



ОСНОВНЫЕ СТРАТЕГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ БИОГЕОЦЕНОЗАМИ ЮЖНОЙ ТАЙГИ (по данным дистанционного зондирования)

Р.Б. Сандлерский, Ю.Г. Пузаченко

ИПЭЭ РАН
лаборатория биogeоценологии
и исторической экологии им. В.Н. Сукачева



Пушино - 2013

ОБЩАЯ ПРОБЛЕМА

**Возможности адаптации живого вещества в
обеспечении устойчивого преобразования
солнечной энергии и, соответственно, собственной
устойчивости**

ЦЕЛЬ СООБЩЕНИЯ:

**Демонстрация возможностей использования
термодинамического подхода в исследовании
функционирования биогеоценозов с помощью
мультиспектральной дистанционной информации**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

позволяет оценить основные параметры преобразования энергии биогеоценозом как функцию неравновесности живого вещества

ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ $R = F + ST + U$

F СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ – потенциал к совершению полезной работы, определяемый удаленностью системы от состояния термодинамического равновесия со средой. В открытых системах далеких от термодинамического равновесия – ЭКСЕРГИЯ (E_x)

ST СВЯЗАННАЯ ЭНЕРГИЯ – не способная совершать полезную работу энергия

U ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ – энергия взаимодействия частей системы

Полезная работа солнечной энергии в биогеоценозе – поддержание круговорота влаги и производство биологической продукции

**Преобразование энергии в биосфере
осуществляется живым веществом, ключевым
свойством которого является наличие свободной
энергии – потенциала для совершения полезной
работы по поддержанию себя в состоянии
организованности, то есть устойчивой
неравновесности
(В.И. Вернадский, Э.С. Бауэр)**

**Максимизация свободной энергии – целевая
функция развития живых систем
(J. Kay, S.E. Jorgensen, Y.M. Svirezhev и др.)**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ **на основе мультиспектральной дистанционной информации**

СОСТАВЛЯЮЩИЕ БАЛАНСА ПОГЛОЩЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ:

- эксергия солнечной радиации – затраты энергии на эвапотранспирацию (Вт/м²)**
- диссипация энергии в атмосферу с тепловым потоком и энтропией (связанная энергия, Вт/м²)**
- аккумуляция энергии в системе (приращение внутренней энергии, Вт/м²)**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ **на основе мультиспектральной дистанционной информации**

ПЕРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СТРУКТУРУ СИСТЕМЫ И ЕЕ БИОЛОГИЧЕСКУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ:

- энтропия отраженной солнечной радиации
(нат)**
- приращение информации в системе,
преобразующей солнечную энергию (нат)**
- вегетационный индекс (Вт/м^2)**

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА – МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ

Срок съемки				Параметры сцены			
Месяц	Число	Год	День от начала года	Съемочная Система	Время, местное	Высота солнца (градусы)	Приход солнечной энергии, Вт/м ²
Февраль	4	1987	35	Landsat 5 TM	11:08	13.35	332.99
	11	2007	42	Landsat 5 TM	11:42	18.18	448.51
Март	21	1986	80	Landsat 5 TM	11:13	30.67	718.21
	22	2001	81	Landsat 7 ETM +	11:38	32.13	756.83
	28	2003	87	Landsat 7 ETM +	11:36	34.22	797.60
Апрель	10	2002	100	Landsat 7 ETM +	11:36	39.37	895.47
	21	2009	111	Landsat 5 TM	11:36	43.99	963.76
	27	2000	118	Landsat 7 ETM +	11:45	45.93	1001.56
Май	3	1990	123	Landsat 5 TM	10:28	42.62	933.23
Июнь	1	1992	152	Landsat 4 TM	10:54	49.85	1041.02
	2	1995	153	Landsat 5 TM	10:54	49.97	1042.85
	3	2007	154	Landsat 5 TM	11:42	54.06	1102.46
	6	1988	158	Landsat 4 TM	11:15	52.18	1074.44
	20	2002	171	Landsat 7 ETM +	11:41	54.67	1116.31
	21		172	Landsat 5 TM	11:23	53.37	1088.59
Август	22	2007	234	Landsat 5 TM	11:40	43.38	940.95
Сентябрь	20	2006	263	Landsat 5 TM	11:41	33.35	763.47
	25	2008	269	Landsat 5 TM	11:32	30.44	726.98
	27	2000	271	Landsat 7 TM	11:36	30.43	715.42
Октябрь	15	1986	288	Landsat 5 TM	11:07	22.50	539.01

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Еловые леса
Смешанные леса

Луга
Верховые болота

Основные типы сообществ

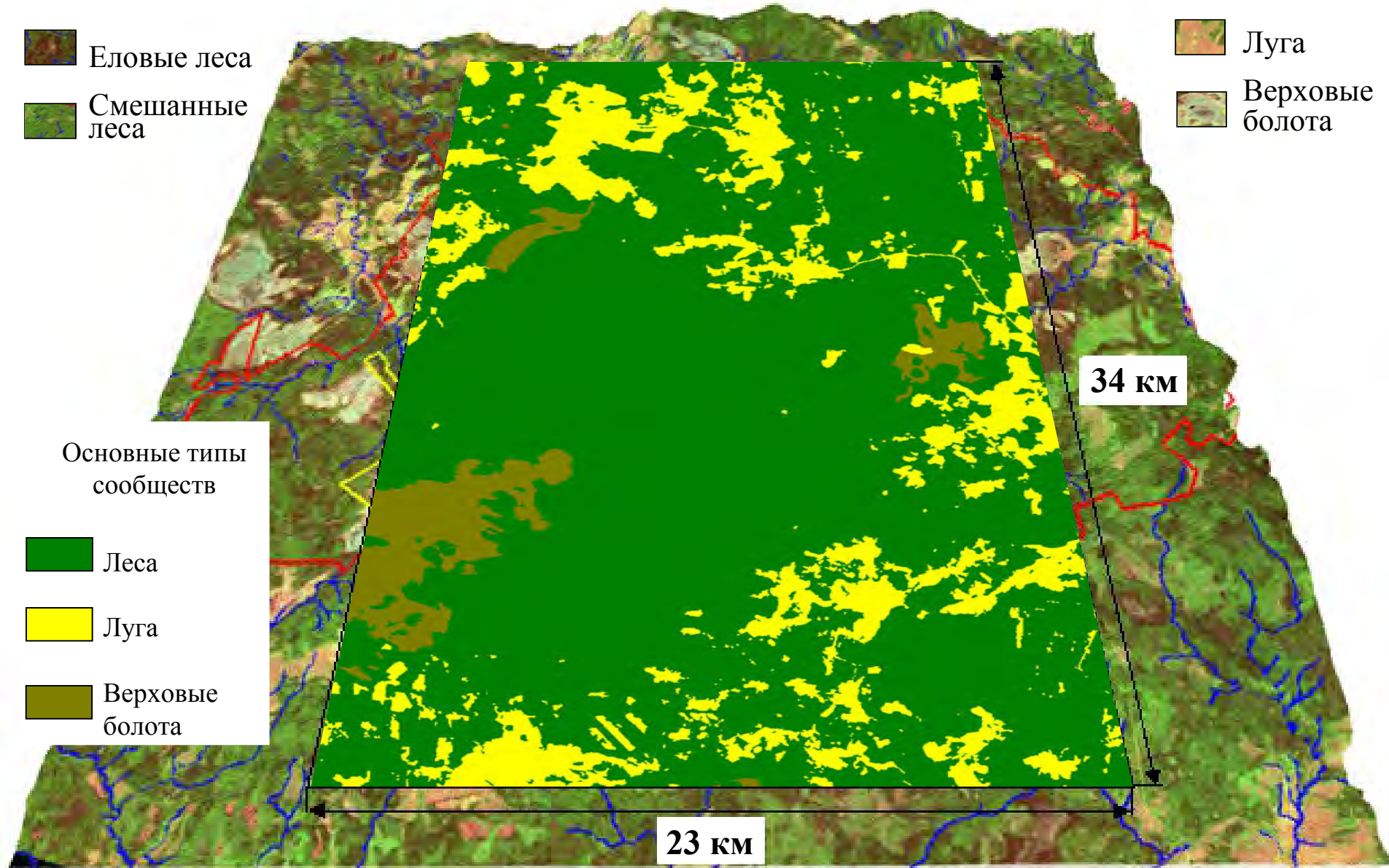
Леса
Луга
Верховые болота

34 км

23 км

— граница охранной зоны Заповедника

— граница заповедного ядра



МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

Суммы температур и осадков в период предшествующий съемке, по данным метеостанции Заповедника (вершина моренной гряды):

3 дня 6 дней 12 дней 24 дня 36 дней

Количество осадков в день предшествующий съемке

Среднесуточная температура воздуха в день съемки.

Номер дня от начала года, как параметр сезонного состояния растительности



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

СЕВЕРО-ЗАПАДНОЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ
УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
СТАНЦИЯ
КОМПЛЕКСНОГО ФОНОВОГО МОНИТОРИНГА
ЛЕСНОЙ ЗАПОВЕДНИК

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ОТ СРЕДЫ В ЦЕЛОМ ДЛЯ ЛАНДШАФТА

«ПЕРЕМЕННЫЕ СРЕДЫ»

EIN – приходящая солнечная радиация

TM_X – сумма температур

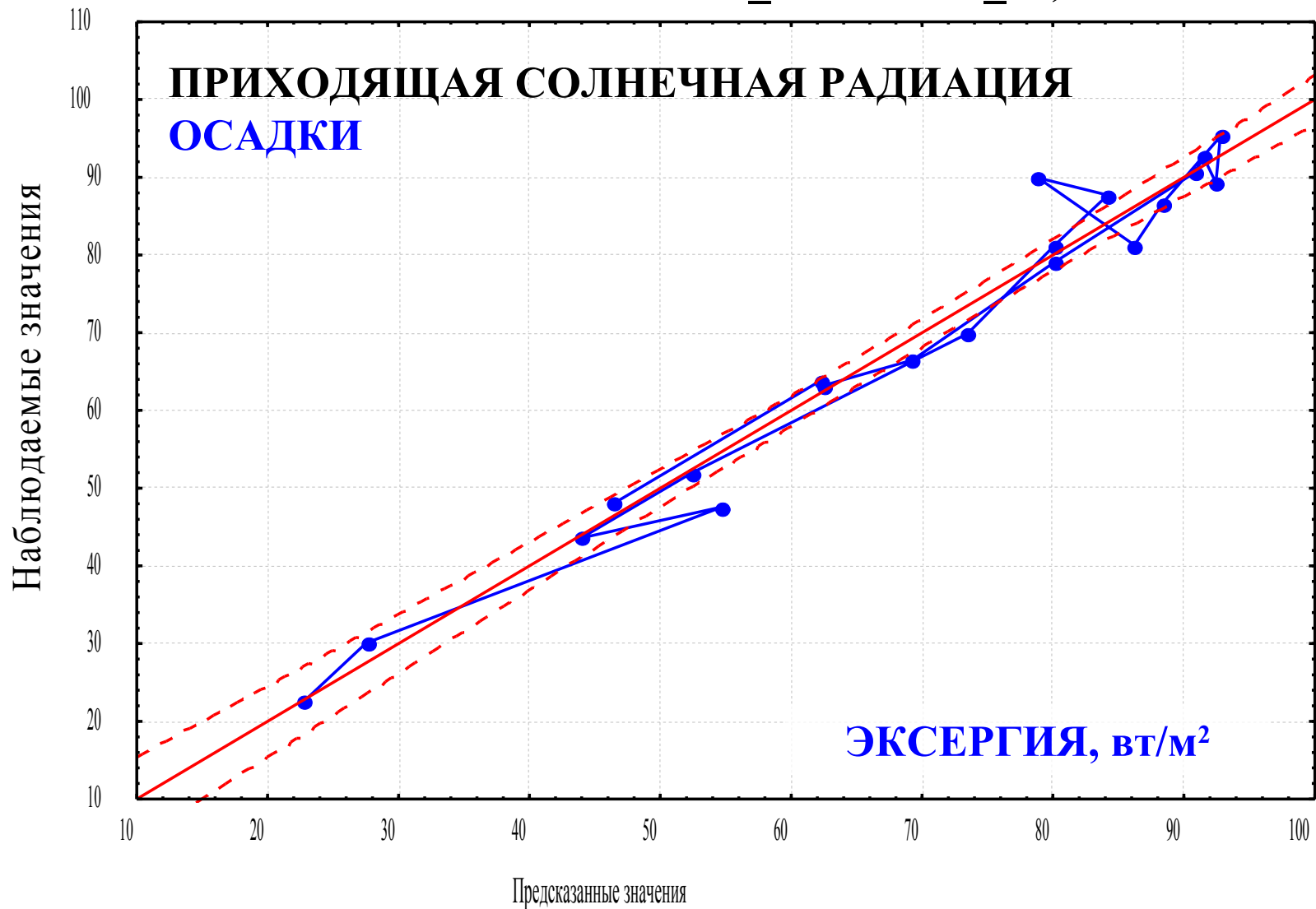
PR_X – сумма осадков

**X – В – предшествующий день, 3, 6, 12, 24,
36 дней**

DAY - номер дня от начала года

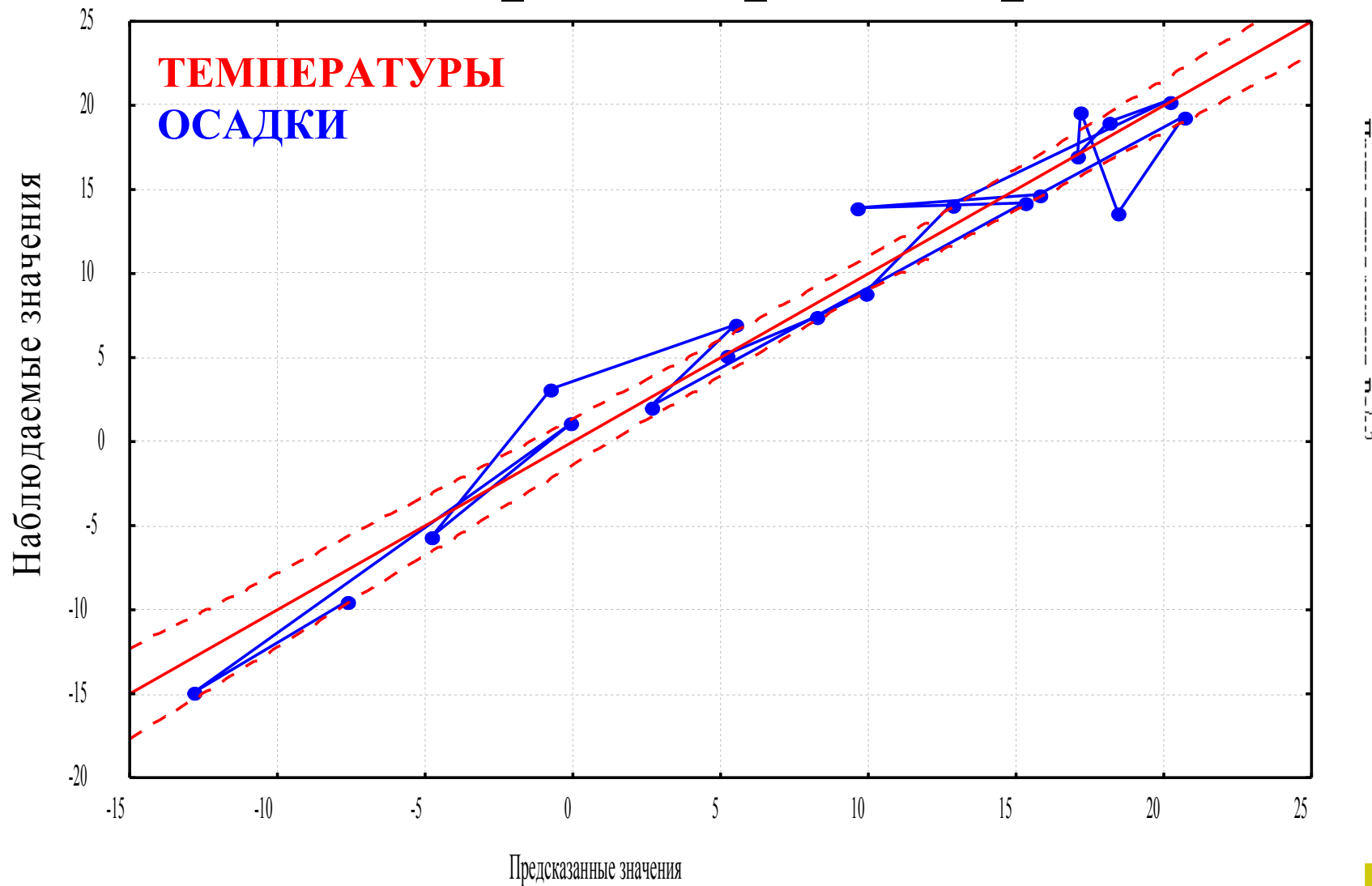
ПОГЛОЩЕННАЯ ЭНЕРГИЯ И ЭКСЕРГИЯ

$$EX = -10.44 - 0.71EIN - 2.41PR_B + 0.06PR_36, R^2 = 0.966$$



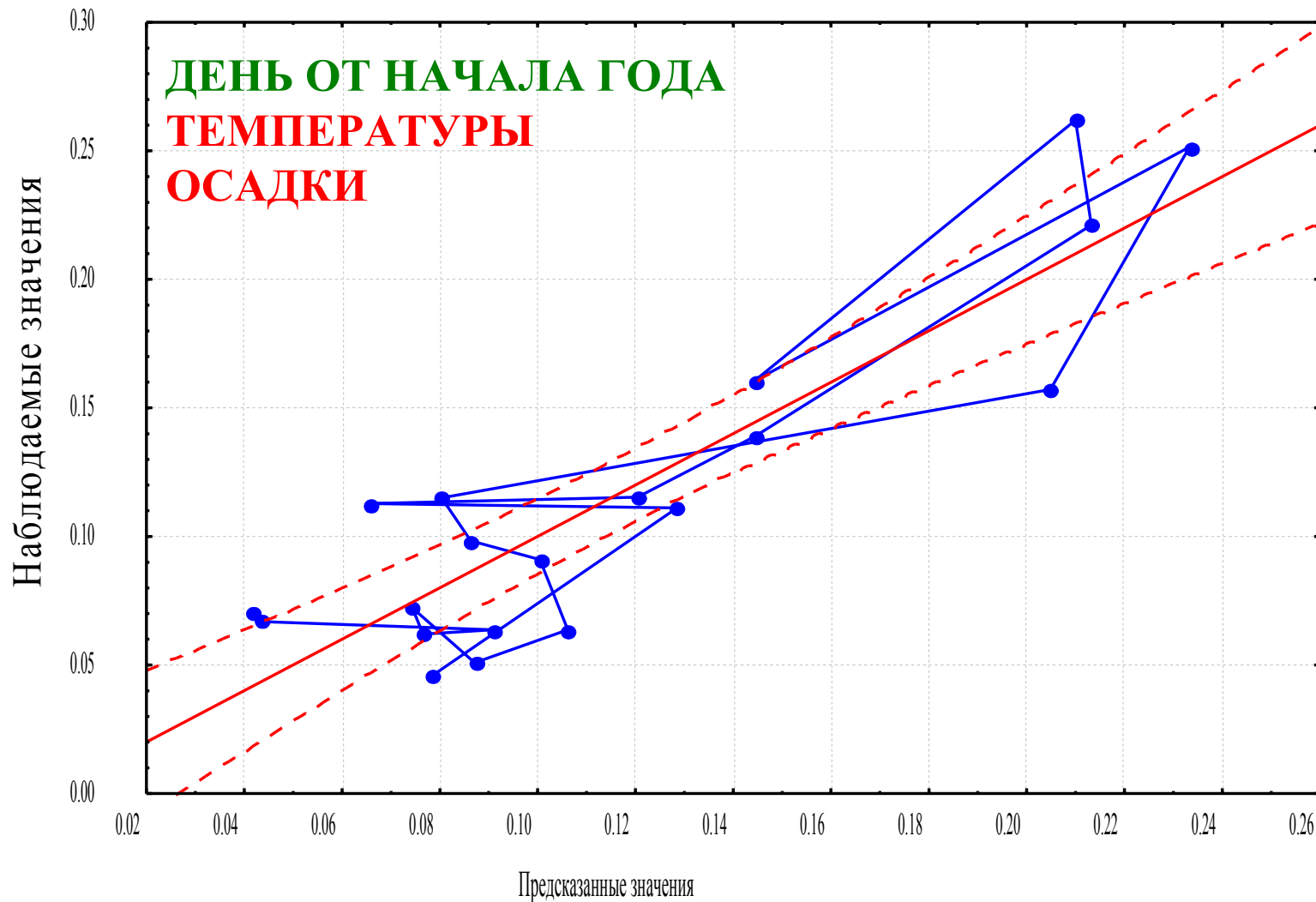
ТЕМПЕРАТУРА

$$TC = 4.03 - 0.07PR_B + 0.15TM_6 + 0.006TM_36, R^2 = 0.965$$



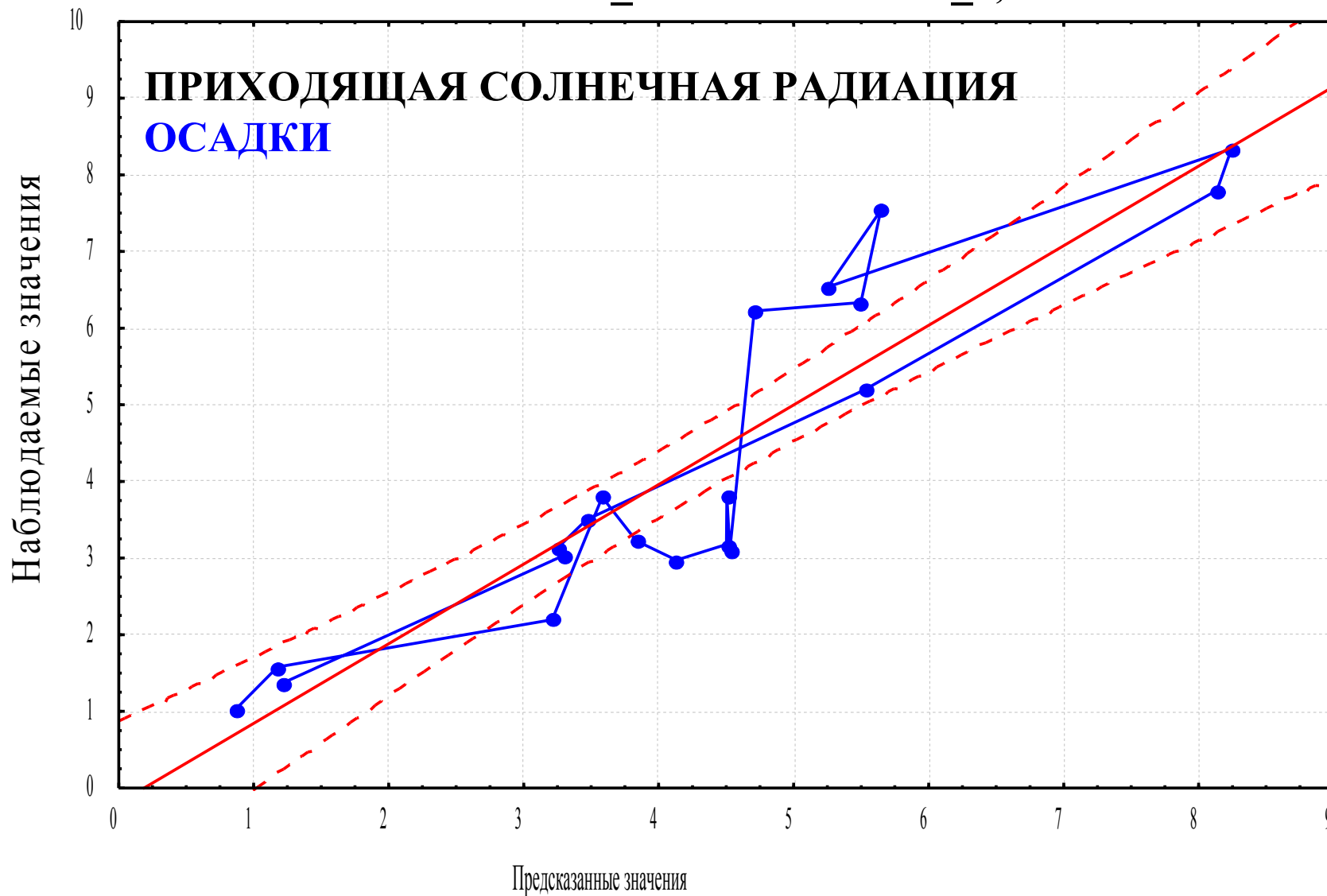
ПРИРАЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

$$K = 0.202 - 0.004DAY + 0.00003DAY^2 - 0.0000001DAY^3 + 0.00002PR_12 \times TM_12 - 0.0001PR_B \times TMP, R^2 = 0.88$$



ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС

$$VI = 0.04EIN - 0.29PR_6 + 0.003EIN \times PR_6, R^2 = 0.83$$



ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ОТ ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ И СЕЗОНА

МОЩНОСТЬ СВЯЗИ:

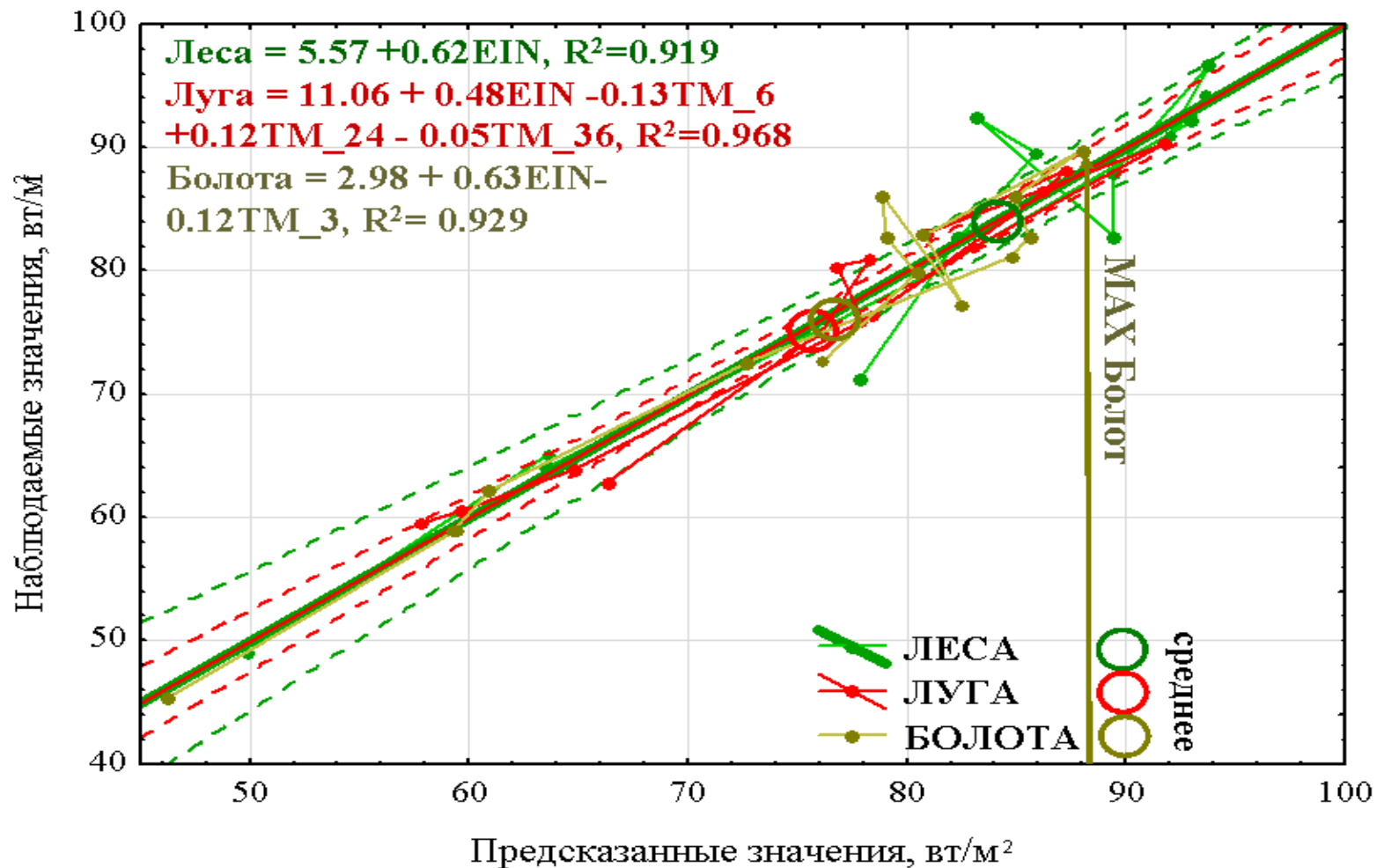
- 1. $R^2 > 0.9$:** поглощенная энергия, эксергия, температура,
- 2. $0.78 > R^2 < 0.9$:** связанная энергия, приращение внутренней энергии, приращение информации, вегетационный индекс, энтропия

ТРИ ТИПА ОТНОШЕНИЙ:

- 1. Поглощенная энергия, эксергия, вегетационный индекс, приращение внутренней энергии – приходящая солнечная радиация и осадки**
- 2. Температура, связанная энергия – Температура и осадки**
- 3. Энтропия, приращение информации – СЕЗОН, соотношение температуры и осадков**

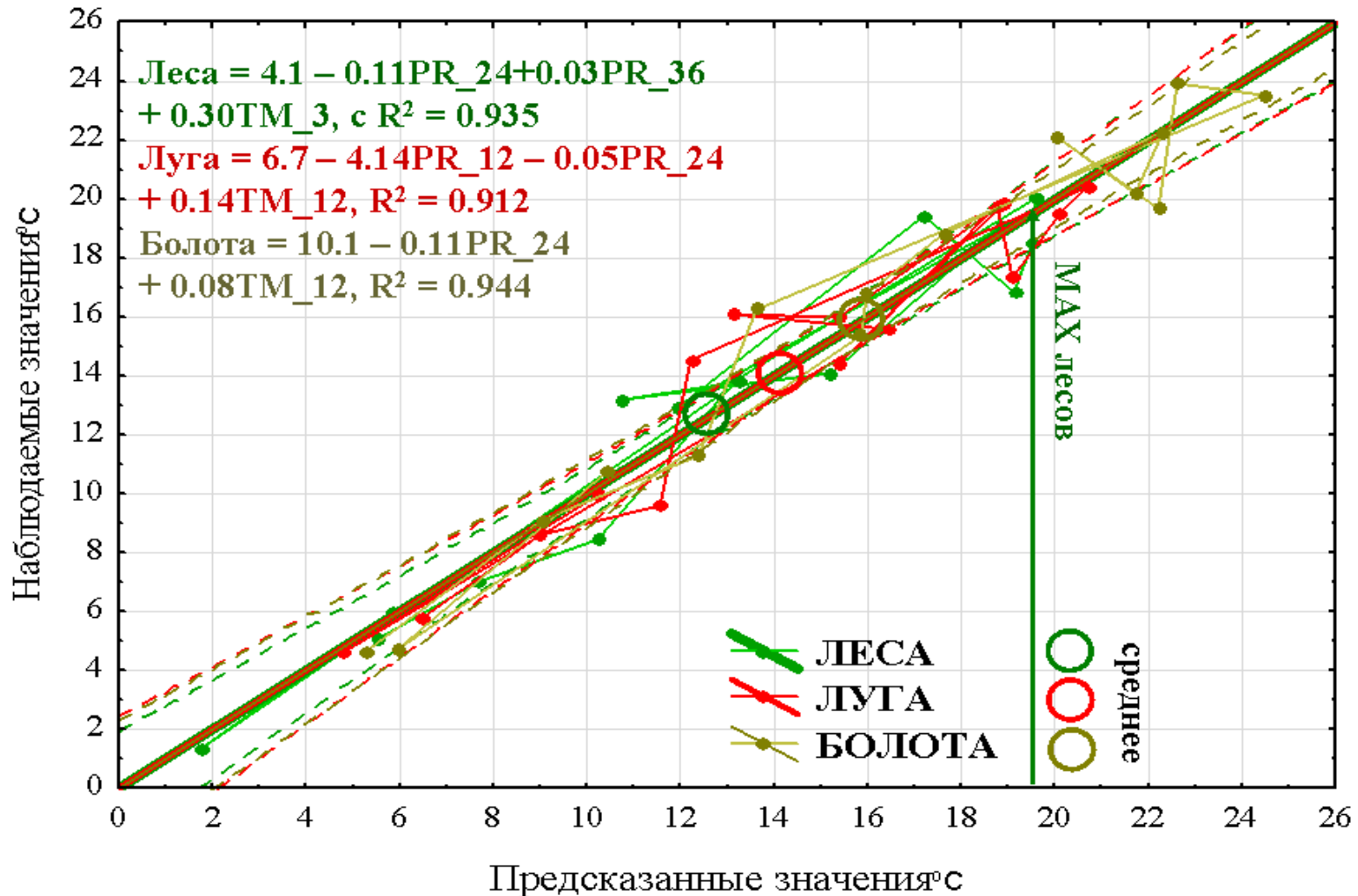
**ЗАВИСИМОСТЬ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПЕРЕМЕННЫХ ОТ СЕЗОНА,
ПРИХОДЯЩЕЙ СОЛНЕЧНОЙ
ЭНЕРГИИ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ПЕРЕМЕННЫХ
ДЛЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ
РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ
БЕССНЕЖНОГО ПЕРИОДА**

ЭКСЕРГИЯ



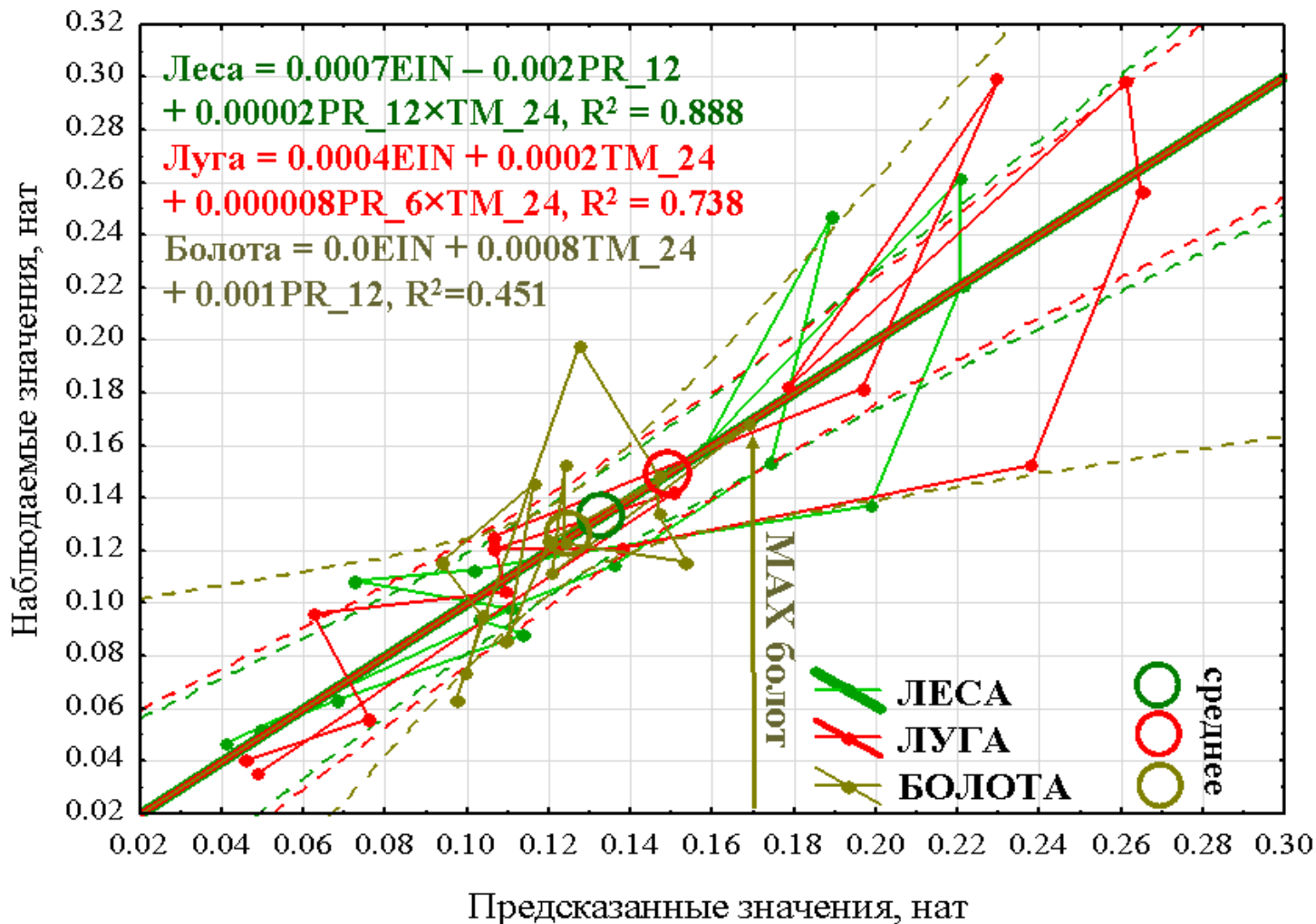
ДЛЯ ЛЕСОВ ЭКСЕРГИЯ ЗАВИСИТ ТОЛЬКО ОТ ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ, ДЛЯ ЛУГОВ И БОЛОТ ЕЩЕ И ОТ НАКОПЛЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР. ПРИ ЭТОМ ДЛЯ ЛЕСА В ТЕЧЕНИЕ БЕССНЕЖНОГО ПЕРИОДА ЭКСЕРГИЯ В ЦЕЛОМ МАКСИМАЛЬНА, А БОЛОТ МИНИМАЛЬНА

ТЕМПЕРАТУРА



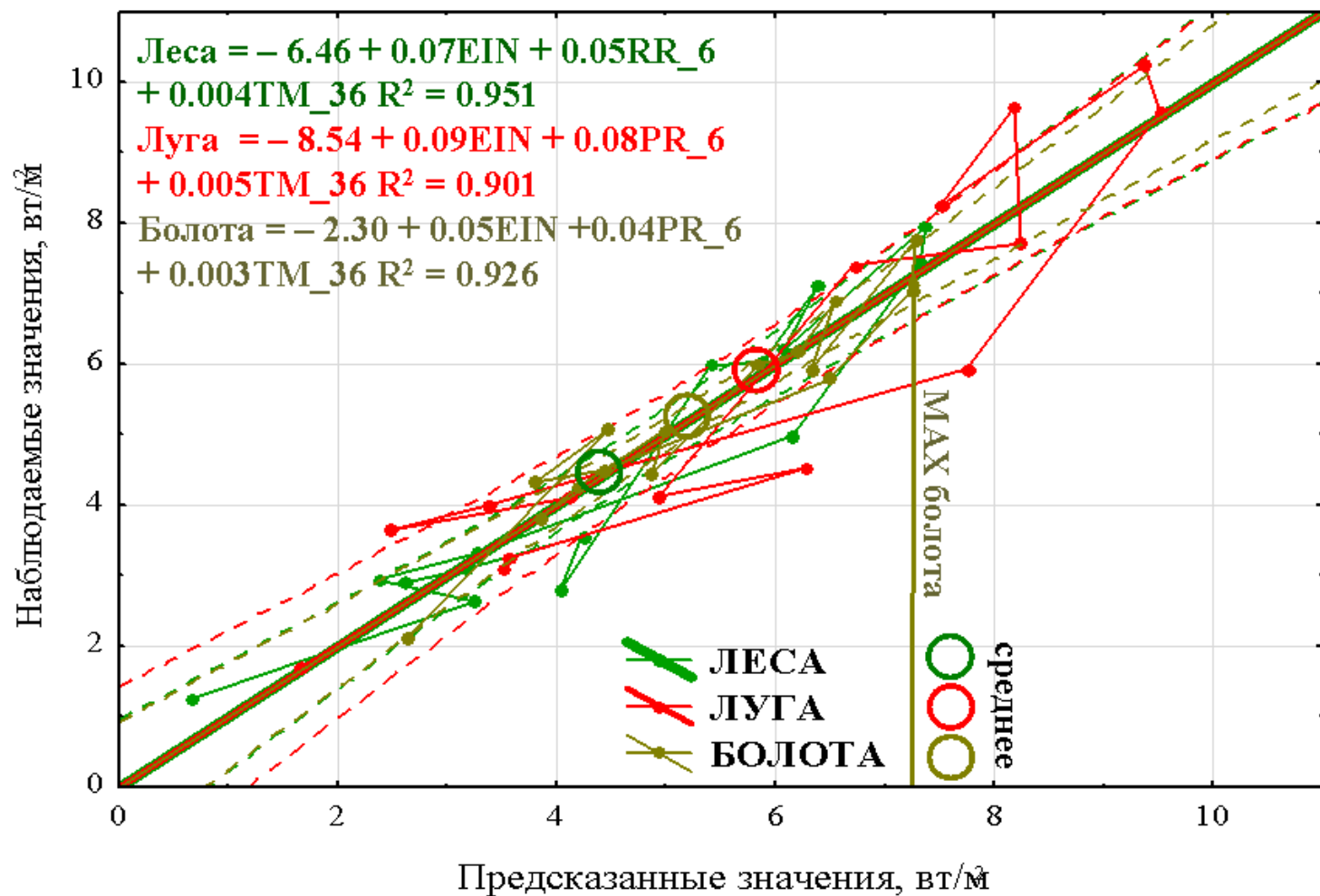
**ТЕМПЕРАТУРА ДЛЯ ВСЕХ ТИПОВ ЗАВИСИТ ОТ СООТНОШЕНИЯ
НАКОПЛЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ. БОЛОТА В ТЕЧЕНИЕ
БЕССНЕЖНОГО ПЕРИОДА ОБЛАДАЮТ НАИБОЛЬШЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ,
А ЛЕСА – НАИМЕНЬШЕЙ**

ПРИРАЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ



ПРИРАЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЛЕСОВ И ЛУГОВ ЗАВИСИТ ОТ ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И СООТНОШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ, А БОЛОТ – ТОЛЬКО ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ. БОЛОТА В БЕССНЕЖНЫЙ ПЕРИОД В СРЕДНЕМ НАИБОЛЕЕ РАВНОВЕСНЫ

ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС



ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ИНДЕКС ОДИНАКОВО ЗАВИСИТ ОТ ПЕРЕМЕННЫХ СРЕДЫ ДЛЯ ВСЕХ ТИПОВ. В СРЕДНЕМ ДЛЯ БЕССНЕЖНОГО ПЕРИОДА ЛУГА ИМЕЮТ БЕЗУСЛОВНЫЙ МАКСИМУМ, А ЛЕСА И БОЛОТА В СРЕДНЕМ НАХОДЯТСЯ НА ОДНОМ УРОВНЕ

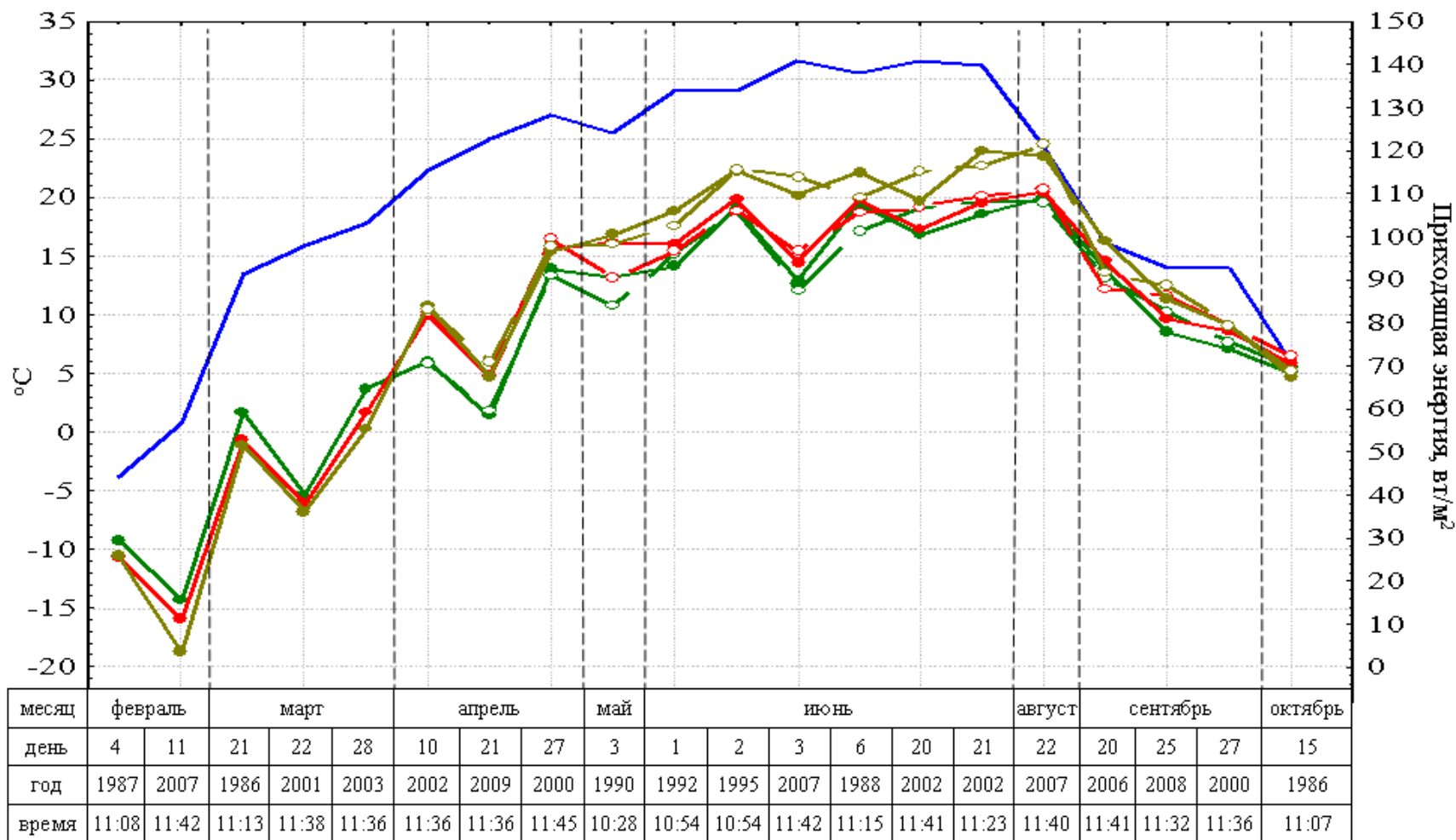
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ

Леса: максимальны – поглощение энергии и эксергия; минимальны – тепловой поток, неравновесность, продуктивность

Луга: максимальны – неравновесность и продуктивность; минимальны – поглощение энергии, и эксергия

Верховые болота: максимальны – тепловой поток связанная энергия и энтропия; минимальна – неравновесность

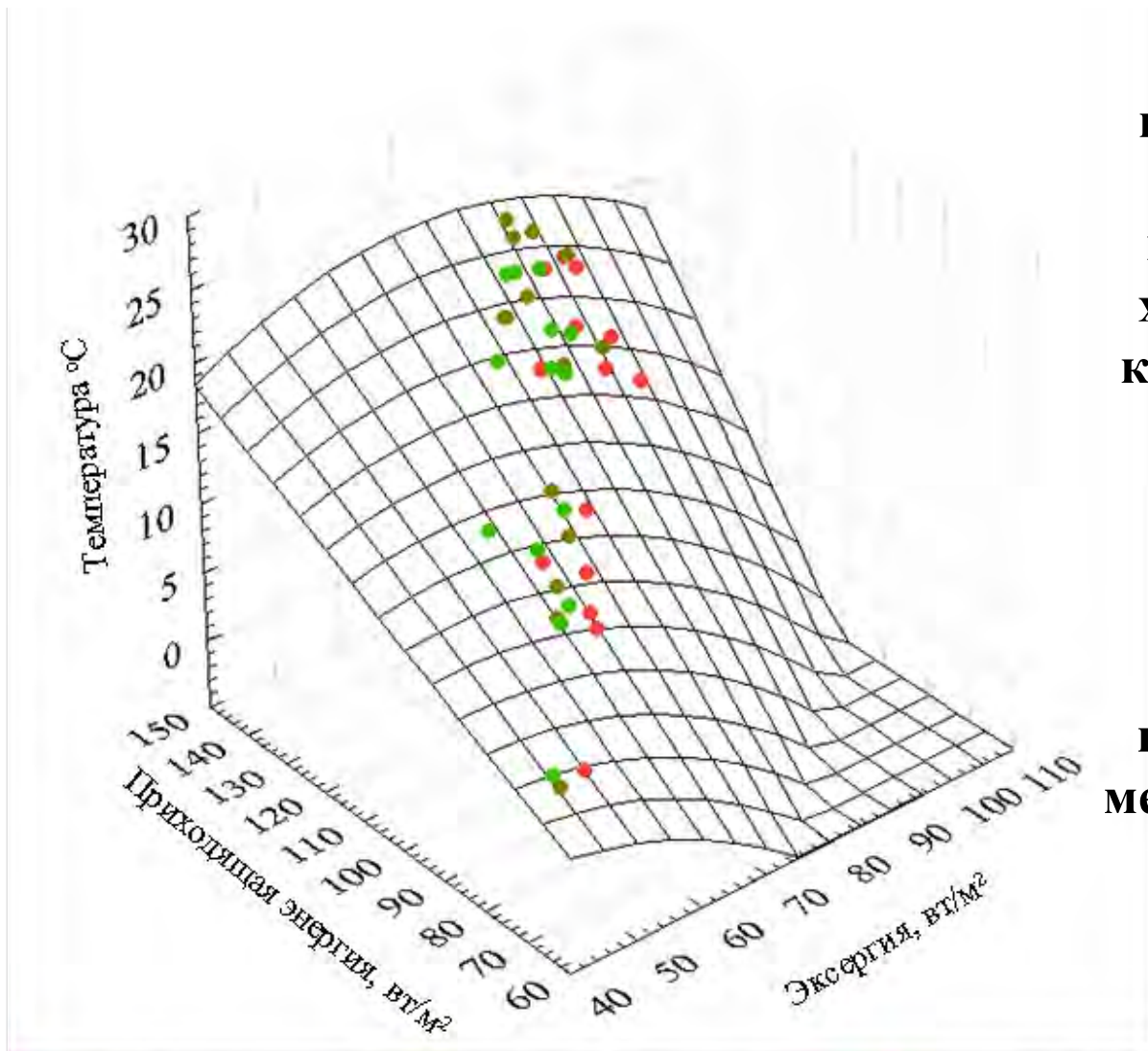
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ БИОГЕОЦЕНОЗОВ



ЛЕТОМ РАЗЛИЧИЯ В ТЕМПЕРАТУРЕ МЕЖДУ БОЛОТОМ И ЛЕСОМ ДОСТИГАЮТ НЕСКОЛЬКИХ ГРАДУСОВ

Термодинамические переменные для лесов и лугов характеризуются выраженным сезонным ходом с незначительной коррекцией на погодные условия.

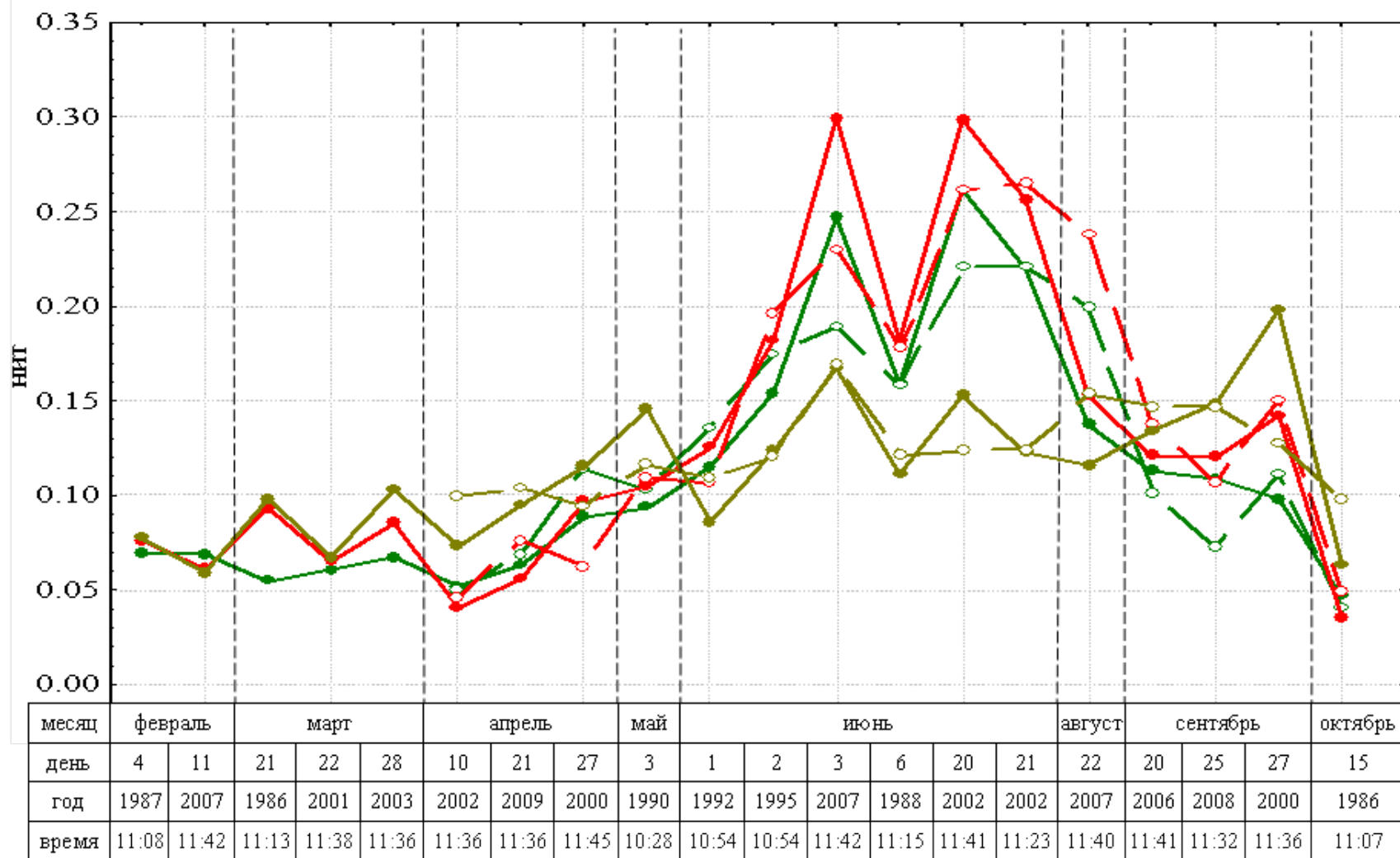
Термодинамические переменные для болот в меньшей степени зависят от сезонного варьирования прихода солнечной энергии.



● - лесные биогеоценозы, ● - верховые болота ● - луговые биогеоценозы

ЛУГА И БОЛОТА ДЕМОНСТРИРУЮТ СПОСОБНОСТЬ СНИЖАТЬ ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЮ ПРИ ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕПЛОБЕСПЕЧЕННОСТИ И НЕДОСТАТОЧНОМ УВЛАЖНЕНИИ

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПРИРАЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ БИОГЕОЦЕНОЗОВ



**В СРЕДНЕМ БОЛОТА НАИБОЛЕЕ РАВНОВЕСНЫ,
НО ТОЛЬКО НЕ ВЕСНОЙ И ОСЕНЬЮ**

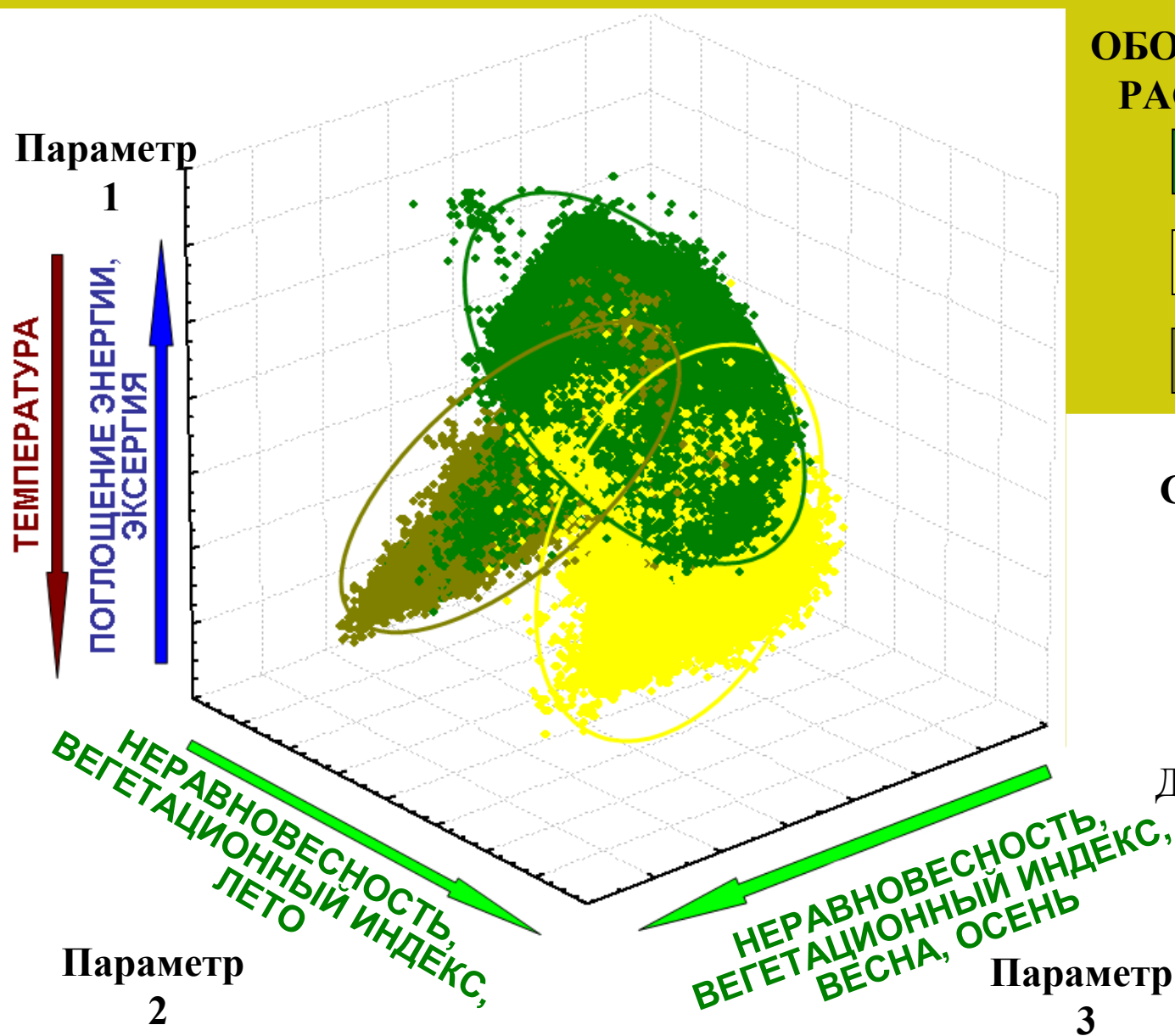
ТРИ СТРАТЕГИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ:

Леса термодинамически открыты относительно потока приходящей энергии и за счет больших затрат тепла на испарение мало чувствительны к колебаниям погодных условий во времени

Луга максимизируют приращение информации и биологическую продукцию при экономном расходовании влаги с относительно высокой чувствительностью к погоде

Верховые болота минимизируют приращение информации (максимально равновесны) и максимизируют диссипацию энергии (тепловой поток и энтропию), обеспечивая при этом экономный расход влаги и устойчивую продукцию в течение всего бесснежного периода

ПОЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ПОРЯДКА



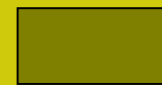
ОБОБЩЕННЫЕ ТИПЫ РАСТИТЕЛЬНОСТИ



ЛЕСА



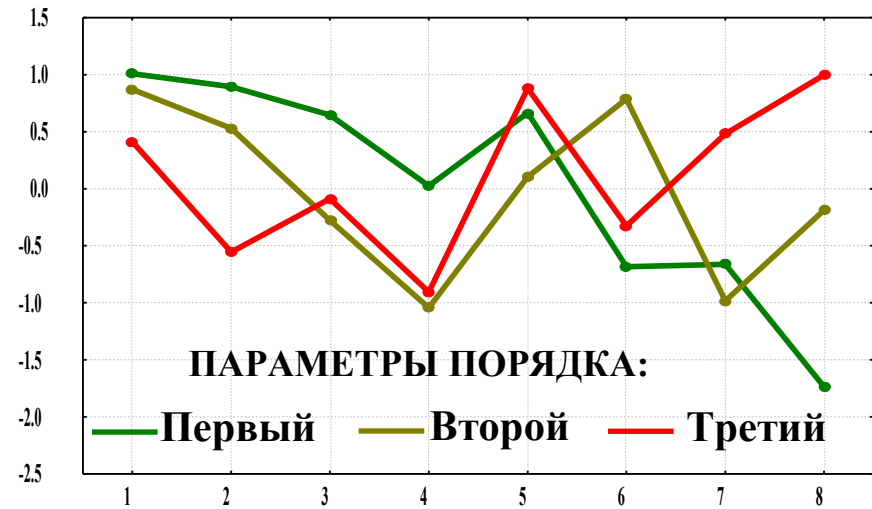
ЛУГА



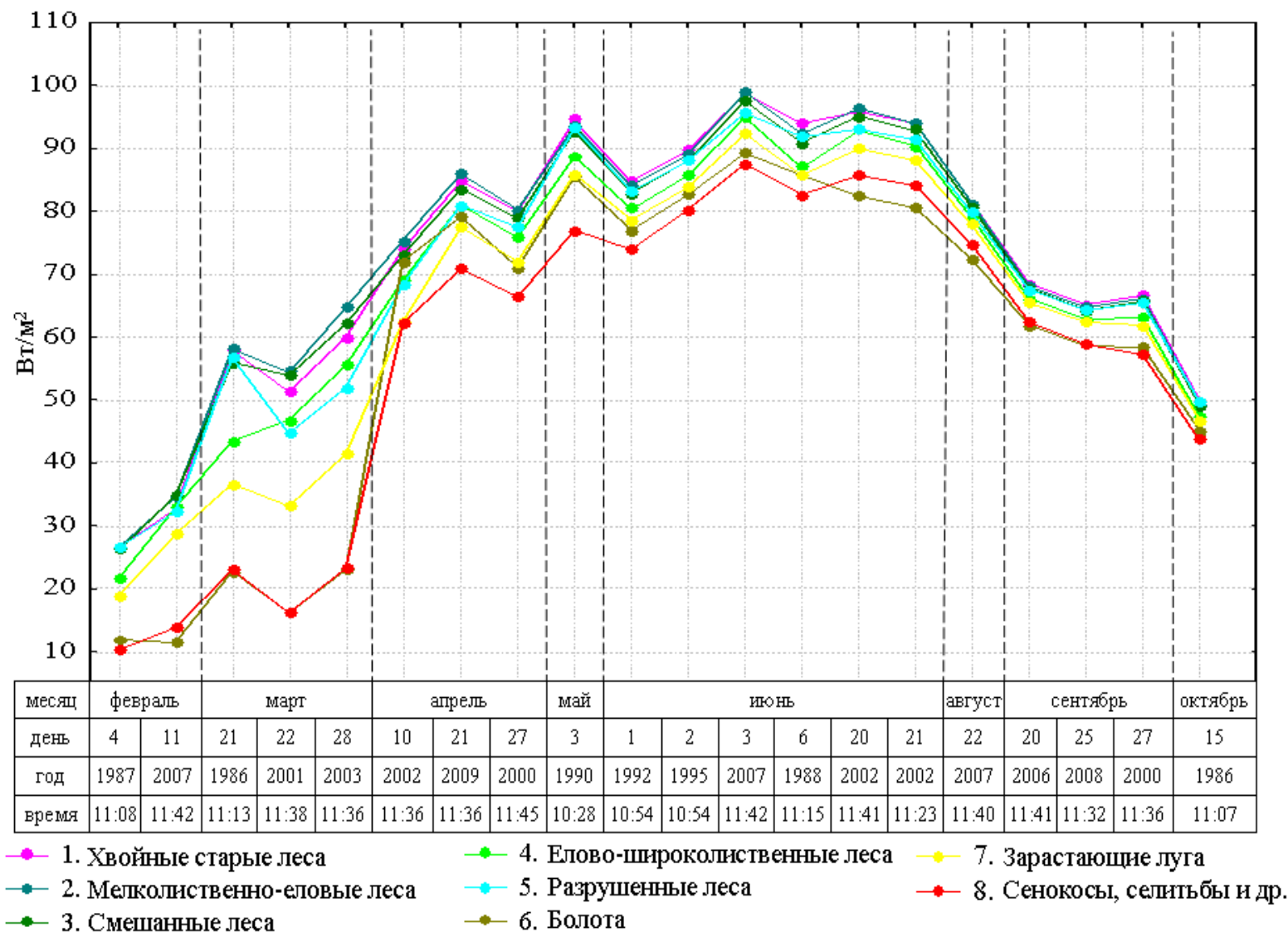
БОЛОТА

СООТНОШЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ
ПОРЯДКА
ОПРЕДЕЛЯЮТ
СТЕПЕНЬ
ДИСКРЕТНОСТИ
ГРАНИЦ

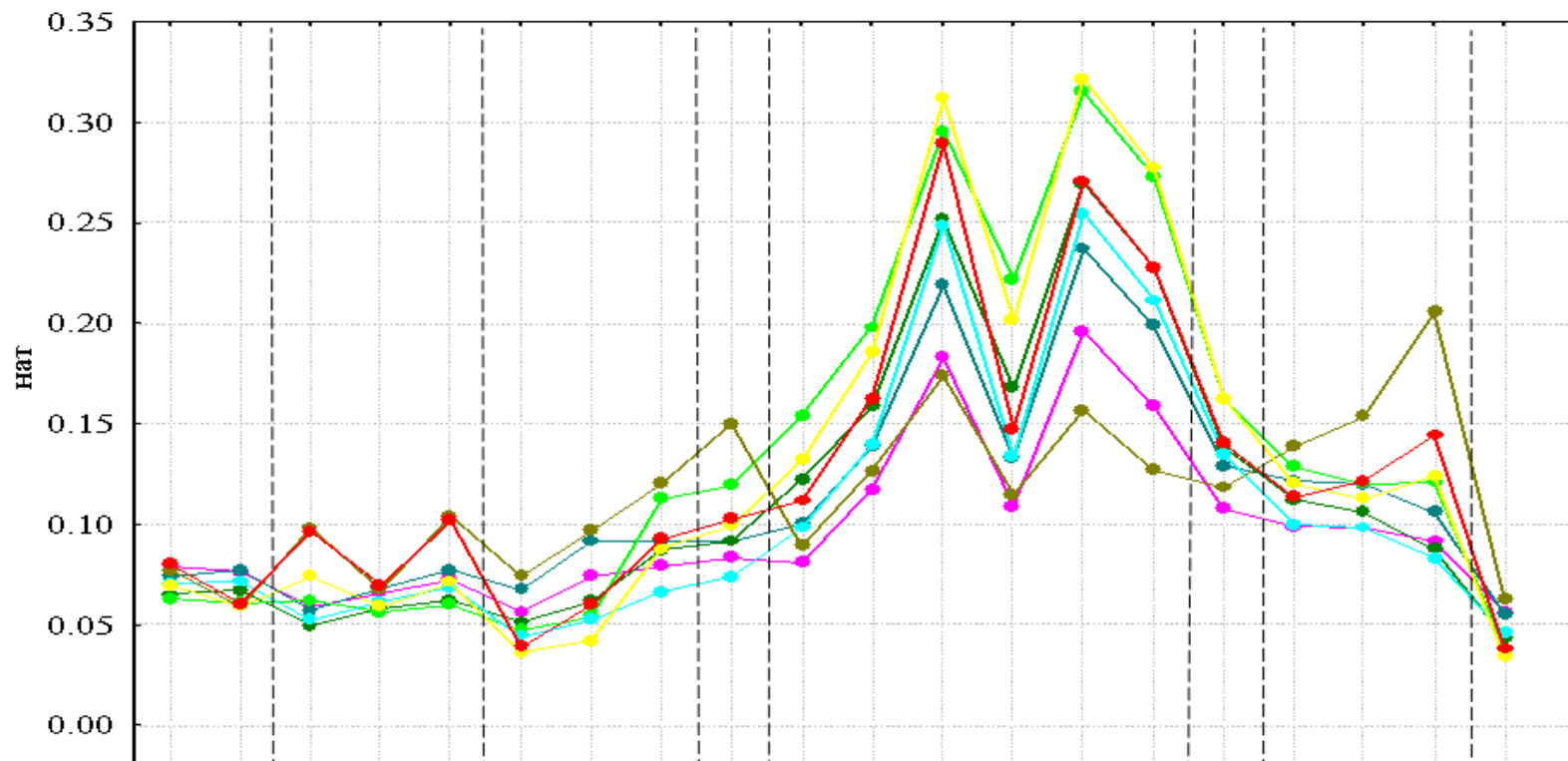
КЛАССЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЮЖНО-ТАЕЖНОГО ЛАНДШАФТА



СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭКСЕРГИИ В КЛАССАХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПРИРАЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В КЛАССАХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



месяц	февраль		март			апрель			май	июнь						август	сентябрь			октябрь
день	4	11	21	22	28	10	21	27	3	1	2	3	6	20	21	22	20	25	27	15
год	1987	2007	1986	2001	2003	2002	2009	2000	1990	1992	1995	2007	1988	2002	2002	2007	2006	2008	2000	1986
время	11:08	11:42	11:13	11:38	11:36	11:36	11:36	11:45	10:28	10:54	10:54	11:42	11:15	11:41	11:23	11:40	11:41	11:32	11:36	11:07

- 1. Хвойные старые леса
 —●— 4. Елово-широколиственные леса
 —●— 7. Зарастающие луга
- 2. Мелколиственно-еловые леса
 —●— 5. Разрушенные леса
 —●— 8. Сенокосы, селитбы и др.
- 3. Смешанные леса
 —●— 6. Болота

Бореальные сообщества – рост затрат на эвапотранспирацию.
Неморальные – рост неравновесности и продуктивности.

ВЫВОДЫ

Анализ пространственно-временного варьирования термодинамических переменных в зависимости от «погодных условий» позволил выявить три типа термодинамических систем с принципиально различными стратегиями использования солнечной энергии:

- лесные сообщества максимизирующие поглощение солнечной энергии и ее затраты на эвапотранспирацию;**
- луговые сообщества максимизирующие неравновесность и биологическую продуктивность в течение бесснежного периода;**
- верховые болота за счет быстрой реакции на изменение режима увлажнения и теплообеспеченности в переходные периоды максимизирующие неравновесность и производство биологической продукции, поддерживая их на постоянном уровне в течение всего бесснежного периода.**

ВЫВОДЫ

Анализ сезонного хода термодинамических переменных их зависимости от метеорологических параметров, а так же полученные для переменных параметры порядка показывают наличие двух подсистем в преобразовании солнечной энергии:

- подсистема, отвечающая за поглощение приходящей солнечной энергии, затраты энергии на эвапотранспирацию и преобразование ее в тепловой поток, в которой растительность выполняет функцию «насоса», обеспечивая круговорот влаги между почвой и атмосферой, и зависящая главным образом от количества приходящей солнечной энергии;**
- подсистема, определяющая спектральную структуру поглощения солнечной энергии – энтропию, приращение информации и связанную с ней биологическую продуктивность, работа которой в большей степени зависит от собственного состояния растительного покрова и погодных условий.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показаны, по крайней мере, три стратегии функционирования растительного покрова, обеспечивающих их пространственно-временную устойчивость. Следовательно максимизация свободной энергии (эксергии) не может рассматриваться как общая цель эволюции биогеоценотической системы. Эта гипотеза справедлива только для лесных сообществ в коротком экологическом времени (естественное замещение лиственных хвойными). Луга – максимизируют биологическую продуктивность (полезная работа биохимической системы) при экономном использовании влаги. Верховые болота не зависят от сезонного состояния растительности и, за счет лабильности своей структуры быстрее адаптируются к изменениям погодных условий, обеспечивая практически постоянный в течение бесснежного периода уровень неравновесности и биологической продуктивности

ОБСУЖДЕНИЕ

Адаптация растительности к условиям среды осуществляется тремя различными способами, и в конкретных климатических условиях различные типы растительности реализуют различные стратегии.

Сопоставление времени возникновения и распространения, доминирующих в исследованных сообществах жизненных форм в эволюционном масштабе времени показало, что термодинамическая система изменяется в направлении увеличения биологической продуктивности и экономии влаги, что прямо противоречит гипотезе максимизации эксергии.

Однако увеличение биологической продуктивности, необходимое для воспроизводства живого вещества так же является максимизацией свободной энергии и, соответственно, полезной работы системы. Эта максимизация осуществляется при повышении эффективности использования влаги и увеличении внутренней энергии, которая связывается с накоплением гумуса и торфа, повышающих влагоемкость среды. Можно полагать, что изменения палеоклимата стимулируют эволюцию термодинамической системы растительного покрова, которая повышая разнообразие своих состояний, максимизирует устойчивость биологической продуктивности при существующих климатических условиях.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

