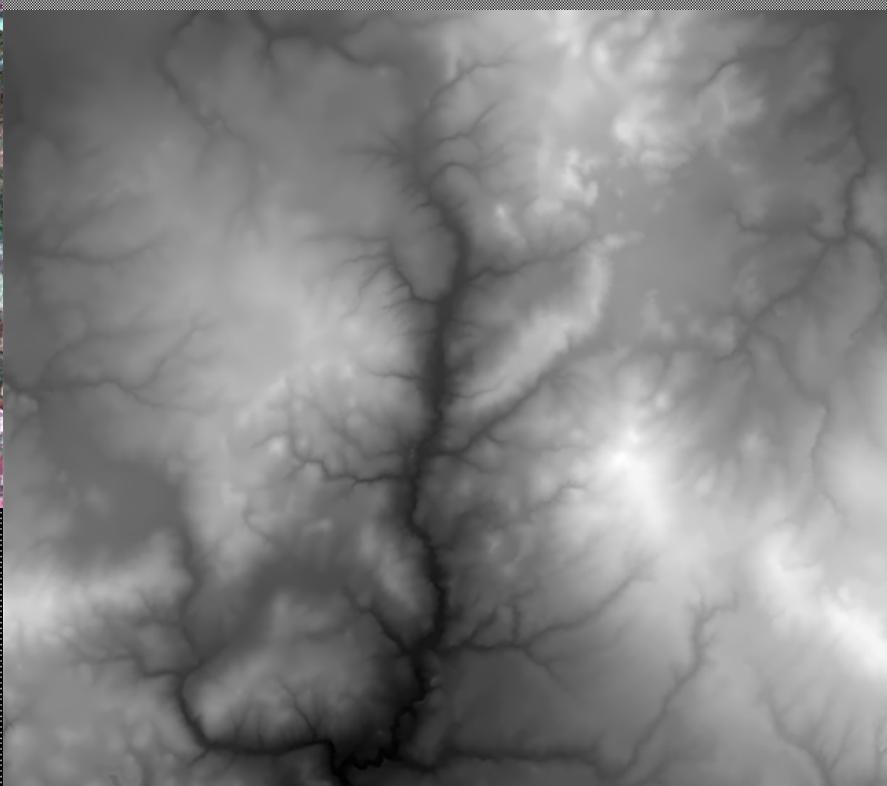


Ландшафт восточного склона Валдайской возвышенности. Равнинный тип субальпийской тундры с преобладанием кустарникового покрова. Видны следы антропогенного воздействия.

Ландшафт  
Валдайской возвышенности

Государственный

Цифровая модель рельефа, 1:10000



Плоская слабовхолмленная моренно-грядовая возвышенность. Абсолютные высоты 230 – 280 м

# ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА – спектрозональная сканерная съемка Landsat 7 ETM+ и LANDSAT 5 TM с пространственным разрешением 28.5x28.5 м

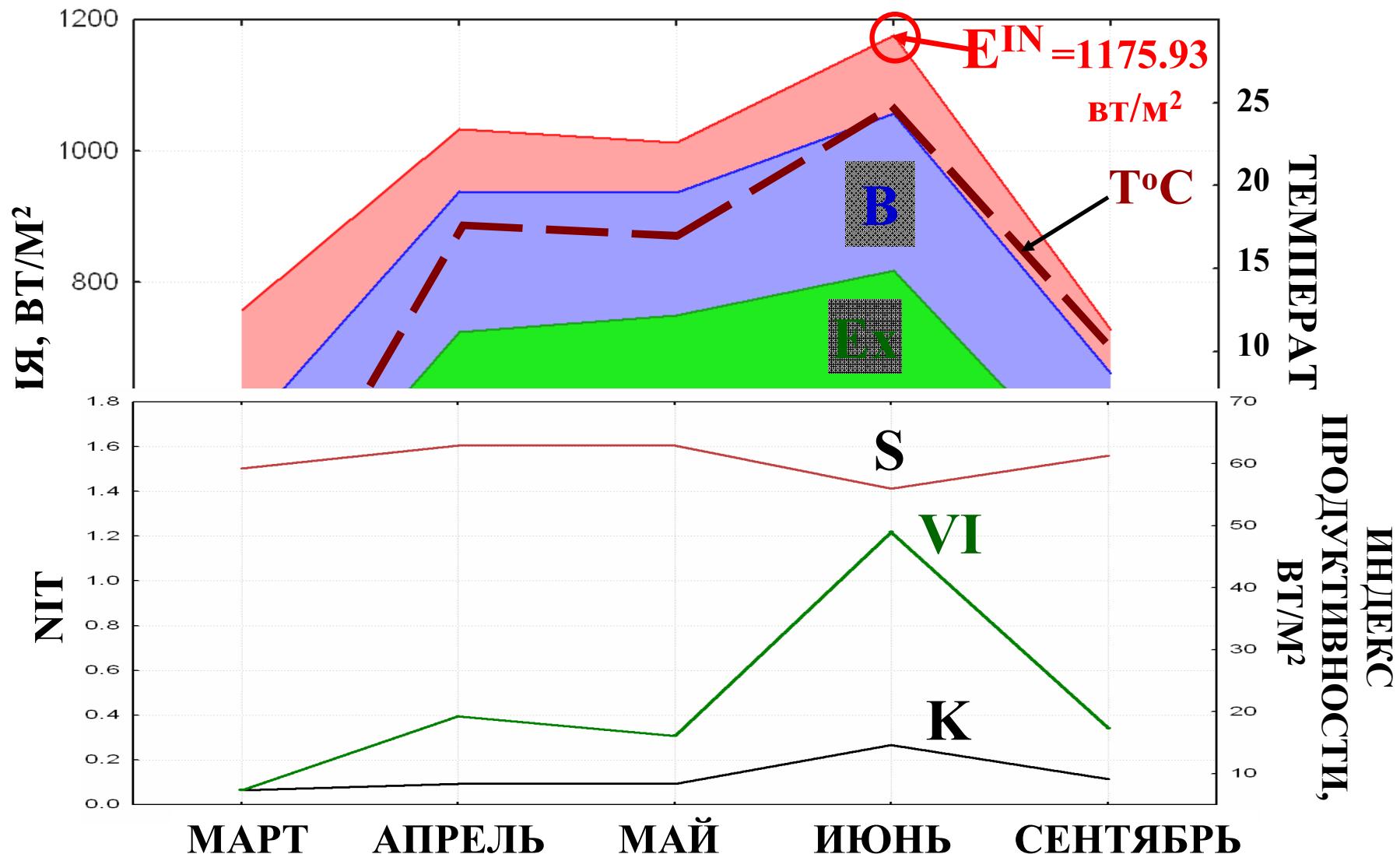
срок съемки	съемочная система	дата	время	высота солнца
март	Landsat 7 ETM+	22.03.2001	11:38	32.72
апрель	Landsat 7 ETM+	27.04.2000	11:45	46.28
май	Landsat 5 TM	03.05.1990	10:28	45.00
июнь	Landsat 7 ETM+	20.06.2002	11:41	53.87
сентябрь	Landsat 7 ETM+	27.09.2000	11:38	31.02

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

- **приход солнечной радиации -  $E^{IN}$**
- **поглощенная солнечная радиация -  $B$**
- **неравновесность поглощения энергии -  $K$**
- **эксергия солнечной радиации -  $Ex$**
- **энтропия отраженной солнечной энергии -  $S$**
- **температура -  $T$ , и тепловой поток -  $TW$**
- **связанная энергия -  $STW$**
- **внутренняя энергия (приращение) -  $U$**
- **индекс производительности -  $VI$**

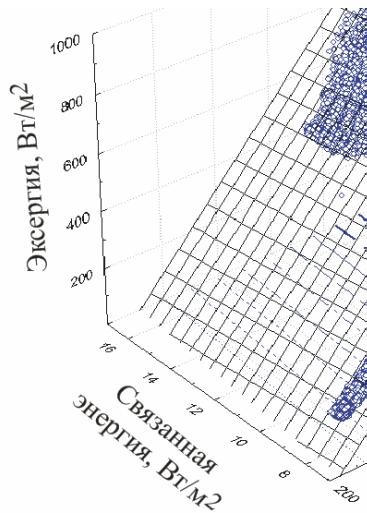
# ОБЩИЕ ОЦЕНКИ ПЕРЕМЕННЫХ

## ГОДОВОЙ ХОД



# ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

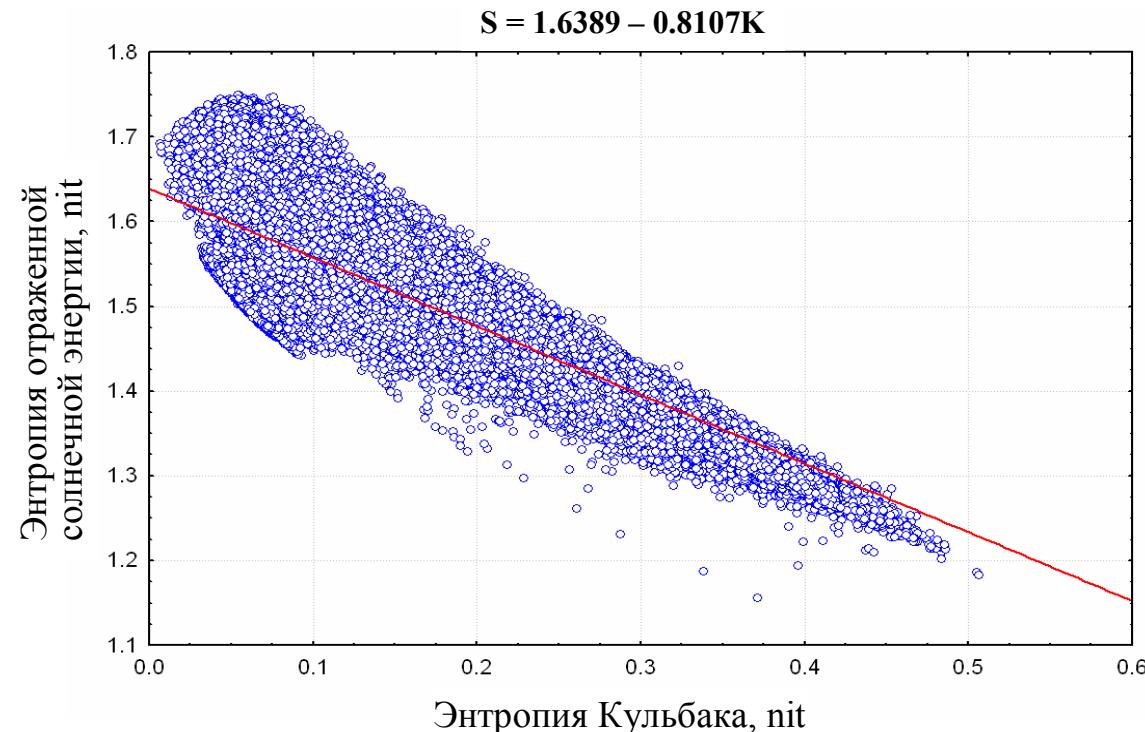
## Проверка основных термодинамических зависимостей



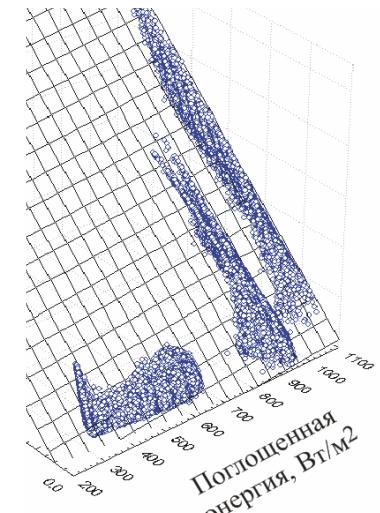
$$Ex = -203.277 + 1.0 \\ R^2 = 0.9$$

БАЛАФ

$$Ex = B -$$



$$K \sim -S$$



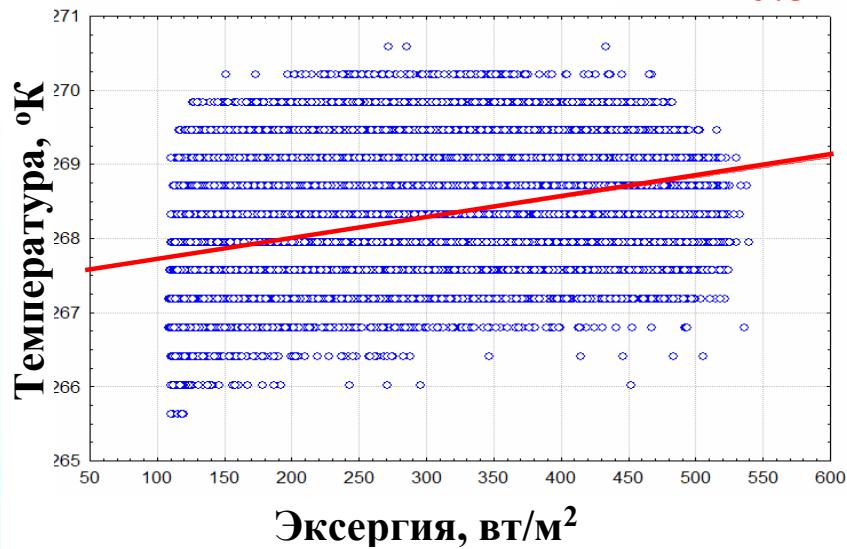
$$+ 0.013B + 171.14K \\ R^2 = 0.93$$

$$f(B, K)$$

В целом для сезонов соотношения выполняются:  
термодинамические характеристики есть функция  
поглощенной энергии и неравновесности

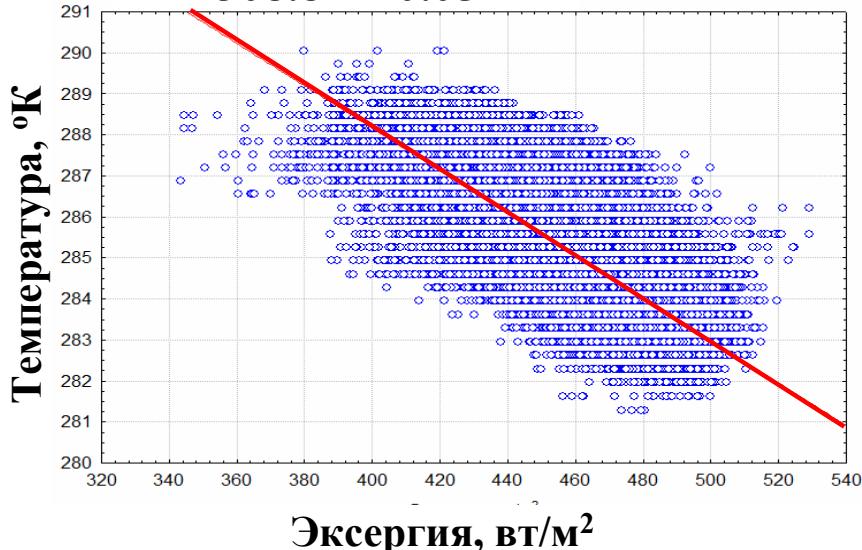
# НЕСООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ

$$T = 267.46 + 0.0027Ex \quad r = 0.51$$



РАННЯЯ ВЕСНА – СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ

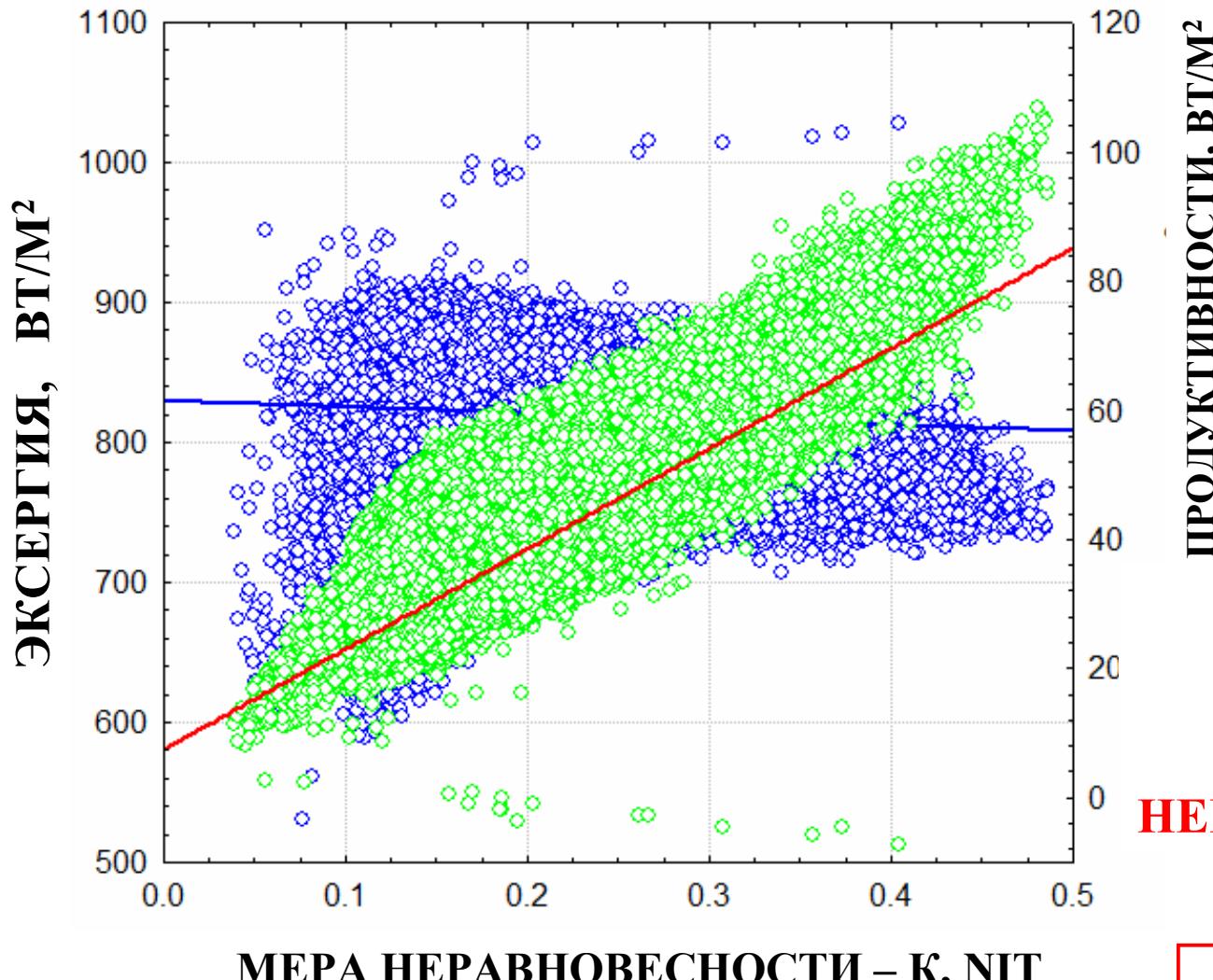
$$T = 308.87 - 0.052Ex \quad r = -0.77$$



ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

ПРИНЦИПИАЛЬНО РАЗЛИЧНЫЕ  
МЕХАНИЗМЫ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ  
ДЛЯ ЗИМЫ И ЛЕТА

## НЕСООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ



$$Ex = 829.42 - 42.54K$$

$$r = -0.08$$

Ex  
VI

$$VI = 7.53 - 155.16K$$

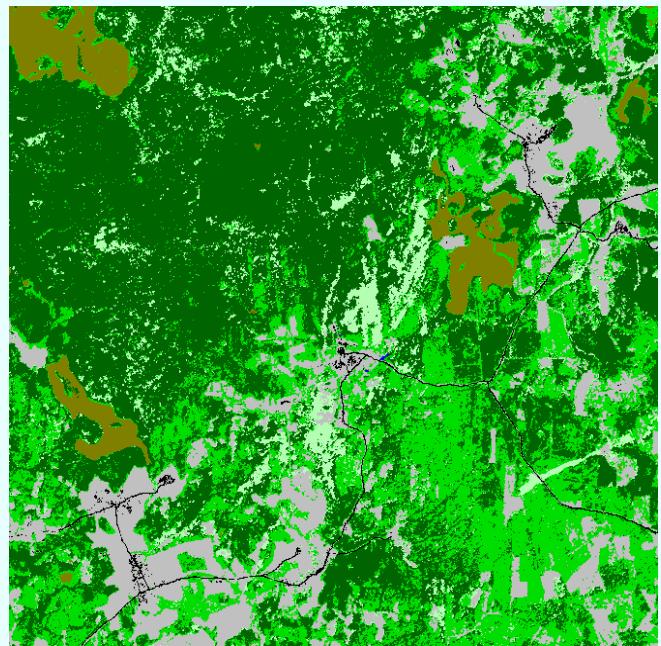
$$r = 0.88$$

ВОПРЕКИ  
ТЕОРИИ  
ЭКСЕРГИЯ  
МАЛО СВЯЗАНА С  
НЕРАВНОВЕСНОСТЬЮ

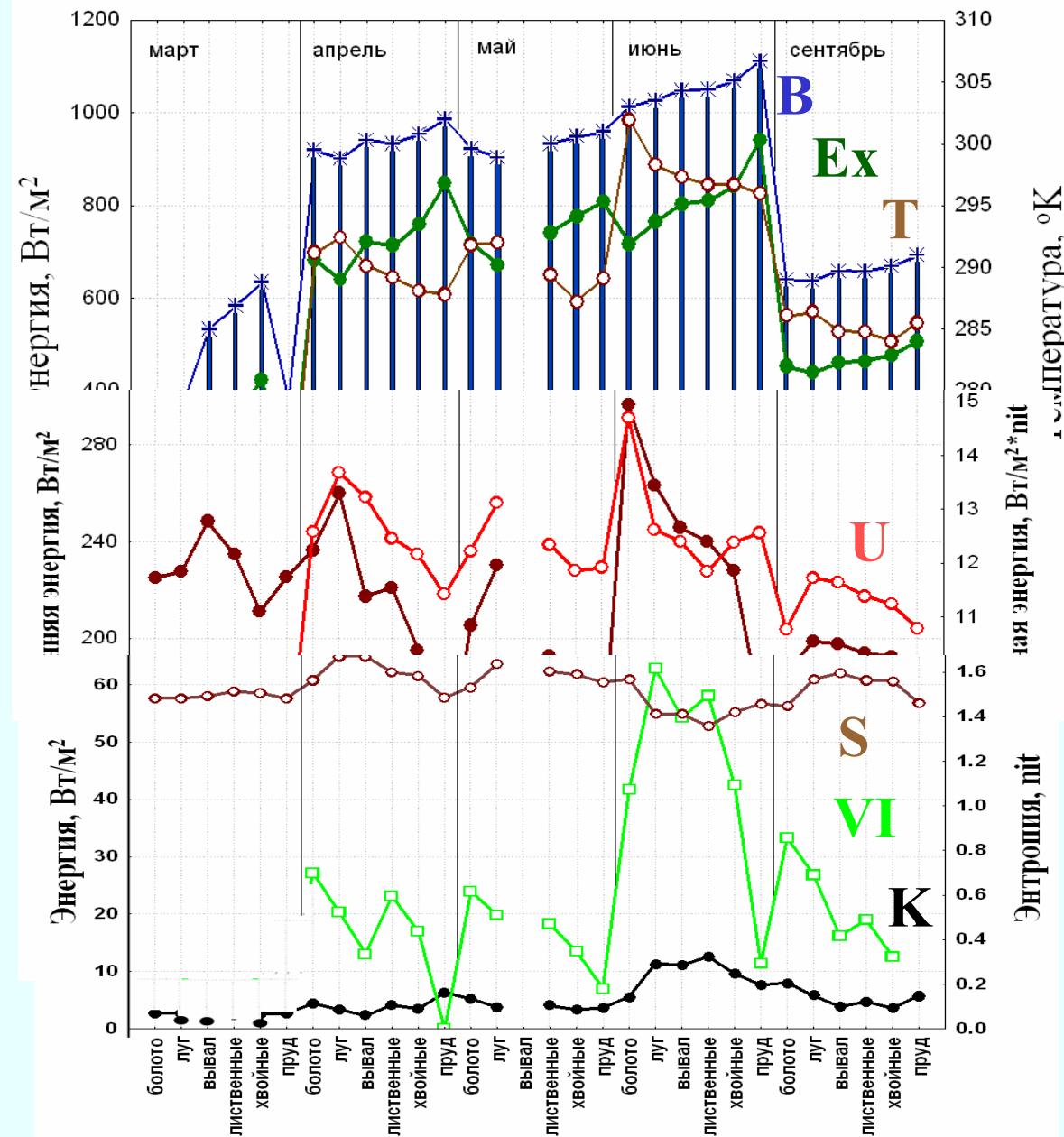
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ  
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬЮ

ЭКСЕРГИЯ  
– ЗАТРАТЫ  
НА ИСПАРЕНИЕ

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК



пруды  
 хвойные леса  
 лиственые леса  
 вывалы  
 луга  
 верховые болота  
 антропогенные  
 объекты



# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

вегетационный период

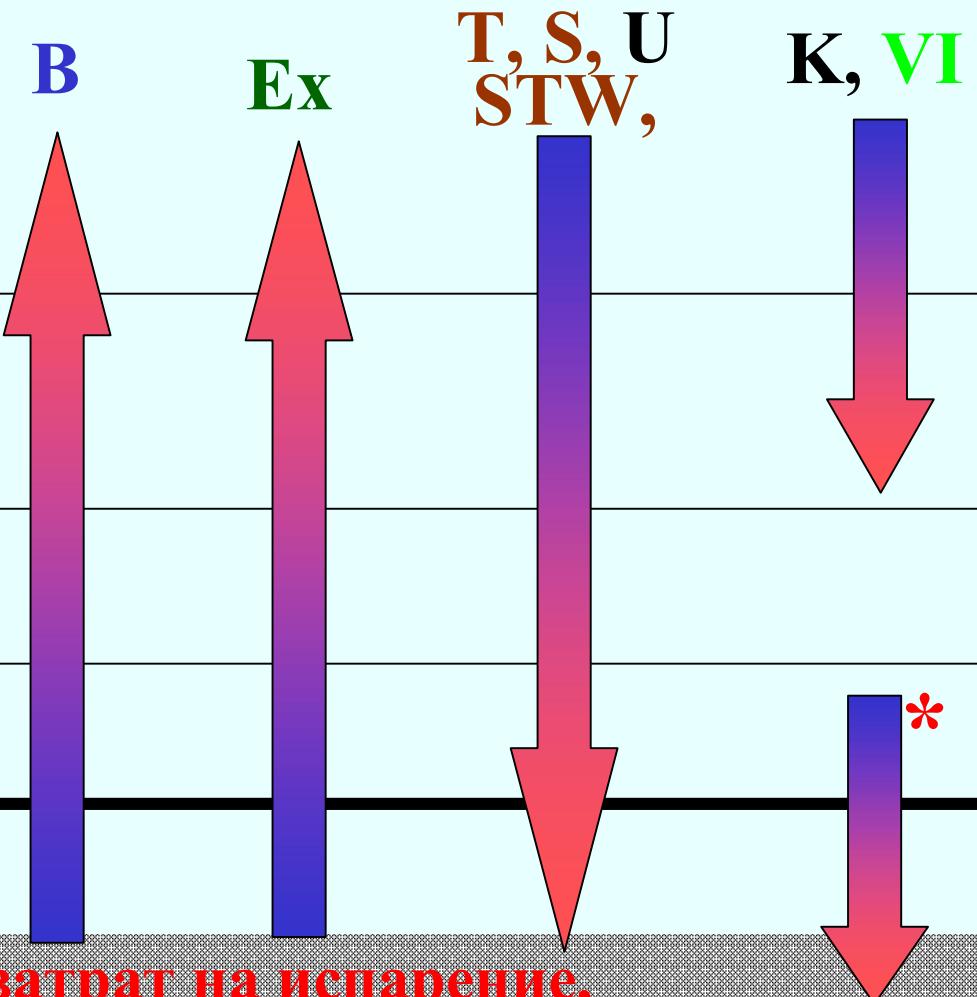
ХВОЙНЫЕ  
ЛЕСА

ЛИСТВЕННЫЕ  
ЛЕСА

ВЫВАЛЫ

ЛУГА

ВЕРХОВЫЕ  
БОЛОТА -



МИНИМУМ ЗАТРАТ НА ИСПАРЕНИЕ,  
ВЫСОКАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ И ПРОДУКТИВНОСТЬ  
\* ВЕСНА И ОСЕНЬ, ЛЕТОМ НЕ АКТИВНЫ

# ИНВАРИАНТНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЛАНДШАФТОМ

**ИНВАРИАНТ** (лат. *invarians* - неизменяющийся), величина, остающаяся неизменяемой при тех или иных преобразованиях

**Общий фактор определяющий преобразование энергии  
варьирующий в пространстве, но  
неизменный во времени**

- Аспект 1.** Целевая функция геосистемы - то, на поддержание чего направлена ее работа
- Аспект 2.** Основа для интерполяции точечных измерений энергетических характеристик
- Аспект 3.** Основа применения одномоментных измерений со спутников при изучении континуальных процессов функционирования геосистем

# ИНВАРИАНТНОСТЬ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Тип геосистем	Мера	Термодинамические переменные							
		B	Ex	TW	STW	U	VI	S	K
Пруды	Конкордация	0.975	0.853	0.875	0.517	0.437	0.231	0.326	0.209
Хвойный лес		0.942	0.961	0.975	0.690	0.871	0.768	0.670	0.607
Лиственный лес		0.901	0.955	0.919	0.608	0.867	0.719	0.649	0.607
Вывалы		0.920	0.949	0.934	0.656	0.936	0.673	0.835	0.812
Луга		0.908	0.902	0.906	0.654	0.747	0.739	0.829	0.818
Болота		0.921	0.820	0.907	0.947	0.977	0.854	0.675	0.651
В целом для территории	Конкордация	0.906	0.939	0.944	0.564	0.786	0.673	0.615	0.570
	Определитель	0.974	0.636	0.854	0.648	0.471	0.723	0.531	0.325
	Нагрузка на первый фактор	0.845	0.537	0.707	0.511	0.462	0.611	0.497	0.398

**МАКСИМАЛЬНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ**      **ПОГЛОЩЕННАЯ ЭНЕРГИЯ, ЭКСЕРГИЯ**      **ЛЕС**  
**ТЕПЛОВОЙ ПОТОК**

**БОЛОТА – ПОДДЕРЖКА ПРОДУКТИВНОСТИ  
и внутренней энергии**

# ИНВАРИАНТ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ

большие значения



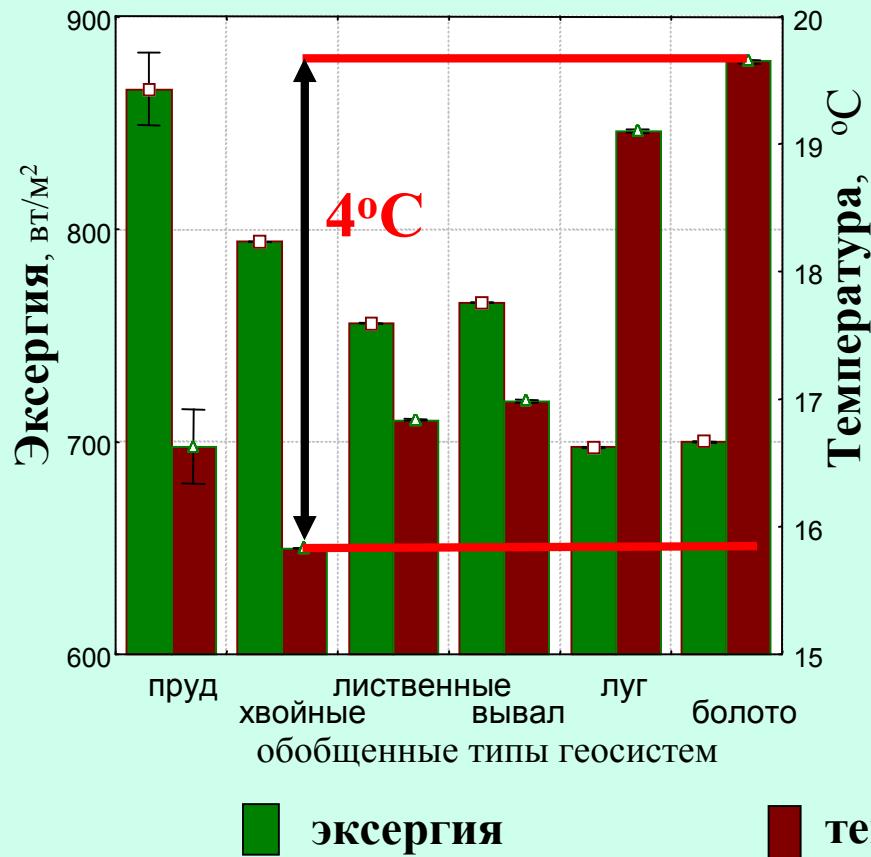
ИНВАРИАНТ

малые значения

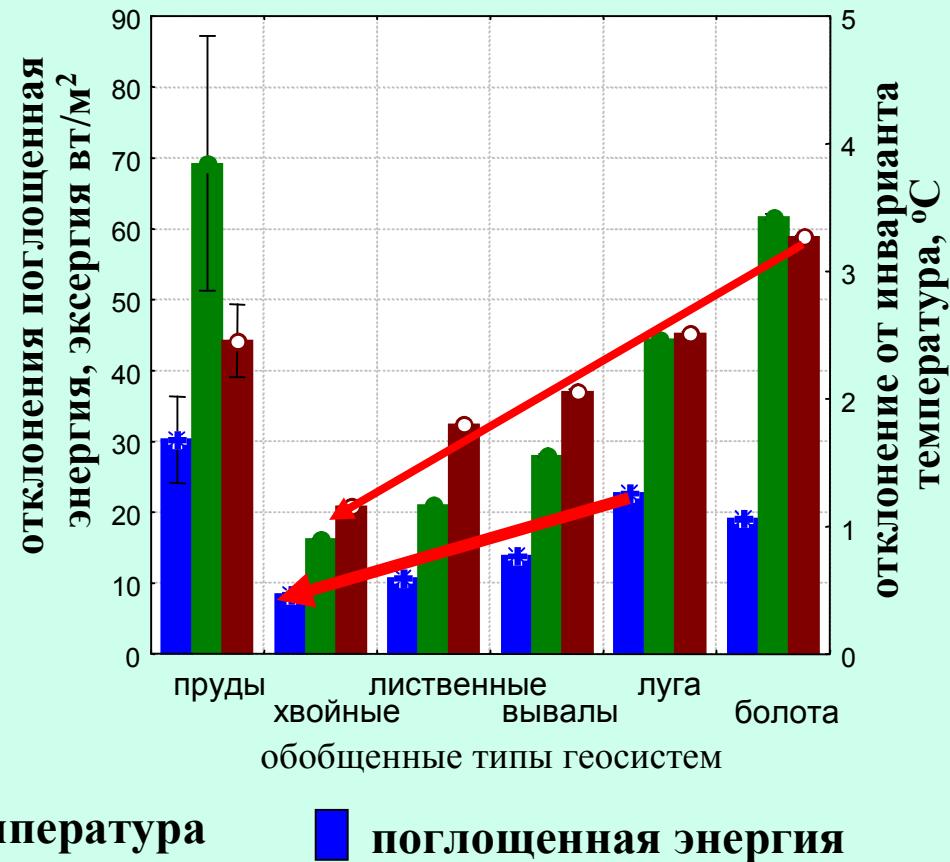


ОТКЛОНЕНИЯ

# ИНВАРИАНТ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ



СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ИНВАРИАНТОВ  
ДЛЯ ЭКСЕРГИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ  
**Обезлесение территории**  
**(антропогенное)**  
может приводить к увеличению  
температуры на  $4^{\circ}\text{C}$



СПОСОБНОСТЬ К  
ПОДДЕРЖАНИЮ  
ИНВАРИАНТА:  $V$ ,  $\text{Ex}$ ,  $\text{TW}$

**Максимальная – леса,**  
**минимальная – луга, болота**

# РЕЗУЛЬТАТЫ

## ПОКАЗАНО ЧТО:

**ЭКСЕРГИЯ** – часть поглощенной солнечной энергии идущая на только осуществление круговорота влаги – чисто физического процесса, не связанного с неравновесностью

**ПРОИЗВОДСТВО БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ** – функция неравновесности преобразования солнечной энергии

**В ходе ЭВОЛЮЦИИ** геосистемы **уменьшают** эксергию (испарение), и **увеличивают** неравновесность (продукцию)

**Функционирование ВЕРХОВЫХ БОЛОТ** принципиально отлично от луговых и лесных комплексов: ориентированы на приращение внутренней энергии и производство продукции, а не на поддержание круговорота влаги

# ВЫВОДЫ

**ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ПОЗВОЛЯЮТ ОЦЕНИТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
ЭНЕРГИИ ЛАНДШАФТОМ,  
несмотря на одновременность измерений**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО  
ПОДХОДА, ИЗМЕРЕННЫЕ ПО ДИСТАНЦИОННОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ОБЪЕКТИВНО ОТРАЖАЮТ  
ТЕКУЩЕЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ  
ЛАНДШАФТОМ И СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ ЕГО  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**