

Украина

Национальная академия наук



Центр аэрокосмических исследований Земли

В.И. Лялько

**Прогнозирование
взаимосвязанных
климатических и
социо-экономических
процессов:
взгляд из космоса**

2005



Для оперативного и экономического решения указанной задачи необходимо:

- **создание компьютерных моделей энергомассообмена в системе «поверхность Земли-атмосфера»**
- **выявление изменений растительного покрова по материалам разновременных мультиспектральных спутниковых съемок**
- **массовые экспериментальные определения потоков CO_2 в системе «растительность-атмосфера» и за счет сжигания органического топлива**
- **компьютерное прогнозирование глобальных и региональных изменений климата на основе созданных моделей энергомассообмена, полученных материалов ДЗЗ по изменению во времени площадей и состава растительных сообществ и определений потоков CO_2 для разных видов растительности и различных источников сжигания органического топлива**
- **прогнозирование социо-экономических процессов на Земле для различных сценариев прогнозирования изменений климата**



Предложена модель прогнозирования изменений глобального климата Земли с тремя переменными: температура околоземного слоя атмосферы, влагозапас суши и речной сток в Мировой океан. Эта модель состоит соответственно из трех нелинейных уравнений: двух уравнений динамики теплового и водного баланса Земли, а также уравнения динамики глобального речного стока в Мировой океан:

$$c \frac{dT}{dt} = Q[1 - \alpha(T, X)] - I(T),$$

$$\frac{dX}{dt} = P(T) - E(X, T) - Y,$$

$$\frac{dY}{dt} = G(X) - \frac{Y}{k(X)},$$



где T , X , Y – соответственно глобальная температура воздуха, влагозапас континентов и речной поток в океан; Q , $I(T)$, $\alpha(T, X)$ – солнечная постоянная, количество вытекающей тепловой радиации с верхней границы атмосферы и планетарное альbedo Земли; c – теплоемкость системы «атмосфера-активный слой поверхности»; $P(T)$, $E(X, T)$ – осадки и величина испарения с поверхности континентов; $G(X)$, $k(X)$ – соответственно эффективное ускорение силы веса и характерное время речного стока. В модели используются предположения о стабильности количества воды на Земле, что позволяет исключить водный баланс океана



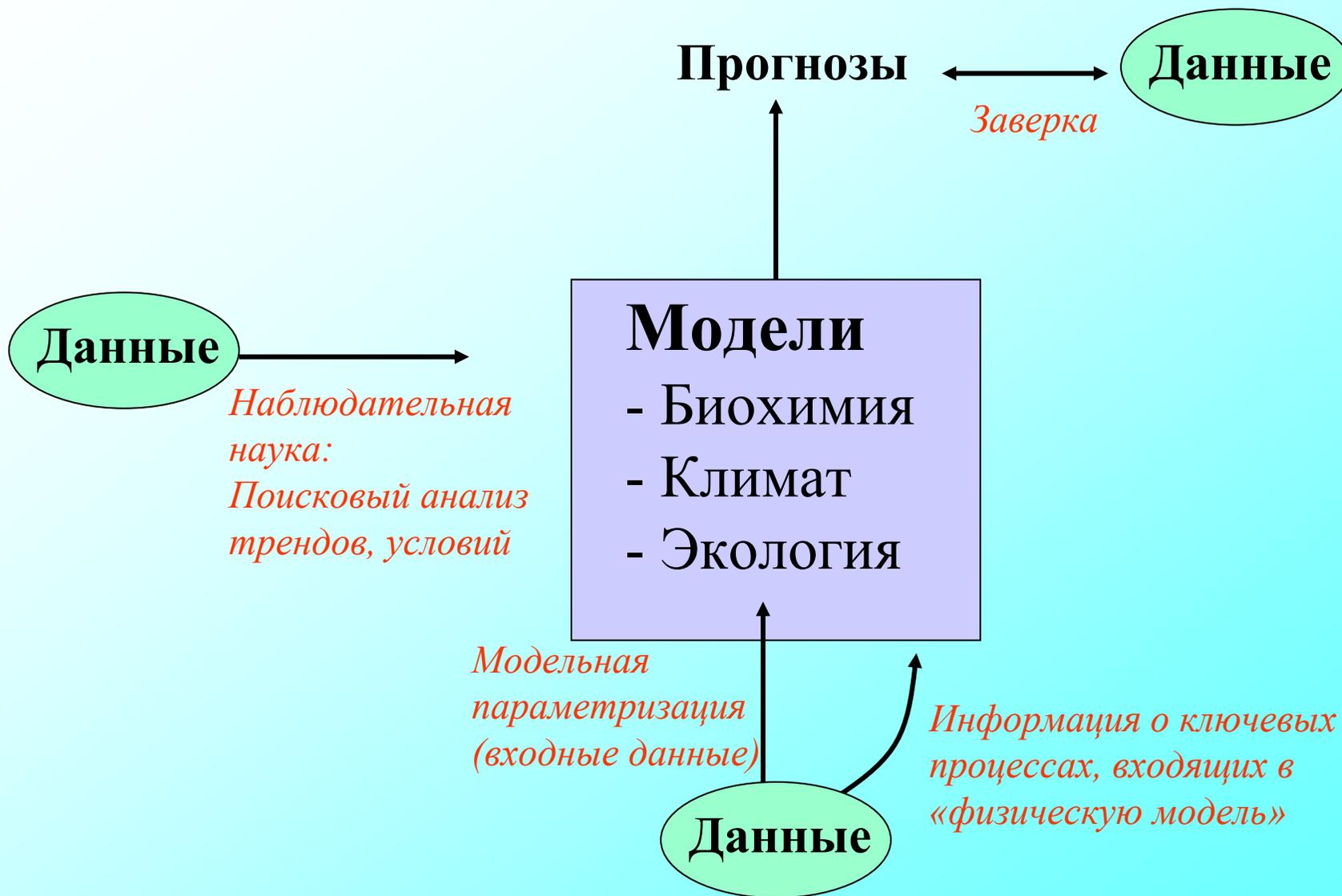
Главные компоненты

системы аэрокосмического мониторинга





Роль данных





Роль дистанционного зондирования

- **Дистанционное зондирование может обеспечить постоянные, с географической привязкой регулярные продукты для частных геофизических параметров**
- **Дистанционное зондирование может “увеличивать масштаб” (и интерполировать) данные с наблюдательных станций**
- **Дистанционные данные могут калиброваться и заверяться с помощью данных, полученных *in situ***



Важнейшие спутниковые технологии

Спутник/сенсор	Разрешение, м	Временной интервал	Спектральные диапазоны	Задачи/параметры
SPOT-5 / HRG, HRS	2.5-10.0	2002 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, изменения
SPOT-5 / Vegetation-2	1.15-1.7km	2002 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, изменения
Landsat / MSS, TM, ETM+	30-80	1972 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, изменения
Terra / ASTER	30	2000 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, температура поверхности
Ресурс-01 / МСУ-Э	30	1994 -	Видимый-БИК	Земные покровы, изменения
IRS / LISS	25	1988 -	Видимый-БИК	Земные покровы, изменения
NOAA / AVHRR	1100	1978 -	Видимый-БИК-ТИК	Планетарная растительность, температура поверхности, облачность
Terra, Aqua / MODIS	250-1000	2000 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Планетарная растительность, продуктивность, температура поверхности, водяной пар, облака, аэрозоль
Terra / MISR	275	2000 -	Видимый-БИК	Многоугольная съёмка растительности, облака, аэрозоль
Ресурс-01 / МСУ-СК	150	1994 -	Видимый-БИК-ТИК	Планетарная растительность, температура поверхности
ICESAT / GLAS	70	2003 -	Видимый-БИК Лидар	Структура растительности
SRTM	30-90	2000 -	Радар	Планетарная топография
EO-1 / Hyperion	30	2000 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, изменения
ENVISAT-1 / ASAR + 9 p.l.	30	2002 -	Радар	Планетарная топография
Сич-1М	27	2004 -	Видимый-БИК-СИК-ТИК	Земные покровы, изменения



Необходимые данные

Специальные данные, включенные в научный план

- **Углерод и биогеохимия:**
 - состав/структура растительности (земные покровы, лиственный индекс, биомасса ...)
 - динамика изменения растительности (влияние различных воздействий, фенология, ...)
 - биохимия растительности (потоки CO_2 , накопления азота, fAPAR ...)
 - почвы (тип почвы, органическое вещество, ...)
 - гидрология (поверхностный сток, отвод углерода, эвапотранспирация леса, ...)
 - состояние экосистемы (замещение исконной растительности, фрагментация ...)



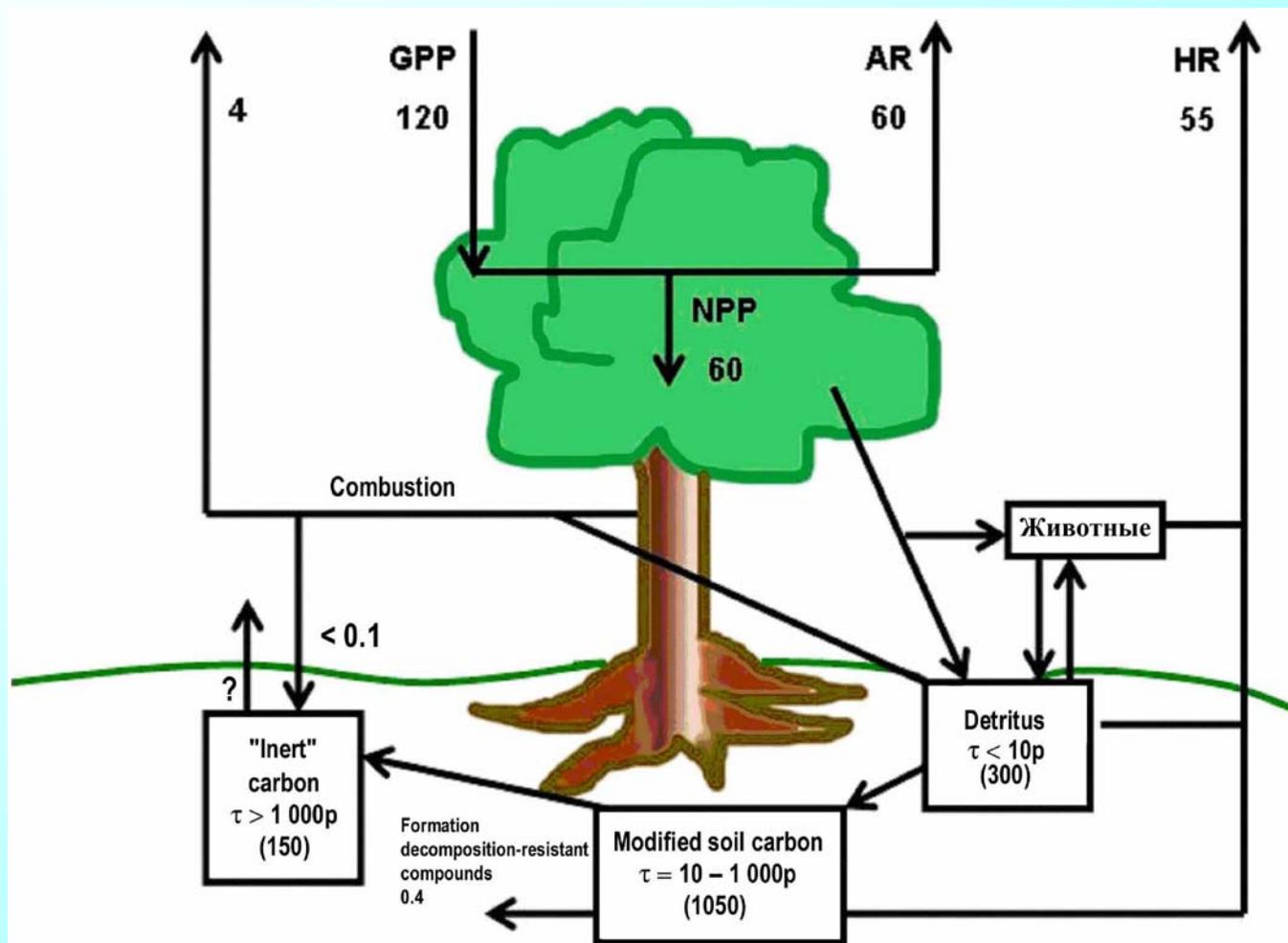
Необходимые данные

Специальные данные, включенные в научный план

- **Кругооборот воды и энергии:**
 - энергобаланс (альбедо, $T_{\text{воздуха}}$, $T_{\text{поверхности}}$, ветра, облака...)
 - водный баланс (влажность, ЭТ потоки, атмосферные осадки, влажность почвы ...)
 - динамика атмосферы (давление, кругооборот, аэрозоль, ...)



Кругооборот углерода на Земле





Процессы формирования избыточного количества CO_2 в атмосфере, приводящие к «парниковому эффекту»:

- **техногенные (антропогенные), связанные с выделением CO_2 при сжигании всех типов органического ископаемого топлива**
- **природно-техногенные, связанные с изменением интенсивности процессов фотосинтеза и обусловленного ими потребления углекислого газа из атмосферы при изменении площадей и видового состава растительного покрова (в первую очередь тропических и бореальных лесов)**



Экспериментальные определения потоков CO_2 для разных видов растительности, в различных ландшафтно-климатических условиях выполняются в рамках международных программ FLUXNET, EUROFLUX и др.

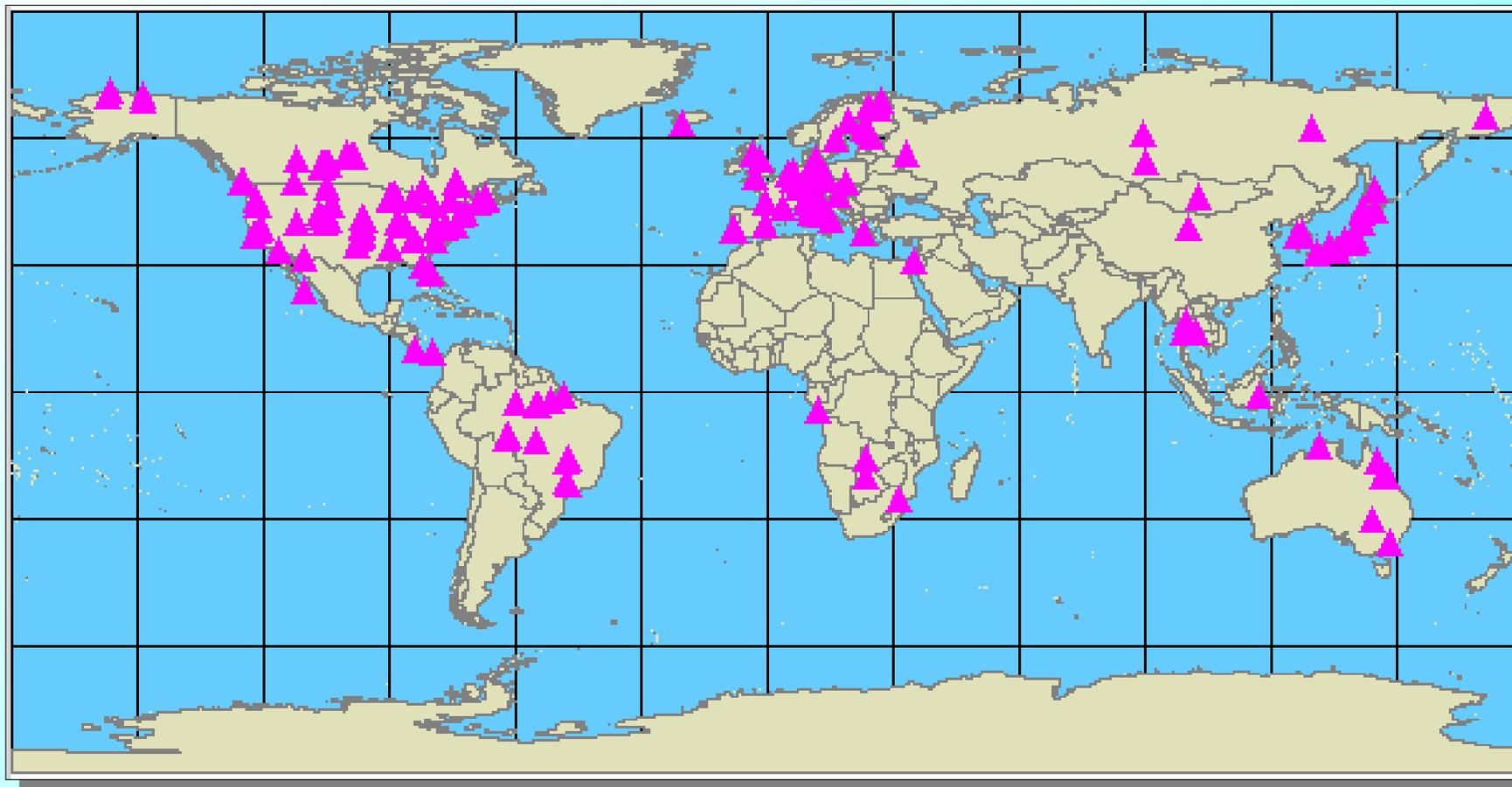


Что следует предпринять

- **Мониторинг заболоченных земель и биомассы с помощью активного радиолокационного зондирования (SAR)**
- **Охватить съёмкой с помощью КА Landsat Европу и Северную Азию**
- **Данные инвентаризации лесов Европы и Северной Азии (необходимо распространять эту информацию либо в сыром, либо в укрупнённом виде)**
- **Обмен данными по измерениям CO₂ и водяного пара, получаемым с помощью сети наблюдательных вышек для замеров различных потоков**
- **Базы данных социо-экономического характера**



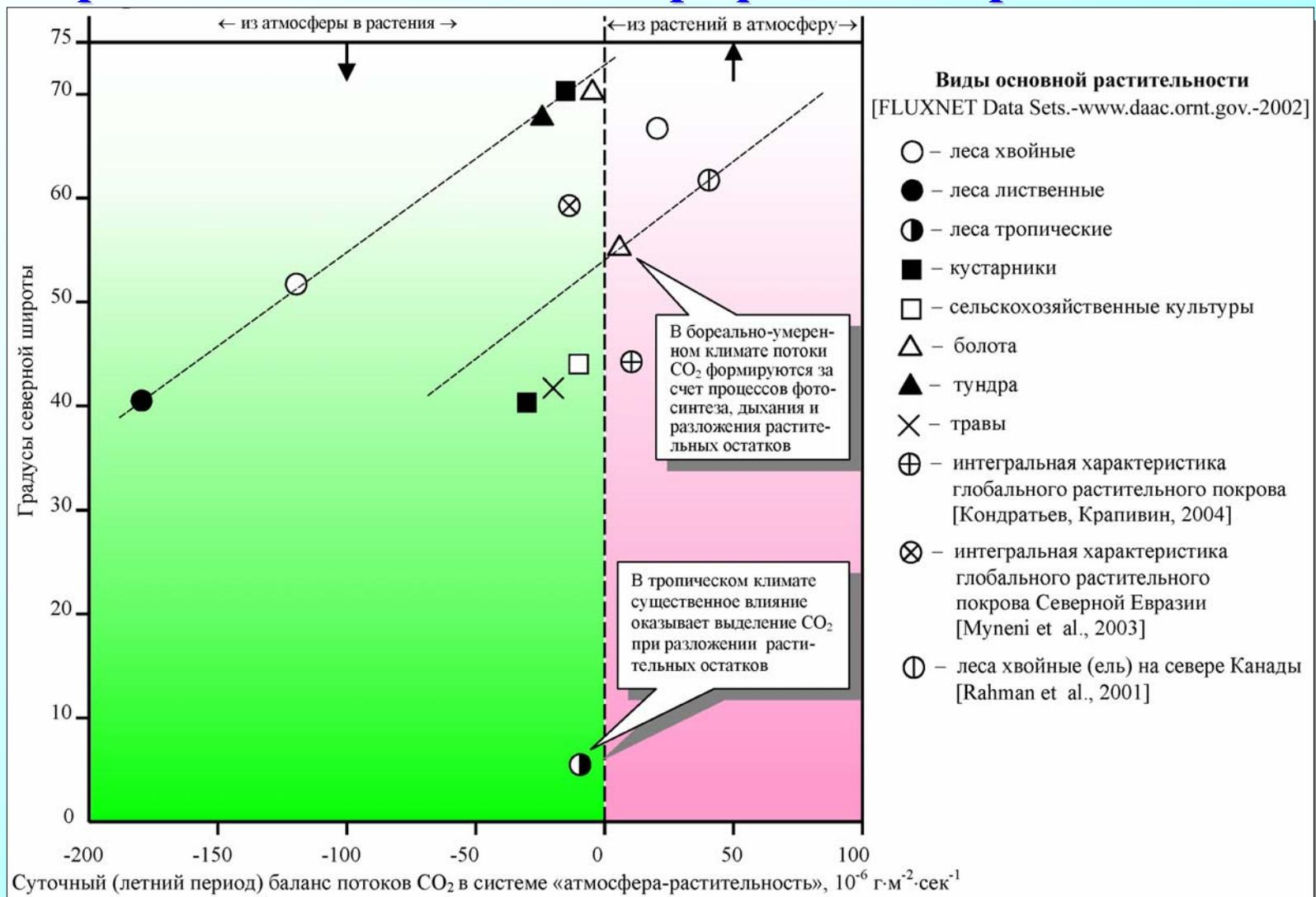
Карта современной сети наблюдательных вышек для измерения различных потоков





Баланс

потоков CO_2 в системе «атмосфера-растительность» в зависимости от вида растительности и ее географического размещения





В зависимости от «северности» района (смотри предыдущий Слайд) уменьшается балансовая не только величина, но и направленность дневного (фотосинтез) и ночного (дыхание растений) потоков CO_2 в системе «атмосфера-растительность». При этом в высоких широтах эта величина может быть положительной, т.е. балансовый (за сутки) поток углекислого газа начинает ежегодно пополнять атмосферу, становясь постоянной причиной усиления «парникового эффекта»



Исследования изменений видового состава лесов Центральной Сибири за период 1977-2003 гг.

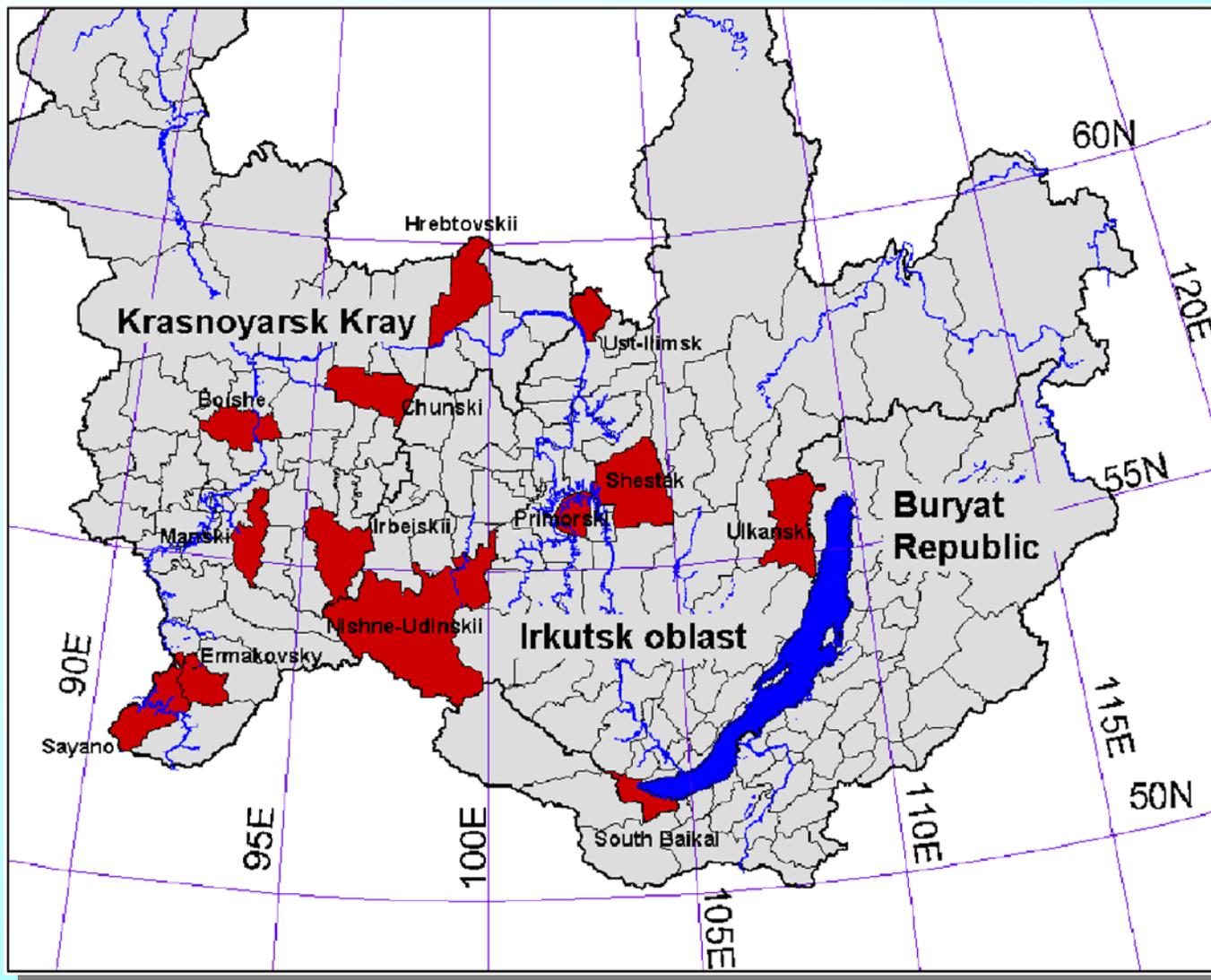
(CASRE NAS Ukraine and IIASA, Austria; Lyalko V.I. et al., 2004)

- **Использовались разновременные космические снимки Landsat**
- **Исследования были проведены в пределах опытных полигонов Усть-Илимский и Большое**



Территория исследований в пределах Центральной Сибири

(красным цветом показаны основные полигоны
с тестовыми участками)



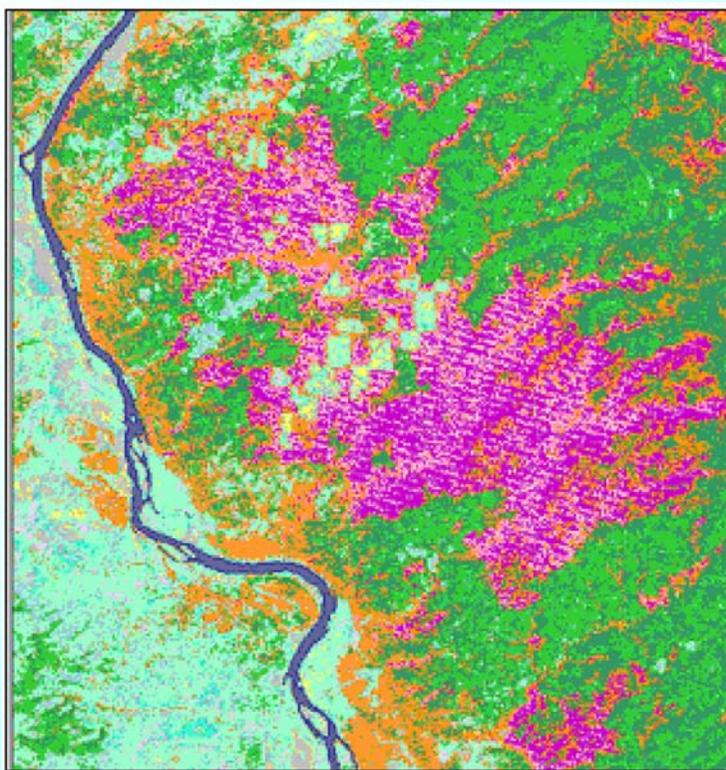


Изменение распространения разных видов растительных сообществ на полигоне Большое

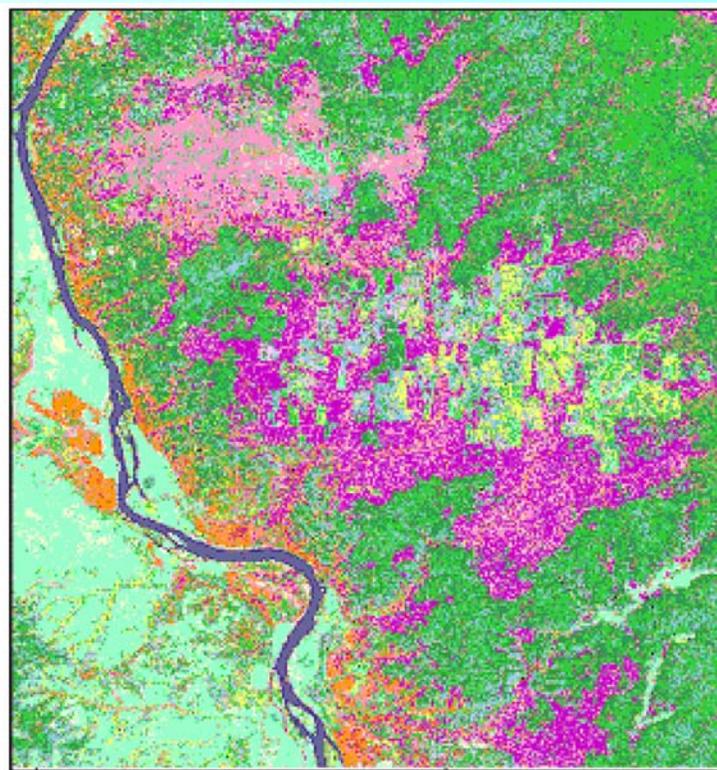
№	Выделенные растительные группировки	Landsat MSS от 21.06.1977 г.		Landsat-7 от 22.06.2000 г.		Изменение площадей видов растительности	
		Площадь, кв. км.	%	Площадь, кв. км.	%	Площадь, кв. км.	±%
1.	Хвойные леса (молодые, до 30 лет)	2330	25	1904	20	-426	-5
2.	Хвойные леса (старше 30 лет)	2070	22	1704	18	-366	-4
3.	Лиственные леса (молодые, до 30 лет)	875	9	2067	22	+1192	+13
4.	Лиственные леса (старше 30 лет)	1183	12	2196	23	+1013	+11
5.	Не лесные земли (вырубки, луга, болота, агрофитоценозы, кусты и редколесье, дороги, населенные пункты)	2919	31	1292	14	-1627	-17
6.	Водная поверхность	79,0	1	80	1	+1	0
7.	Облака, тени от облаков	-	0	213	2	+213	+2
	Интегральные показатели	9456	100	9456	100	0	0



**Вырубки в пределах лесного массива
темнохвойных лесов по классифицированным
снимкам Landsat MSS, 21.06.1977 (А) и Landsat-7,
22.06.2000 (Б) в пределах полигона Большое**



А



Б



Условные обозначения

Название объединенного класса

	– леса с преимуществом сосны, спелые, плотные
	– леса с преимуществом сосны, зрелые, разреженные
	– леса с преимуществом сосны, молодые, плотные
	– леса с преимуществом лиственницы, спелые, плотные
	– леса с преимуществом лиственницы, зрелые, разреженные
	– леса с преимуществом ели, спелые, плотные
	– леса с преимуществом ели, зрелые, плотные
	– леса с преимуществом пихты, зрелые, разреженные
	– леса с преимуществом пихты, спелые, разреженные
	– леса с преимуществом кедра, спелые, разреженные
	– леса с преимуществом лиственных пород деревьев (осины, березы) спелые, плотные
	– леса с преимуществом лиственных пород деревьев (осины, березы) молодые, плотные
	– болота
	– пожарища
	– отслоение пород
	– водная поверхность
	– сельхозугодья
	– вырубки
	– снежный покров
	– ледники
	– облака



Регенерация Сибирской сосны под покровом лиственницы





Экспериментальные работы по изучению потоков CO_2 в Сибири, показали, что на протяжении периода вегетации (май-сентябрь) в местах, где первичные хвойные леса замещены лиственными и болотно-тундровой растительностью, обнаружены превышения выделений CO_2 в атмосферу над его поглощением растениями в количестве до $+184 \text{ гС/м}^2$ [Shimoyma K., 2000] Это является одной из составляющих, которые способствуют глобальному потеплению совместно с выделением CO_2 и CH_4 на участках таяния вечной мерзлоты и выделения углерода и углекислого газа при лесных пожарах



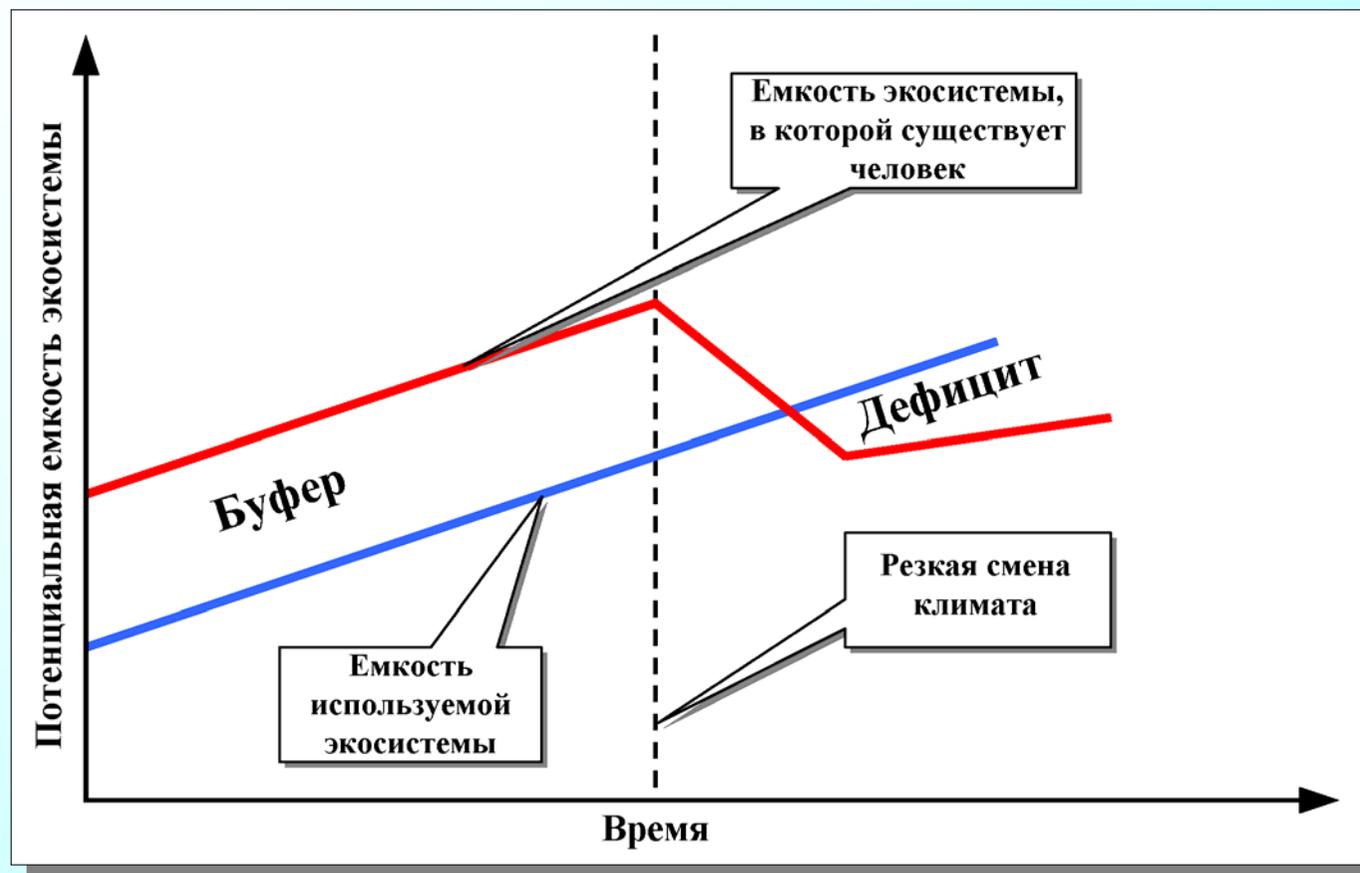
Суммарный эффект повышения температуры атмосферы, обусловленный поступлением в нее CO₂ техногенного и природно-техногенного происхождения, может быть определен по упрощенной зависимости [Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., 2004]:

$$\Delta T_{\text{CO}_2} = -0,677 + 3,019 \ln \frac{C_a(t)}{C_a(t_0)},$$

где t – время (год прогнозирования), а величина t_0 соответствует 1980 году, когда концентрация углекислого газа (C_a) в атмосфере считается равной 345 ppmV



Уменьшение потенциальной ёмкости экосистемы



На графике показано как разрыв, вызванный изменением климата, может спровоцировать уменьшение ёмкости экосистемы ниже предела её использования, что повлечёт за собой дефицит природных ресурсов, уменьшение населения посредством войн, болезней и голода



Последствия

глобального изменения климата





Упрощённая схема погоды согласно предлагаемому сценарию





Климат Украины

Характеристика	Температура воздуха	Осадки
Современное состояние	Динамика изменения климата за 100 лет (1901-2000) аналогична изменениям глобального климата	
	Средняя температура выросла на 0.6°C, в Полесье – на 0.8°C, в степи – на 0.3°C. Наблюдаются теплые зимы и весны и холодные лето и осень	Среднее количество осадков в Украине ~ 600 мм/год, что на 30% меньше среднего уровня осадков для этого широтного пояса. За прошедшие 100 лет климатическая норма осадков почти не изменилась. Произошло незначительное перераспределение осадков по площади: их суммы уменьшались (на ~20 мм/год) на западе, юго-востоке и в Крыму, увеличились (на ~10мм/год) на юго-западе и в центре. Уменьшились амплитуды колебаний падений (сезонных и годовых).
Тенденции изменений	Повышение региональной температуры может превышать глобальное повышение в 1.3 раза. Уменьшается разница температуры между сезонами года (идет процесс деконтинентизации)	В последние годы наблюдается увеличение осадков на 70 - 100 мм/год (больше нормы на 20%). Потепление климата Украины сопровождается увеличением частоты значительных осадков (>20 мм/сутки), что может вести к подтоплениям и сдвигам
Прогнозирование	Для следующих 100 лет прогнозирование температуры можно осуществить по аналогии с температурным режимом, который имел место в Украине в эпоху оптимума голоцена (5.3 - 6.2 тыс. лет тому назад), когда прирост температуры воздуха составлял более 1°C. Можно также подобный прогноз выполнить по формуле [Кондратьев, Крапивин, 2004], получив при этом значение прироста температуры воздуха около 2.5°C	Глобальное потепление (до 1 - 2°C) является благоприятным для экономики Украины, т. к. оно выравнивает распределение атмосферных осадков на её территории: повышая их количество на 10 - 15% в засушливых юго-восточных регионах и понижая на 5 - 10 % в увлажненных северо-западных регионах
Меры по оптимизации климатических условий	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уменьшение выбросов парниковых газов в атмосферу (в соответствии с Киотским протоколом) за счет перевода промышленности на использование неорганических видов энергии. 2. Масштабное (глобальное) проведение мер по разведению и рациональному использованию лесных массивов, как главного потребителя углекислого газа из атмосферы 	

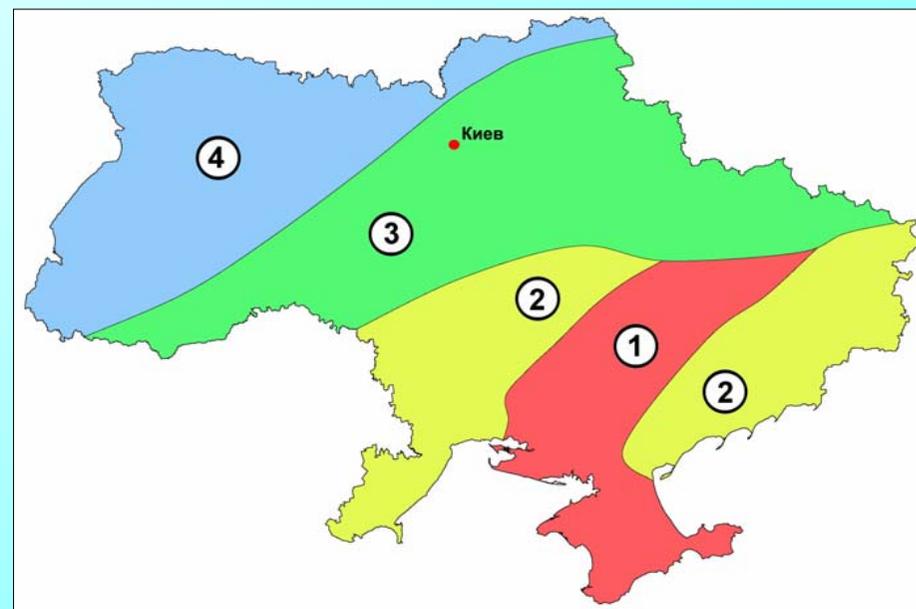
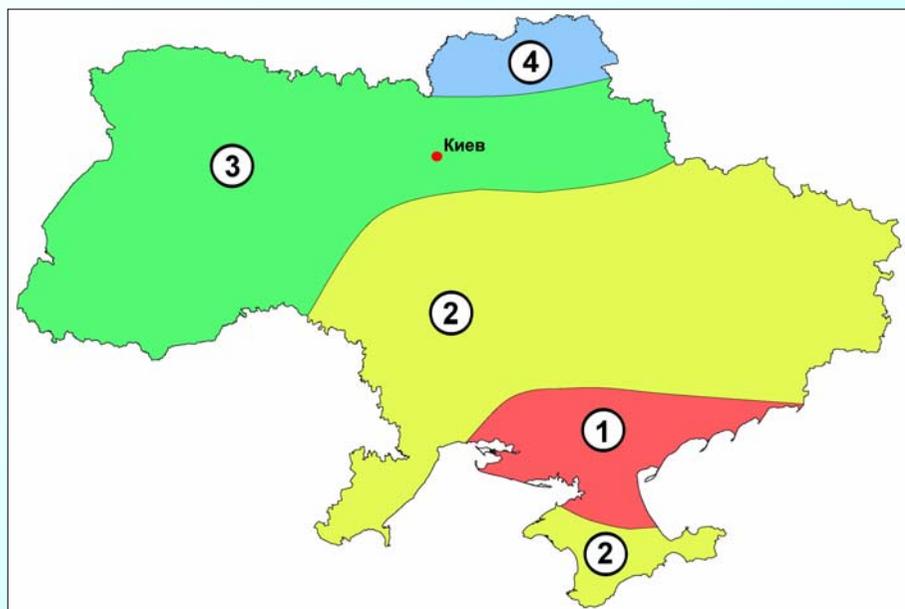


Трансформация природных зон на территории Украины при дальнейшем глобальном потеплении ~ на 2050 год

[С.Г. Бойченко, 2005]

а

б



Прогнозируемое потепление: а – 1.0°-1.5°С; б – 2.0°-2.5°С

Условные обозначения

1 – полупустыня; 2 – степь; 3 – лесостепь; 4 – лес



Ориентировочный прогноз повышения температуры до 2050 года может составить для Украины $\approx 2,5^{\circ}$ С



- **Региональные тенденции изменения природных условий Украины вследствие подобного потепления (увеличение суммы осадков на юге территории и уменьшение в Полесье, уменьшение амплитуды приземной температуры и др.) будут, в основном, благоприятными для экономики (выработки продовольствия и др.) Украины и комфортности жизни ее населения [Волощук В.М. и др.,2002]**



- **Предварительные оценки свидетельствуют о том, что эффект потепления климата в полярных регионах может быть в два-три раза сильнее, чем в тропиках, а зона опустынивания в Европейской части может достичь южных границ бывшего СССР**



- **Возрастающая при подобном сценарии климатических изменений комфортность проживания населения в полосе 45-55 градусов СШ (при возможном ухудшении климатических условий севернее и южнее этих границ) может привести к усилению человеческих миграционных потоков в зону комфорта и обострения социально-экономических отношений между странами**



- **Поэтому результатом подобных климатических прогнозов должны быть также и социо-экономические предвидения, и рекомендации по функционированию национальных экономик в условиях возможного понижения (или повышения) агротехнической производительности и интенсификации несанкционированных межгосударственных миграционных потоков населения**



Прогнозирование социо-экономических процессов, обусловленных изменением климата

Уравнение для синтетического индекса развития (СИР):

$$\text{СИР} = \alpha \text{Э} + \beta(\text{СР}) + \gamma(\text{УДК}) + \lambda(\text{УВК}) + \eta \text{Р},$$

где **СИР** – синтетический индекс развития, включающий в себя удельное (в расчете на 1 человека) производство капитала: физического (ПФК) или (ВНП – валовой национальный продукт), человеческого (ПЧК) и экологического (ПЭК), $\text{СИР} = \text{ПФК (или ВНП)} + \text{ПЧК} + \text{ПЭК}$. Физический и человеческий капитал производятся социумом, а экономический – биотой. **Э** – удельное энергопотребление; **СР** – удельные социальные расходы страны; **УДК** – удельный духовный капитал (приобретается человеком в процессе его жизни); **УВК** – удельный жизненный капитал («запас устойчивости», который человек имеет с рождения);



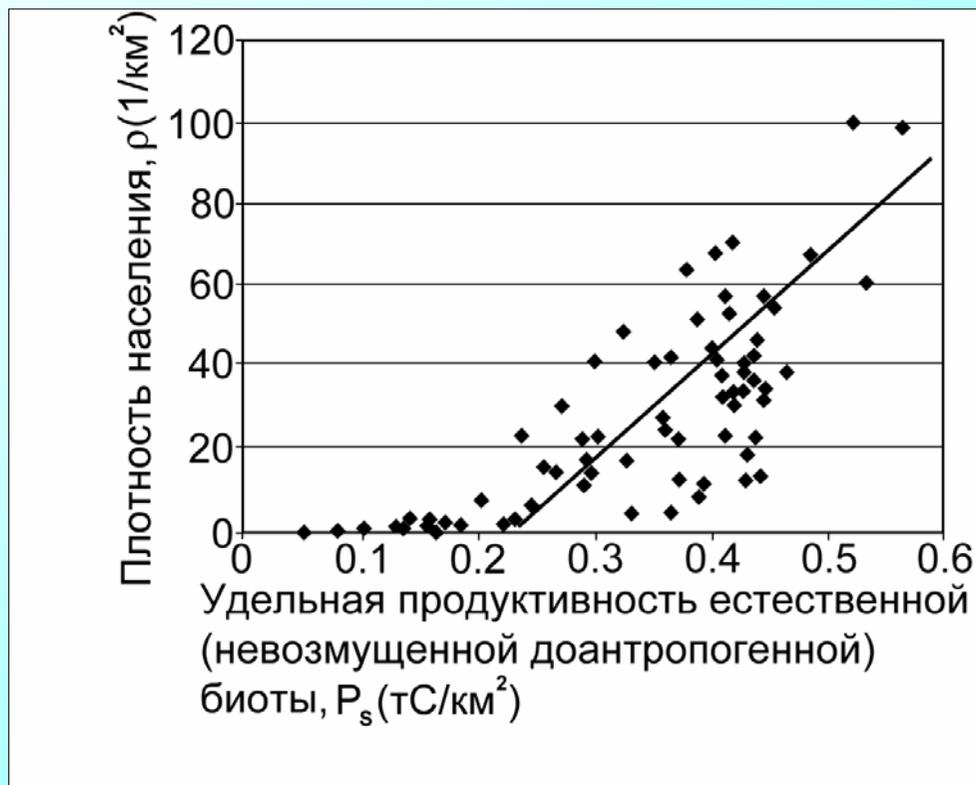
Р – удельная продуктивность естественной биоты (тонн углерода на 1 человека в год) – этот показатель и его изменение может определяться для больших территорий с помощью методов ДЗЗ. $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \eta$ – некоторые коэффициенты, условно назовем их «коэффициентами развития». В линейном приближении они постоянны, в квазилинейном – «медленно изменяются». При этом величина $(1/\alpha)$ есть ничто иное, как энергоёмкость валового национального продукта ($\varepsilon = 1/\alpha$). Измеряются все индикаторы в дол/чел·год [Бушуев В.В., Голубев В.С., Тарко А.М., 2004]



Подобный подход может быть использован для оценки качества природной среды в тех регионах, где скажется влияние глобального изменения климата

Диаграмма

«плотность населения-удельная продуктивность естественной (невозмущенной доантропогенной) биоты»



Квадратными точками на диаграмме показано положение регионов в России



Выводы

- **Экспериментальные исследования показали, что при увеличении концентрации углекислого газа рост растений сначала убыстряется, а затем (при концентрации в 1,5... 2 раза большей по сравнению с современной в атмосфере) растения начинают угнетаться, их продуктивность падает**



- Эту ситуацию следует иметь в виду применительно к биосфере в целом. Не исключено, что при значительном росте содержания углекислого газа в атмосфере продуктивность растений начнет снижаться. В результате ускорится рост содержания углекислого газа в атмосфере, что приведет к еще большему падению биопродуктивности. А это обуславливает дальнейший рост его содержания. Процесс «самораскручивается», а биосфера утрачивает устойчивость. По модельным расчетам (Голубев и др., 2004), это может произойти уже между 2050 и 2100 гг. В дальнейшем атмосфера Земли может оказаться мало пригодной для существования жизни в ее современной форме



- Таким образом, главные глобальные угрозы человечеству связаны с антропогенным изъятием продукции естественной биоты и с увеличением содержания углекислого газа в атмосфере за счет сжигания ископаемого топлива, уменьшения и ухудшения качества лесов. Их действенность зависит от того, насколько будут эффективны и масштабны естественные и искусственные процессы компенсации антропогенных воздействий на биосферу, осуществляемые человеческим сообществом



- **В решении этой проблемы первостепенное значение имеет научное предсказание глобальных климатических изменений, осуществляемое путем компьютерного моделирования энергообмена в геосферах Земли с масштабным использованием материалов космических съемок, а также, предсказание на этой основе социо-экономического качества природной среды для различных сценариев климатических изменений**