

**УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН**

**МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ БИОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ  
БАЛАНСА УГЛЕРОДА (ПО НАТУРНЫМ И СПУТНИКОВЫМ  
ДАНЫМ И С УЧЕТОМ ВКЛАДА БОРЕАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ)**

Промежуточный отчет  
по междисциплинарному интеграционному проекту № 50  
за 2010 г.

**Институты-исполнители**

ИБФ СО РАН, ИВМ СО РАН, ИВТ СО РАН,  
ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, ИПА СО РАН,  
ИЛ им. В.Н. Сукачева СО РАН, ИУУ СО РАН,  
ИМКЭС СО РАН, ИЦиГ СО РАН,  
ЦСБС СО РАН, СФУ, НГУ

**Научные координаторы проекта:**

академик Е.А. Ваганов (СФУ)  
чл.-корр. РАН А.М.Федотов (ИВТ СО РАН)

**Ученый секретарь проекта:**

к.ф.-м.н. И.А. Пестунов

Новосибирск, 2010

## Список исполнителей:

### ИБФ СО РАН:

**Дегерменджи А. Г., чл.-кор. РАН, директор**  
Барцев С.И., д.ф.-м.н., зав. лаб. теоретической биофизики  
Шевырногов А.П., д.т.н., зав. лаб. экологической информатики  
Бархатов Ю. В., к.ф.-м.н., с.н.с.  
Иванова Ю.Д., к.т.н., н.с. лаб. теоретической биофизики  
Ланкин Ю.П., к.т.н., н.с.  
Почекутов А.А., к.ф.-м.н., н.с.  
Ларько А.А., асп.  
Чернецкий М.Ю., вед. математик  
Щемель А.Л., к.ф.-м.н., вед. инж.

### ИВТ СО РАН:

**Федотов А.М., чл.-кор. РАН, зам. директора**  
Жижимов О.Л., зав. лаб., д.т.н.  
Пестунов И.А., зав. лаб., к.ф.-м.н.  
Молородов Ю.И., с.н.с, к.ф.-м.н.  
Синявский Ю.Н., м.н.с.  
Смирнов В.В., инж.-иссл.  
Добротворский Д.И., асп.  
Куликова ЕА., инж.-иссл.  
Пестунов А.И., асп.  
Скачкова А.П., асп.

### ИПА СО РАН:

**Байков К.С., д.б.н., директор**  
Титлянова А.А., г.н.с., д.б.н.  
Кудряшова С.Я., с.н.с., к.б.н.  
Дитц Л.Ю., с.н.с., к.б.н.  
Косых Н.П., н.с., к.б.н.  
Махатков И.Д., н.с., к.б.н.  
Шибарева С.В., н.с., к.б.н.

### ЦСБС СО РАН:

**Ермаков Н.Б., г.н.с., д.б.н.**  
Полякова М.А., м.н.с., к.б.н.

### ИМКЭС СО РАН:

**Гордов Е.П., д.ф.-м.н., г.н.с.**  
Богомолов В.Ю. н.с.  
Генина Е. Ю., к.ф.-м.н., с.н.с.  
Окладников И.Г., к.т.н., с.н.с.  
Титов А.Г., м.н.с.  
Шульгина Т.М., асп.

### ИВМ СО РАН:

**Белолипецкий В.М., зав. отделом, д.ф.-м.н.**  
Белолипецкий П.В., н.с., к.ф.-м.н.

### ИГ СО РАН:

**Черкашин А.К., зав. лаб., д.г.н.**  
Коновалова Т.И., с.н.с., д.г.н.  
Китов А.Д., с.н.с., к.г.н.  
Мясникова С.И., с.н.с., к.г.н.

Солодянкина С.В., н.с., к.г.н.

Истомина Е.А., н.с., к.г.н.

Владимиров И.Н., н.с., к.г.н.

Латышева А.В., н.с., к.г.н.

Фролов А.А., м.н.с.

Бибаева А.Ю., асп.

ИЦиГ СО РАН:

**Ефимов В.М., в.н.с., д.б.н.**

Суслов В.В., н.с.

Тимонов В.С., м.н.с.

ИЛ СО РАН:

**Ведрова Э.Ф., в.н.с., д.б.н.**

Мухортова Л.В., н.с., к.б.н.

Верховец С.В., снс, к.с.-х.н.

Панов А.В., н.с.

Тимохина А.В., асп.

ИУУ СО РАН:

**Потапов В.П., зав. лаб., д.т.н.**

Счастливец Е.Л, зав. лаб., д.т.н.

Полевщиков Г.Я., зав. лаб., д.т.н., проф.

Катаев М.Ю., зав. лаб., д.т.н., проф.

Попов С.Е., с.н.с., к.т.н.

Пястунович О.Л., н.с., к.т.н.

Быков А.А., с.н.с., к.ф.-м.н.

НГУ:

**Сергеев М.Г., зав. каф. общей биологии и экологии, д.б.н.**

Молодцов В.В., ст. преп. каф. общей биологии и экологии

## Общее направление работ

В 2010 г. продолжались исследования, направленные на решение следующих основных задач проекта:

- Построение серии обоснованных (на основе корректного «сворачивания» (инкапсуляции) моделей нижнего иерархического уровня) минимальных моделей глобального цикла углерода в системе «биосфера-климат» с различными вариантами обратных связей вида «климатические изменения – углеродный цикл – климатические изменения» (ИБФ, СФУ).
- Построение сценариев развития системы «биосфера-климат», с выбором наихудшего из них, для оценки глобального экологического риска при различных вариантах ресурсопотребительской стратегии человечества (ИБФ).
- Кросс-верификация оценок чистой первичной продукции, полученным по космическим снимкам, с данными полевых измерений в контексте глобальной динамики CO<sub>2</sub> в атмосфере (СФУ, ИЛ, ИБФ).
- Моделирование сезонных изменений потока углерода через бореальные леса, являющиеся главными источниками сезонных изменений и наземными аккумуляторами углерода. Оценка вклада бореальных лесов в биосферную динамику углерода (ИВМ, ИЛ, ИБФ).
- Калибровка локальной сезонной и поширотной модели почвенного дыхания на основе цифровых карт почв Сибири. Построение глобальной карты почв (экстраполяция известных на недоступные данные) для оценки глобальной сезонной динамики почвенного дыхания (ИПА, ИВТ, ИБФ).
- Сопоставление динамики климатических характеристик с динамикой баланса углерода в прошлом и оценка обратного влияния изменений в биоте на климатические характеристики. Прогноз возможных изменений системы климат-биосфера с учетом обратного влияния биоты (ИМКЭС, ИВТ, ИБФ, НГУ, ИЛ).
- Оценка отклика локальных (бореальных) экосистем и биосферы в целом на изменения состава газовых примесей при масштабных пожарах и промышленных выбросах с учетом влияния аэрозолей на ЧПП и на баланс потоков углерода в целом (ИЛ, ИВТ, ИУУ, ИБФ).
- Оценка влияния изменений показателей функционирования экосистем, сопровождающих смещение зональных и высотно-поясных границ таежных ландшафтов вследствие глобального изменения климата на глобальный баланс углерода (СФУ, ИЛ, ИГ, ИБФ, НГУ).
- Оценка изменений бюджета углерода при изменении типов экосистем вследствие климатически обусловленного смещения границ биоценозов с помощью ординационных моделей связей биотических, биокосных и абиотических компонентов экосистем и выявления ведущих факторов внешней среды (ЦСБС, ИВТ, ИБФ).
- Прогноз возможных изменений, предшествующих сукцессионным и филогенетическим процессам, в балансе углеродных потоков в биомах в ответ на климатические изменения (ИЦиГ, ИБФ, НГУ).
- Создание серии мелкомасштабных пространственно-временных картографических моделей экосистем как основы оценки изменений бюджета углерода и моделирования на территории бореальной зоны (ЦСБС).
- Создание серии прогнозных моделей «растительный покров-климат» для предсказания глобальной динамикой углерода (ЦСБС).
- Верификация полученных моделей на отдельных типах экосистем различного порядка (СФУ, ИЛ, ИБФ, ИГ).
- Приведение структур имеющихся баз данных к современным стандартам представления метаданных, разработка модулей визуализации и статистического анализа со-

держимого баз данных в рамках распределенной ГИС ИВТ СО РАН (ИВТ, ИПА, ЦСБС).

- Комплексный анализ пространственных данных с помощью технологий Data Mining. Интеграция созданных информационных ресурсов в единую среду (ИВТ, ИВМ).

## Основные результаты работ, полученные в отчетном году

### *Построение, на основе принципа наихудшего сценария, минимальной модели климата, согласованной с ранее построенной минимальной моделью биосферы (ИБФ, ИВМ)*

Построенная ранее на основе принципа наихудшего сценария минимальная модель биосферы дополнена минимальной моделью климата, учитывающей известные обратные связи:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = \Delta R_f + \sum_i f_i \Delta T. \quad (1)$$

Здесь  $C=1.1\pm 0.5$  [ГДж м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>] – теплоёмкость климатической системы (оценивается из наблюдений поглощения тепла океаном (Levitus et. Al., 2000) и текущими трендами потепления (Folland et. Al., 2001)),  $\Delta T$  [°С] – изменение глобальной среднегодовой поверхностной температуры воздуха, вследствие радиационного воздействия  $\Delta R_f$  [Вт м<sup>-2</sup>] (может быть вычислено по формуле  $\Delta R_f = 5.3 \ln\left(\frac{A}{A_0}\right)$  [Вт м<sup>-2</sup>], где  $A$  и  $A_0$  – концентрации углекислого газа в атмосфере).

Воздействие  $\Delta R_f$ , порождает изменение температуры  $\Delta T$ , которое в свою очередь изменяет влияющие на климат процессы. Каждое из этих изменений вызывает дополнительное воздействие  $f_i \Delta T$ , где  $f_i$  [Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>] – коэффициент, соответствующий воздействию при изменении температуры на 1 °С. Разумеется, итоговое значение температуры зависит от коэффициентов  $f_i$ , отражающих величину обратных связей. Единственным инструментом для оценки обратных связей в данный момент являются трёхмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана. С помощью них были получены следующие оценки обратных связей (IPCC Report, 2007):

Длинноволновое излучение в космос будет увеличиваться на 3.2 Вт м<sup>-2</sup>, при увеличении температуры на 1 °С, т.е.  $f_l = -3.2$  Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>.

Считается, что относительная влажность в атмосфере будет сохраняться. Это приведёт к увеличению абсолютной влажности и в соответствии с парниковым эффектом водяного пара  $f_{vw} = 1.8 \pm 0.18$  Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>.

Повышение температуры приведёт к уменьшению снежного и ледового покрова и из-за уменьшения альбедо  $f_A = 0.26 \pm 0.08$  Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>.

Оценка эффектов, связанных с облачностью, даёт  $f_c = 0.69 \pm 0.38$  Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>.

Оценка эффектов, связанных с изменением вертикального градиента температуры, даёт  $f_T = -0.84 \pm 0.26$  Вт м<sup>-2</sup> °С<sup>-1</sup>.

Максимальная оценка  $\Delta T$ , намного больше отличается от средней, чем минимальная, хотя неточности в оценке обратных эффектов везде симметричны. Это объясняется тем, что зависимость  $\Delta T$  от  $\sum_i f_i$  является гиперболической и при уменьшении модуля  $\sum_i f_i$  (обусловлено увеличением доли положительных обратных связей)  $\Delta T$  быстро возрастает.

Другим важным моментом является то, что оценка суммарного антропогенного радиационного воздействия тоже имеет большие неточности в основном в связи с влиянием аэро-

золей. Аэрозоли оказывают как нагревающее, так и охлаждающее воздействие. Ещё 10 лет назад считалось, что их итоговое воздействие близко к нейтральному. Однако последние оценки (IPCC Report, 2007) попадают в интервал от -1 до -2 Вт м<sup>-2</sup>. В работе (Andreae et. al., 2005) оценивается к чему это приводит. Предполагается, что охлаждающий эффект аэрозолей будет снижаться за счёт внедрения более чистых технологий и более короткого по сравнению с парниковыми газами времени жизни в атмосфере. Отмечается, что большой охлаждающий эффект от аэрозолей приводит к большой чувствительности климата к удвоению углекислого газа. Этот эффект также может быть учтён с помощью уравнения (1) посредством вариации  $\Delta R_f$ .

Таким образом, значительный рост чувствительности климата при небольшом увеличении оценки величины обратных связей не позволяет рассматривать только центральные оценки. В соответствии с принципом наихудшего сценария очень важно отследить, к каким последствиям могут привести положительные обратные связи.

Возможные сценарии развития системы с учетом аэрозолей (рис. 1) и изменения облачности (рис. 2) приведены ниже.

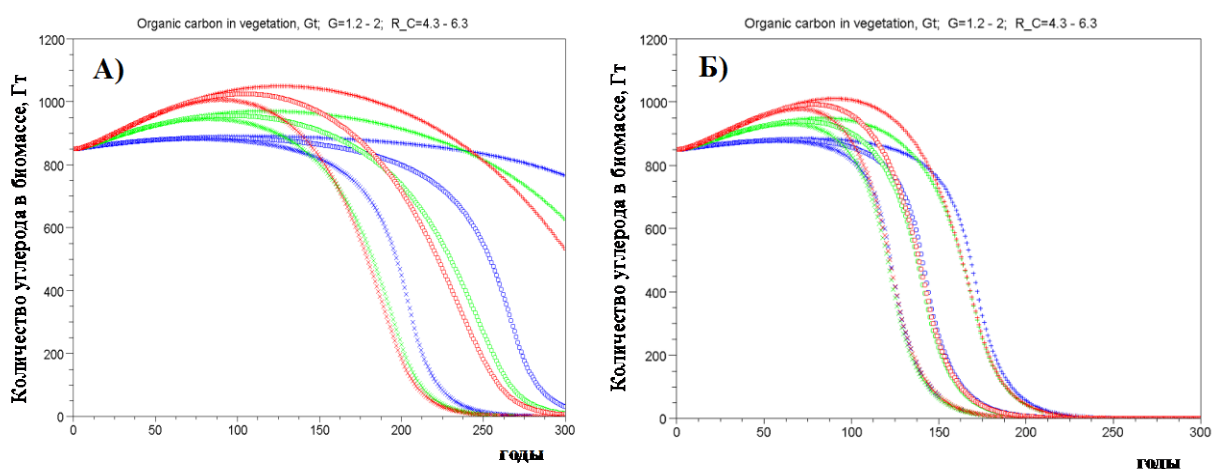


Рис. 1. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада аэрозолей в радиационное воздействие (параметр  $R_C$ ) и разных значениях предельной емкости среды (параметр  $G$ ). Отдельные «пучки» траекторий соответствуют разным значениям  $R_C$  (чем больше параметр, тем ближе траектория к началу отсчета). Значения параметра  $G = 1.2; 1.6; 2.0$  соответствуют синий, зеленый и красный цвета траекторий. Рисунок (А) демонстрирует динамику при средних значениях параметров обратных связей, а рисунок (Б) - при значениях параметров на неблагоприятных краях доверительных интервалов.

В результате показано, что явный учет климатических обратных связей и тепловой инерции земной поверхности не изменил полученного ранее основного результата минимальной модели системы «биосфера-климат» о возможности возникновения в ней необратимых катастрофических режимов. Сопряжение минимальных моделей биосферы и климата дает в руки исследователей инструмент для «наглядного» изучения динамических режимов в объединенной системе «биосфера-климат» с возможностью последовательного и выверенного уточнения этой модели.

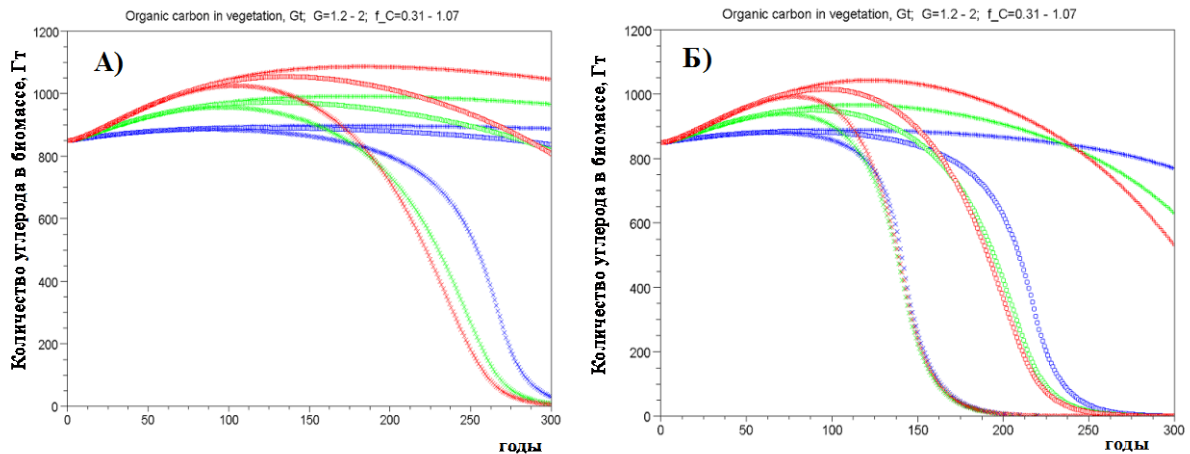


Рис. 2. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада эффектов облачности (параметр обратной связи -  $f_C$ ) и разных значениях предельной емкости среды (параметр  $G$ ). Остальные обозначения соответствуют обозначениям рисунка 1.

### Качественный анализ минимальной модели многолетней динамики углерода в биосфере (ИВТ)

Дан качественный анализ минимальной модели многолетней динамики углерода в биосфере, представленной в работе [Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В.. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере. ДАН, Геофизика, 2005, том 401, №2, с. 233-237].

Исследуемая модель записывается в виде системы из четырех балансовых уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{dt} = fuel(t) \text{ - динамика общего количества углерода вследствие антропогенного выброса,} \\ \frac{dx}{dt} = V_x \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_{MaxGrowth}(T(A)) - V_d \cdot x \text{ - динамика углерода в биомассе растений,} \\ \frac{dy}{dt} = V_d \cdot x - V_s \cdot y \cdot f_{MaxDecay}(T(A)) \text{ - динамика углерода органических остатков,} \\ A = C - x - y \text{ - закон сохранения массы углерода.} \end{array} \right.$$

Здесь  $f_{MaxGrowth}(T(A)) = T^d \cdot (T_{MaxGrowth} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxGrowth} - T)$  - зависимость прироста биомассы растений от среднегодовой глобальной температуры, где  $\Theta$  - ступенчатая функция равная 1 при положительном значении аргумента и 0 в остальных случаях;

$f_{MaxDecay}(T(A)) = T^b \cdot (T_{MaxDecay} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxDecay} - T)$  - зависимость почвенного дыхания от температуры;

$T(A) = T_0 + T_{del} \cdot \log_2 \frac{A}{A_0}$  - зависимость глобальной температуры от углерода атмосферы;

$V(A) = \frac{V_{max} \cdot A}{V_0 + A}$  - зависимость вида Моно для прироста биомассы от углерода атмосферы.

Данные о параметрах системы представлены в таблице 1.

Эта модель использовалась ее авторами для исследования условий, приводящих к наилучшим сценариям биосферной динамики, и оценки характерных времен их реализации.

Ниже представлены результаты исследования модели при условии, что антропогенные выбросы отсутствуют, т.е.  $fuel(t)=0$ . Масштабируемые множители  $V_x$ ,  $V_d$ ,  $V_s$  выбирались таким образом, чтобы обеспечить стационарные (без антропогенной эмиссии углерода в атмосферу) скорости ЧПП (чистой первичной продукции), отмирания биомассы и дыхания почв равные  $P_0=55$  Гт в год, т.е. вычисляются из условий:

$$V_x \cdot x_0 \cdot (x_{\max} - x_0) \cdot V(A_0) \cdot f_{MaxGrowth}(T(A_0)) = V_d \cdot x_0 = V_s \cdot y_0 \cdot f_{MaxDecay}(T(A_0)) = P_0.$$

Кроме того, предполагалось, что начальное значение параметра  $T_0$  удовлетворяет условию:

$$0 < T_0 < \min(T_{MaxGrowth}, T_{MaxDecay}). \text{ В этом случае } \Theta(T_0) = \Theta(T_{MaxGrowth} - T_0) = \Theta(T_{MaxDecay} - T_0) = 1$$

Таблица 1.

Параметр	Min возможное значение	Max возможное значение	Значение в 1958г.	Текущее значение	Примечание
$A_0$	600	760	700		Количество углерода в атмосфере в 1958 г., Гт
$x_0$	500	850	810		Количество углерода в биомассе в 1958 г., Гт
$y_0$	1080	2000	2011		Количество углерода гумуса в 1958 г., Гт
$V_x$			Вычисл.		Масштабный множитель 1/(Гт С · год)
$x_{\max}$	891	1296	-		Максимально возможное количество углерода в биомассе, Гт
$V_d$			Вычисл.		Масштабный множитель
Степень d			-	1,5	
$T_{MaxGrowth}$	30° С	45° С	-		Максимальная температура, при которой происходит рост биомассы, °С
$V_s$			Вычисл.		Масштабный множитель
Степень b			-	1,5	
$T_{MaxDecay}$	30° С	45° С	-		Максимальная температура распада органики, °С
$T_0$			-	15° С	Глобальная среднегодовая температура поверхности в настоящее время
$T_{del}$	2° С	6° С	-		Прирост температуры при удвоении концентрации CO <sub>2</sub> в атмосфере, °С
$V_{\max}$			-	1	
$V_0$			-	930	Соответствует экспериментальным данным
$P_0$			55		Стационарные скорости ЧПП, отмирания биомассы и дыхания почв в 1958 г., Гт С /год

### Исследование устойчивости стационарных состояний модели

Продифференцируем последнее уравнение исходной системы и подставим в него значения производных  $x$  и  $y$ , тогда с учетом сделанных предположений систему можно записать следующим образом

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = V_s \cdot y \cdot T(A)^b \cdot (T_{MaxDecay} - T(A)) - V_x \cdot x \cdot (x_{\max} - x) \cdot V(A) \cdot T(A)^d \cdot (T_{MaxGrowth} - T(A)) \\ \frac{dx}{dt} = V_x \cdot x \cdot (x_{\max} - x) \cdot V(A) \cdot T(A)^d \cdot (T_{MaxGrowth} - T(A)) - V_d \cdot x \\ \frac{dy}{dt} = V_d \cdot x - V_s \cdot y \cdot T(A)^b \cdot (T_{MaxDecay} - T(A)) \end{cases}$$

Для сокращения записей запишем систему в следующем виде



$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = f(A, x, y) \\ \frac{dx}{dt} = h(A, x) \\ \frac{dy}{dt} = k(A, x, y) \end{cases}$$

Найдём некоторые стационарные точки  $(A_s, x_s, y_s)$ , для которых  $\frac{dA}{dt} = \frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} = 0$ .

**Утверждение 1.** Точки  $(A_0, 0, 0)$  и  $(A_0, x_0, y_0)$  являются стационарными.

Далее будем называть точку  $(A_0, 0, 0)$  точкой деградации биосферы, поскольку значение биомассы и органических остатков равно нулю. В то же время вторая стационарная точка соответствует начальному состоянию системы в 1958 году.

Произведём линеаризацию системы в окрестности стационарных точек

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} A \\ x \\ y \end{pmatrix} = S \cdot \begin{pmatrix} A \\ x \\ y \end{pmatrix},$$

где  $S = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial A} & \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial A} & \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial k}{\partial A} & \frac{\partial k}{\partial x} & \frac{\partial k}{\partial y} \end{pmatrix}_{(A_s, x_s, y_s)}$  – матрица частных производных в соответствующей стационарной точке.

Произведём замену  $\begin{pmatrix} A \\ x \\ y \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix}$ , где  $T$  – матрица собственных векторов матрицы  $S$ . Тогда,

домножив систему слева на обратную матрицу  $T^{-1}$ , получим

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} = T^{-1} \cdot S \cdot T \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} = \Lambda \cdot \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix},$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица с соответствующими собственными числами на диагонали.

**Утверждение 2.** Решения линеаризованной системы в точке деградации биосферы  $(A_0, 0, 0)$  представляются в виде

$$A = c_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + T_{1,3} \cdot x_0 \cdot e^{\lambda_3 \cdot t}; \quad x = x_0 \cdot e^{\lambda_3 \cdot t}; \quad y = -c_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + T_{3,3} \cdot x_0 \cdot e^{\lambda_3 \cdot t},$$

$$\lambda_2 = -\frac{P_0}{y_0} < 0, \quad \lambda_3 = \frac{P_0}{x_{max} - x_0} > 0, \quad T_{3,3} > 0, \quad c_2 < 0, \quad T_{1,3} < 0$$

Поскольку  $\lambda_3$  – положительное собственное значение, то согласно теореме Ляпунова о неустойчивости по первому приближению (если среди собственных значений матрицы частных производных в стационарной точке есть хотя бы одно с положительной вещественной частью, то положение равновесия системы неустойчиво), следует, что стационарная точка  $(A_0, 0, 0)$  неустойчива. Это означает, что при малейшем возмущении система выйдет из этого состояния. Нетрудно видеть, что в силу закона сохранения массы углерода при постоянном количестве углерода в системе  $A_0 + x_0 + y_0 = C$  точка деградации недостижима. Однако,

если допустить наличие стока углерода, то при попадании в окрестность точки деградации биомасса будет восполняться из углерода атмосферы.

Для оценки области неустойчивости было рассмотрено второе приближение ряда Тейлора функций  $f(A, x, y)$ ,  $h(A, x)$  и  $k(A, x, y)$ . Было установлено, что при средних значениях параметров из допустимых диапазонов второе приближение не превосходит десятой части первого приближения в окрестности  $\sim 300$  Гт точки деградации.

**Утверждение 3.** *Существует набор начальных параметров модели из допустимых областей такой, что стационарная точка  $(A_0, x_0, y_0)$  неустойчива.*

Из этого утверждения следует, что при определённых параметрах предположение авторов модели о стационарности состояния системы до 1958 года невыполнимо из-за неустойчивости этого состояния. Система приходит в движение без антропогенных воздействий при малейшем возмущении. Это следует учитывать при выборе параметров модели для численного эксперимента.

### ***Расчет потоков углерода между атмосферой и наземной экосистемой за годовой период для древостоя различных возрастов (ИБФ)***

Рассчитаны потоки и общий баланс углерода между атмосферой и наземной экосистемой за годовой период для древостоя сосняка зеленомошного различных возрастов в районе станции высотной мачты «Зотино» ( $60^\circ$  с.ш.,  $89^\circ$  в.д.). Для расчета использовалась построенная ранее модель бореального леса, верифицированная по базе полевых и расчетных данных по оценке фитомассы и чистой первичной продукции лесов Средней Сибири. Входными параметрами модели, влияющими на ростовые характеристики древостоя, являлись реальные динамики температуры, освещенности и влажности за 2009 год.

Проведено сравнение величин месячного стока углерода для летних месяцев по данным, полученным с помощью модели бореального леса для сосняков зеленомошных и по данным, полученным методом баланса атмосферного пограничного слоя (*ИВМ СО РАН*) для точки ( $60^\circ$  с.ш.,  $89^\circ$  в.д.). Показано (рис. 3), что все три метода дают близкие значения величин стока углерода. Видно, что для региона, в котором основную долю составляет молодой лес, в летний период сток углерода может достигать до 120 грамм на квадратный метр в месяц. Близость результатов, полученных методом баланса атмосферного пограничного слоя, к результатам, полученным на модели бореального леса для возрастов древостоя 20 и 55 лет, должна отражать большое количество леса молодого возраста в регионе, что в целом соответствует реальной картине распределения возрастов.

### ***Разработка метода выделения пространственного распределения различных типов растительности по фенологическим характеристикам (ИБФ)***

Разработан метод выделения пространственного распределения различных типов растительности по фенологическим характеристикам. Метод основан на линейном преобразовании многомерного пространства состояний растительного покрова. На основе разработанного метода выделены районы со схожими многолетними трендами. Показана возможность совместного использования методов STL и SSA для анализа неявно выраженных временных трендов.

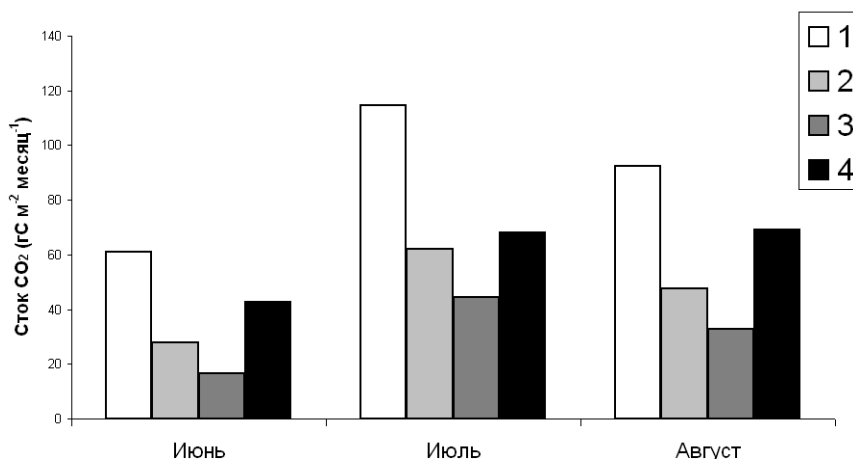


Рис. 3. Величины стока углерода за летние месяцы 2009 года согласно разным методикам. 1, 2, 3 – расчет по модели бореального леса для зеленомошных сосняков возраста 20, 55 и 90 лет соответственно. 4 – оценка методом баланса атмосферного пограничного слоя.

На основании разработанного метода показано совпадение нелинейного многолетнего тренда NDVI Северной Евразии с аналогичным трендом NDVI Горно-таежного района юга Красноярского края (рис. 4).

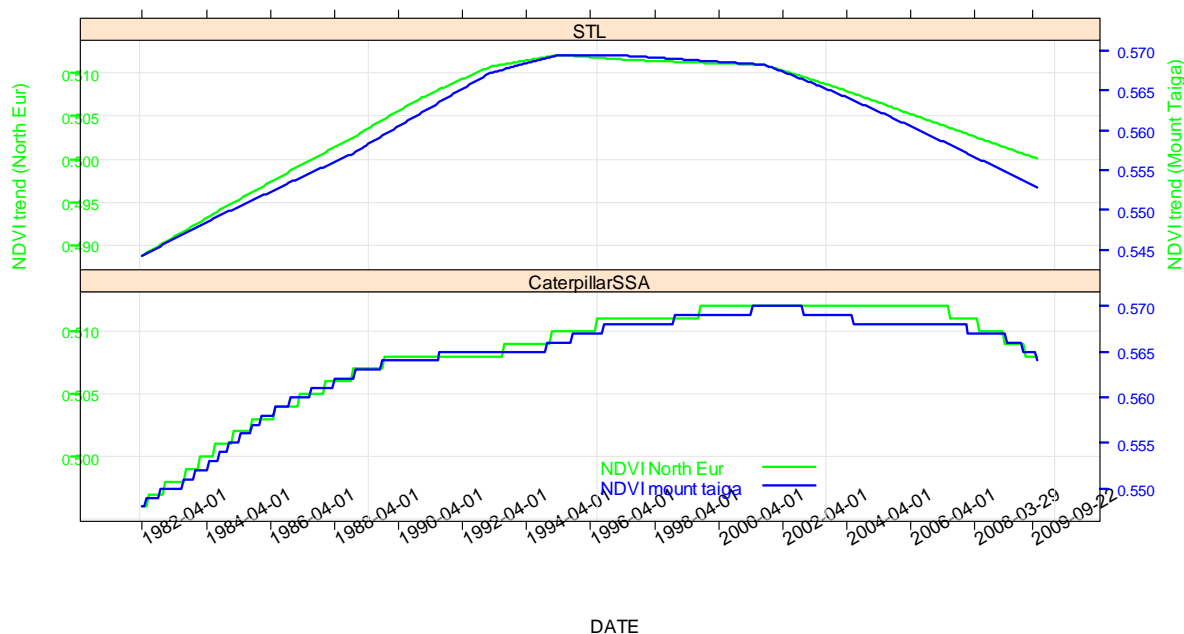


Рис. 4. Тренды, полученные методами STL и «Гусеницы» для Горно - южнотаежного экорегиона и смешанных, и хвойных лесов Северной Евразии. Временные ряды, на основе которых были определены тренды, получены на основе данных NOAA/AVHRR, MODIS/Terra-Aqua, NDVI, 1982-2009 гг.

### **Создание мелкомасштабной (1:7500000) векторной электронной карты экосистем бореальной растительности Западной Сибири (ЦСБС, совместно с ИПА и ИВТ)**

Завершено создание мелкомасштабной (1:7500000) векторной электронной карты экосистем бореальной растительности Западной Сибири на основе разработанной иерархии единиц для бореальной растительности Северной Азии, информации опубликованных мелкомасштабных карт растительности Западно-Сибирской равнины (1976), карты болот Западной Сибири (Романова, 1972), дешифрованных космических снимков Terra-Modis с разрешением 250 м, а также разработанного единого классификатора для единиц растительности и высших подразделений почвенного покрова (рис. 5). В основу методологии классификатора

положены принципы В.Б. Сочавы (1978) о размерности растительного покрова и иерархии эколого-географических факторов, обуславливающих разнообразие и пространственную структуру растительности на планетарном и региональном уровнях (зональность, океаничность-континентальность климата, рельеф). Также для создания легенды использованы подходы, реализованные для Карты растительности Европы.

Проведен анализ корреляционных отношений высших подразделений растительности и почв, и на основе легенды созданной Карты бореальной растительности Западной Сибири разработан единый классификатор, отражающий закономерности пространственной организации как бореальной растительности, так и почвенного покрова (совместно с соисполнителями проекта из ИПА СО РАН). Выявленные закономерности положены в основу созданных соисполнителями из ИПА СО РАН картографических моделей Первичной продукции экосистем Западно-Сибирской равнины, Почвенной карты Западно-Сибирской равнины и Запасов углерода в почвах бореальной зоны Западной Сибири, выполненных в масштабе 1:7500000.

Полная легенда карты бореальных экосистем Западно-Сибирской равнины включает 28 подразделений, объединенных в 5 категорий:

### **1. Субарктические редколесья (лесотундра)**

- 1.1. Лиственничные и елово-лиственничные редколесья.
- 1.2. Ерниковые и ивняково-ерниковые и ерnikово-ольховниковые кустарничково-лишайниково-моховые тундры в сочетании с лиственничными редколесьями и плоскобугристыми болотами.
- 1.3. Кустарничково-осоково-моховые, кустарничково-осоково-лишайниковые и валиково-полигональные комплексные болота.

### **2. Северная тайга**

- 2.1. Лиственнично-еловые и еловые зеленомошно-лишайниковые и зеленомошные редкостойные леса в сочетании с ерниково-сфагново-лишайниковыми плоскобугристыми болотами.
- 2.2. Лиственнично-елово-кедровые лишайниково-зеленомошно-кустарничковые и зеленомошно-кустарничковые леса в сочетании с кедрово-березовыми вторичными лесами.
- 2.3. Сосновые с кедром и лиственницей лишайниковые и лишайниково-кустарничково-сфагновые леса в сочетании с выпуклыми кустарничково-сфагновыми и сосново-кустарничково-сфагновыми олиготрофными болотами.
- 2.4. Лиственничные и елово-лиственничные кустарничково-лишайниково-долгомошные, кустарничково-сфагновые редкостойные леса в сочетании с плоско- и крупнобугристыми болотами.
- 2.5. Лиственничные и елово-лиственничные, местами с кедром и березой лишайниково-мохово-кустарничковые и зеленомошные редкостойные леса редкостойные леса.
- 2.6. Лиственнично-сосновые лишайниково-зеленомошно-кустарничковые леса в сочетании с сосновыми лишайниковыми лесами и кустарничково-мохово-лишайниковыми крупнобугристыми болотами.
- 2.7. Кустарничково-мохово-лишайниковые, травяно-сфагновые, осоково-гипновые и осоково-пушицево-сфагновые плоскобугристые комплексные болота.
- 2.8. Лишайниково-сфагновые плосковыпуклые олиготрофные болотно-озерные комплексы.
- 2.9. Лугово-болотно-соровая растительность поймы нижнего течения р. Оби.
- 2.10. Кустарничково-лесная растительность долин притоков Оби.

### **3. Средняя тайга**

- 3.1. Елово-кедровые и темнохвойно-березовые с лиственницей и сосной кустарничково-зеленомошные леса, местами в сочетании с кустарничково-сфагновыми олиготрофными болотами.

- 3.2. Елово-кедровые с пихтой и темнохвойно-березовые мелкотравно-бруснично-зеленомошные леса.
- 3.3. Елово-кедровые долгомошные и кустарничково-сфагновые леса в сочетании с кустарничково-сфагновыми олиготрофными болотами.
- 3.4. Сосновые бруснично-зеленомошные, бруснично-лишайниковые и багульниково-бруснично-зеленомошные леса местами в сочетании с сосново-кустарничково-сфагновыми олиготрофными болотами.
- 3.5. Сосновые и березово-сосновые долгомошно-сфагновые и кустарничково-сфагновые леса в сочетании с кустарничково-сфагновыми олиготрофными болотами.
- 3.6. Сфагновые сосново-кустарничковые олиготрофные выпуклые болота (Багульниково-кассандрово-сфагновые с сосной и кедром на грядах, с сфагновыми мочажинами, с периферийным рядом сосново-сфагновых мезо-евтрофных ассоциаций и сосново-кустарничково-сфагновые олиготрофные болота).
- 3.7. Лесо-кустарничково-сорово-луговая растительность поймы нижнего течения р. Оби.

#### **4. Южная тайга**

- 4.1. Елово-пихтовые, пихтово-еловые и пихтово-елово-кедровые зеленомошно-мелкотравные и мелкотравно-осочковые с элементами широколиственного леса местами в сочетании с кедровыми с пихтой и елью травяно-сфагновыми заболоченными лесами.
- 4.2. Пихтово-еловые с участием березы и осины, местами с липой зеленомошно-травяные леса с участием неморальных видов в сочетании с влажными широколиственными лесами.
- 4.3. Сосновые, местами с липой, травяно-кустарничковые с разреженным моховым покровом леса местами в сочетании с березовыми, сосново-березовыми осоково-сфагновыми и вейниково-осоковыми болотами.
- 4.4. Березовые с елью, сосной, кедром вейниково-хвощевые осоково-сфагновые леса в сочетании с осоково-сфагновыми залесенными болотами.
- 4.5. Лесо-кустарничково-луговая растительность пойм среднего течения Оби.

#### **5. Подтайга**

- 5.1. Березовые и осиновые вейниковые и вейниково-разнотравные леса в сочетании с лесными суходольными лугами: ежовыми, мятликовыми, овсянницевыми, местами в сочетании с осоковыми и тростниково-осоковыми болотами.
- 5.2. Сосновые вейниковые и травяно-кустарничковые леса в сочетании с сосновыми лишайниковыми лесами.
- 5.3. Осоково-гипновые и травяные евтрофные болота.
- 5.4. Лесо-кустарничково-луговая растительность пойм Оби.

Проведена отработка методологии создания ординационных и мелкомасштабных моделей «растительность-климат» на основе современных ГИС технологий, методов дешифрирования космической информации и климатических моделей на эталонных территориях (совместно с ИЛ СО РАН). В качестве тематических слоев ГИС завершена начатая на предыдущем этапе выполнения проекта подготовка серии картографических климатических моделей на базе прикладного пакета ArcGis. В настоящее время она включает картографические модели распределения 28 климатических параметров (среднемесячные и среднегодовые показатели осадков, температуры, индекс континентальности Конрада, разница температур самого теплого и холодного месяцев) на территории Северной Азии.

На основе мелкомасштабных картографических климатических моделей проведена био-климатическая оценка подзонально-секторных подразделений южно-таежных зональных лесных экосистем по показателям влаго-теплообеспеченности (показатель увлажнения АМІ, средние значения температур июля и показатели холода). Построенные картографические модели (рис. 6) демонстрируют закономерности зависимостей пространственной организации южно-таежных лесов от факторов тепло-влажности и являются основой для прогнозного моделирования измерений растительного покрова по различным сценариям

климатических изменений, которое будет выполняться для всей бореальной растительности на этапе 2011 года выполнения проекта.

Все созданные в процессе выполнения проекта тематические слои представлены в открытой коллективной экспертно-аналитической ГИС «Пространственно-временная организация экосистем северной Азии» (совместно с ИВТ, ИПА, ИЛ).

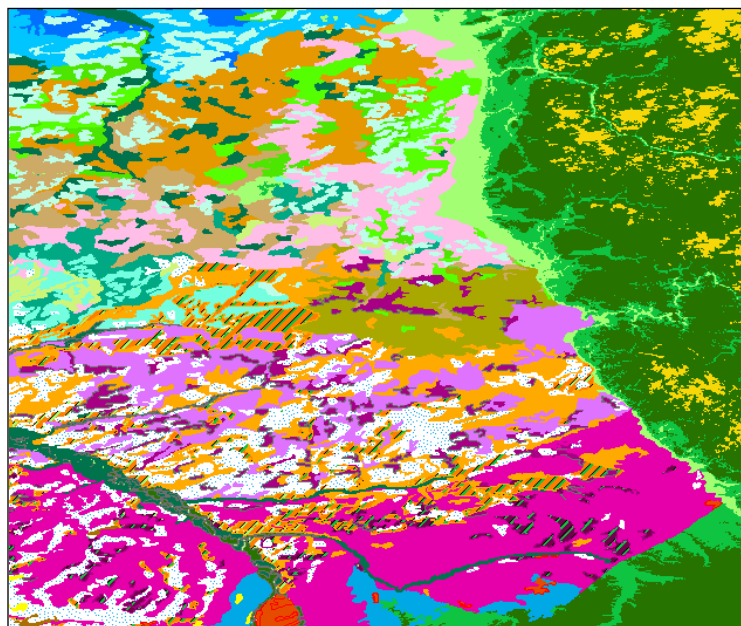


Рис. 5. Фрагмент карты экосистем бореальной зоны Западно-Сибирской равнины (1:7500000).

### **Современное пространственно-временное поведение климатических параметров, оказывающих влияние на растительный покров Западной Сибири (ИМКЭС)**

На основе декадных данных по температуре и осадкам реанализа ERA-Interim (<http://139.191.1.74/datadownload/index.php>) с разрешением  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  за период с 1989 по 2009 гг. построен архив климатических параметров, оказывающих влияние на растительный покров Западной Сибири. Выявлена мелкомасштабная неоднородность в динамике этих характеристик, что должно найти свое отражение в динамике растительности в регионе. Пространственная неоднородность поведения климатических характеристик иллюстрируется приведенными ниже десятилетними трендами среднегодовой температуры и количества осадков (рис. 7,8).

Обработка этих данных осуществлялась с помощью вычислительного блока разрабатываемой веб-системы. Для каждого года с 1989 по 2009 были рассчитаны основные климатические характеристики, контролирующие развитие растительности: средняя температура по каждому из 12 месяцев; средняя годовая температура; среднемесячное количество осадков по каждому из 12 месяцев; годовое количество осадков; сумма температур выше  $5^{\circ}$ ; сумма температур выше  $10^{\circ}$ ; количество осадков за теплый период (май-октябрь) и количество осадков за холодный период (ноябрь-апрель); континентальность климата как разница температур самого теплого месяца (июль) и самого холодного месяца (январь). Результаты расчетов сохранены в файлах формата GeoTiff, позволяющих как графическое представление результатов, так и дальнейшую их обработку. Созданный архив климатических характеристик будет использован для изучения корреляции между метеорологическими характеристиками и поведением растительности на исследуемой территории.

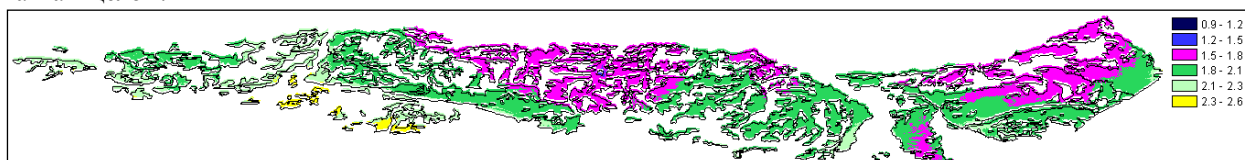
Более детальный анализ особенностей климатических изменений на территории Западной Сибири возможен только на основе региональной модели высокого пространственного разрешения. Такая модель была построена на основе мезомасштабной модели WRF ARW

версии 3.1. Была проведена ее настройка и отладка работы в распараллеленном режиме. Созданы системы обработки и конвертирования входных данных для атмосферной модели и модели приземного слоя, листов описания данных для различных форматов и типов метеорологических архивов. Осуществлен выбор физических схем и параметризаций подходящих для исследуемой области.

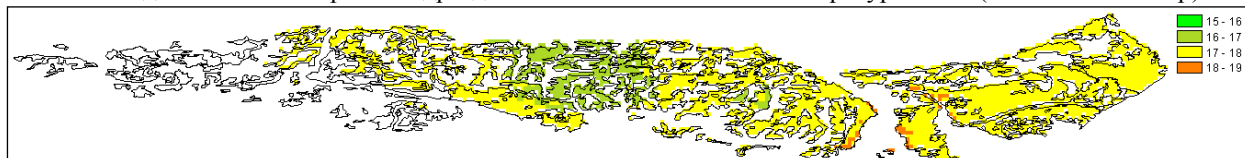
В качестве граничных условий для региональной модели (в результате сравнения с данными наблюдений на метеостанциях) были выбраны поля реанализа ECMWF ERA-40, как наиболее точно воспроизводящие метеорологические характеристики для территории Западной Сибири. На основе анализа доступных данных для региона и с учетом роли болот на этой территории выбрана карта типов землепользования Modis.

Совместно с коллегами из СибНИГМИ и Гидрометцентра создана и реализована вычислительная процедура учета данных станционных измерений при выполнении климатического моделирования современных изменений. Использованы 2 метода усвоения данных «observation nudging» и 3dvar усвоение. Первый предназначен для усвоения данных станционных наблюдений во время работы модели, а второй - для корректировки расчетных полей и их «подтягиванию» к полям глобальных моделей. Этот подход позволяет корректировать результат работы модели и достаточно точно воспроизводить месячный ход «идеального прогноза», что и реализует схему перехода от метеорологических сроков моделирования к климатическим.

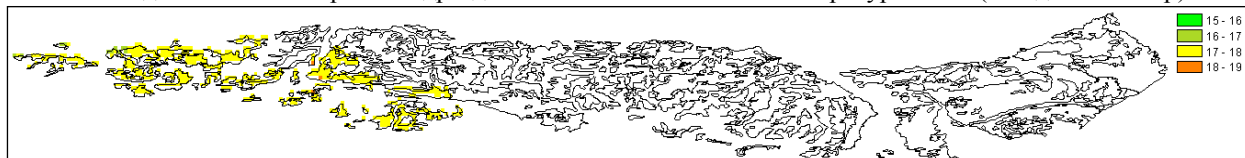
Различия подзонально-секторных подразделений южной тайги по показателю увлажнения АМИ (1-3). Южная тайга в целом.



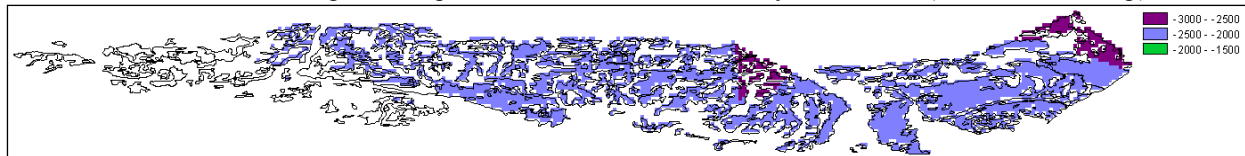
Различия подзонально-секторных подразделений южной тайги по температуре июля (восточный сектор)



Различия подзонально-секторных подразделений южной тайги по температуре июля (западный сектор)



Различия подзонально-секторных подразделений южной тайги по сумме холода (восточный сектор)



Различия подзонально-секторных подразделений южной тайги по сумме холода (западный сектор)

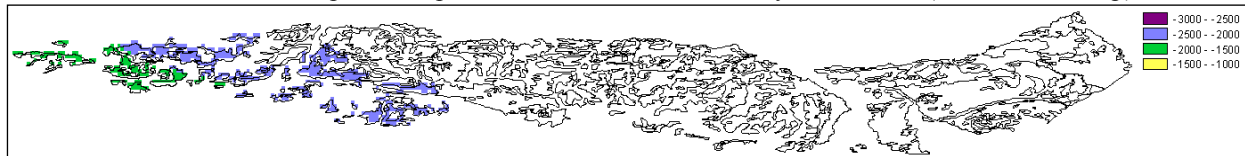
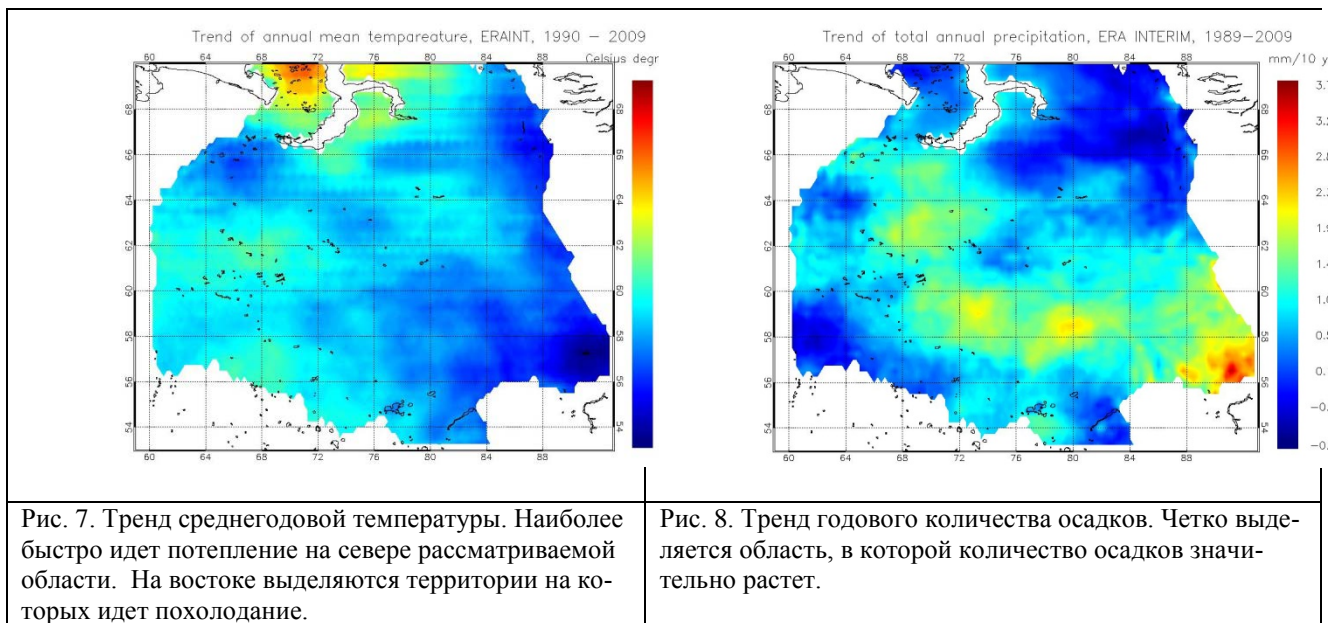


Рис. 6. Биоклиматические подразделения южно-таежных экосистем по показателям температуры июля, суммы холода (суммы отрицательных температур, которые связаны с температурой января  $R^2=0.96$  и индексом континентальности  $R^2=0.76$ ) и индексом увлажнения АМИ. Граница южной тайги определяется АМИ=2.3.

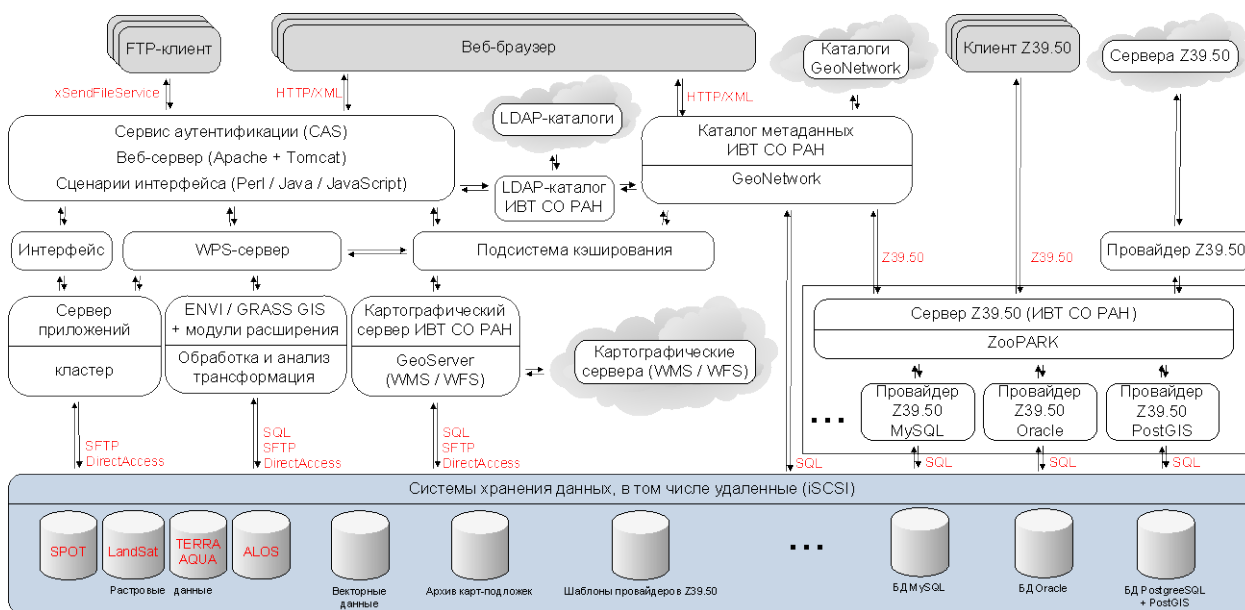




В результате создан программный комплекс для вычисления полей метеорологических величин, которые в определенном смысле являются проекциями полей реанализа на сетку с высоким пространственным шагом (20 км), «подтянутых» к данным измерений наземных станций. Его применение для Западной Сибири для периода 1990–2000 гг позволяет говорить о создании пилотной версии «сибирского» реанализа, наличие которой дает надежную основу для понимания происходящих в регионе климато-экологических процессов.

### Создание открытой коллективной экспертно-аналитической ГИС «Пространственно-временная организация экосистем северной Азии» (ИВТ, ЦСБС, ИПА)

В 2010 году в ИВТ СО РАН продолжалось создание сервис-ориентированной геоинформационной системы для сбора, хранения и обработки спутниковых и наземных данных (рис. 9). Система создается на базе каталога спутниковых данных Новосибирского научного центра СО РАН, который с 2008 года регулярно пополняется оперативными данными SPOT 4, а с мая 2010 года – данными MODIS/Terra+Aqua, кроме этого он включает архивные данные со спутников серии LandSat на территорию РФ за 1982-2002 годы.





Система создается с учетом рекомендаций OGC на основе программных продуктов с открытым исходным кодом и работает под управлением операционной системы семейства UNIX. Подсистема картографических сервисов обеспечивает централизованный доступ к наборам векторных и растровых данных по протоколам WMS. Система позволяет публиковать пространственные данные как с локальных, так и распределенных источников. Для поиска данных по метаданным используется сервер GeoNetwork, обеспечивающий поддержку протокола Z39.50. В качестве базового инструментария для обработки и анализа данных дистанционного зондирования используются пакеты программ ESRI ENVI 4.7 и GRASS GIS с модулями расширения, созданными в ИВТ СО РАН.

В систему внедрено несколько информационных ресурсов: 1) векторная карта растительности Западной Сибири и ландшафтная карта Иркутской области, 2) векторная карта почв бореальной зоны Западно-Сибирской равнины и соответствующая ей карта растительности, содержащая 28 различных типов растительности (М 1:7500000), 3) база данных по содержанию органического углерода в почвах Сибири, 4) векторная тематическая карта «Содержание органического углерода в почвах Западно-Сибирской равнины» (М 1:7500000), 5) база метеорологических данных за период с 1989 по 2009 гг. на ключевой участок с координатами: 53-70° с.ш., 59-93° в.д.

Метеорологическая база включает климатические параметры, оказывающие влияние на растительный покров Западной Сибири и рассчитанные на основе декадных данных по температуре и осадкам реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды с разрешением 0,25°x0,25° за период с 1989 по 2009 гг.

К таким параметрам относятся:

1. Средняя температура по каждому из 12 месяцев;
2. Средняя годовая температура;
3. Среднемесячное количество осадков для каждого из 12 месяцев;
4. Годовое количество осадков;
5. Количество дней в году со среднесуточной температурой выше 5<sup>0</sup>;
6. Количество дней в году со среднесуточной температурой выше 10<sup>0</sup>;
7. Количество осадков за теплый период (май-октябрь) и количество осадков за холодный период (ноябрь-апрель);
8. Континентальность климата (разница средних температур самого теплого месяца и самого холодного месяца).

Разработан подход к интеграции разнородных пространственно-временных данных, представленных в различных форматах. В рамках этого подхода компоненты системы реализуют сервис-ориентированный интерфейс для доступа к данным. Доступ к данным предоставляется по протоколам, разработанным OGC (Open Geospatial Consortium), в том числе по протоколу картографических сервисов (WMS). Подход позволит использовать имеющиеся наборы данных как с помощью интерфейсов системы, так и непосредственно из специализированных программных приложений, в том числе коммерческих. Все данные системы приведены к единому пространственному разрешению, с использованием регулярной сетки с шагом 0.25<sup>0</sup> по долготе и широте.

Предложен метод построения ансамблей непараметрических алгоритмов для сегментации многоспектральных изображений; дано его теоретическое обоснование. В соответствии с предложенным методом созданы два плотностных (на основе гистограммной оценки и непараметрических оценок Розенблатта – Парзена) алгоритма кластеризации спутниковых данных, не требующие априорных сведений о количестве и вероятностных характеристиках классов. К их преимуществам можно отнести возможность выделения классов сложной формы, устойчивость результатов к изменению настраиваемых параметров и высокое быстродействие. На основе созданных алгоритмов разработан программный инструментарий для обработки спутниковых данных.

На основе WPS-сервера deegree3, распространяемого по лицензии GPL, разработан модуль для интеграции алгоритмов обработки пространственных данных в создаваемую сер-

вис-ориентированную геоинформационную систему. Он осуществляет интерпретацию входных и выходных данных согласно спецификации протокола WPS и выполняет функции контейнера для неограниченного числа WPS-процессов. Архитектура модуля представлена на рисунке 10.

Для обработки данных с помощью WPS-процесса пользователь вводит в клиентском приложении адрес WPS-сервера, после чего ему предоставляется список доступных процессов и их описания (метаданные на естественном языке). Выбрав необходимый алгоритм, пользователь указывает значения входных параметров в соответствии со спецификацией протокола WPS. Например, для алгоритмов классификации входными параметрами являются классифицируемое растровое изображение, обучающая выборка (для обучаемых и полуобучаемых алгоритмов), а также набор параметров, специфичных для конкретного алгоритма. Значениями параметров могут быть как данные, находящиеся на компьютере пользователя, так и результаты выполнения запросов к удаленным WPS/WMS-серверам. В этом случае запрос обрабатывается распределенно, без необходимости сохранения промежуточных результатов.

Эта технология позволяет обеспечить широкому кругу потенциальных пользователей доступ к хранилищу современных наукоемких алгоритмов и вычислительным ресурсам, необходимым для оперативной обработки больших массивов разнородных данных.

На данный момент в виде WPS-процессов реализованы пять эффективных непараметрических алгоритмов, позволяющие решать широкий круг задач, связанных с распознаванием образов и анализом многоспектральных спутниковых данных.

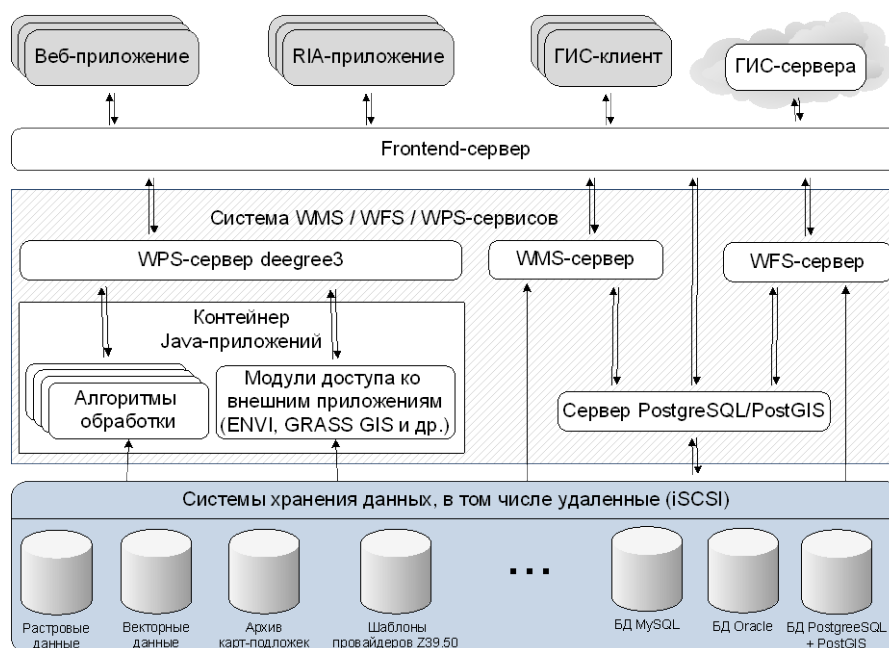


Рис. 10. Структурная схема системы сервисов для работы с пространственными данными

### ***Оценка запасов углерода в почвах бореальных экосистем Западной Сибири с использованием баз данных и дистанционных исследований (ИПА)***

Выполнена оценка запасов органического углерода в почвах ландшафтных провинций бореальной зоны Западной Сибири с использованием информационного обеспечения, разработанного совместно с ИВТ СО РАН и ЦСБС СО РАН. Основа информационной системы включает электронные тематические слои «Растительность» и «Почвы» бореальной зоны Западной Сибири, среднемасштабные почвенные карты ключевых участков, созданные по материалам дешифрирования космических снимков и программные средства для актуализации

и управления базой данных «Углерод в почвах Сибири». Создан макет электронной карты «Запасы углерода в почвах бореальной зоны». Показано, что в границах ландшафтных провинций существенный вклад в формирование общих запасов Сорг, наряду с высокоорганическими торфяными и торфяно-болотными почвами, вносят мелкоотторфованные и минеральные почвы, которые занимают значительные площади и содержат ниже торфяного горизонта от 4 до 10 кг/м<sup>2</sup>, что предполагает довольно высокие запасы Сорг минеральных горизонтов почв бореального биома  $10,7 \cdot 10^8$  т (рис. 11).

По предварительной оценке общий запас Сорг в почвах бореальных экосистем, рассчитанный с использованием базы данных и материалов дистанционных исследований составляет  $83,6 \cdot 10^8$  т соответственно это 28,2% запасов углерода в почвах России или 5,5% его мировых запасов.

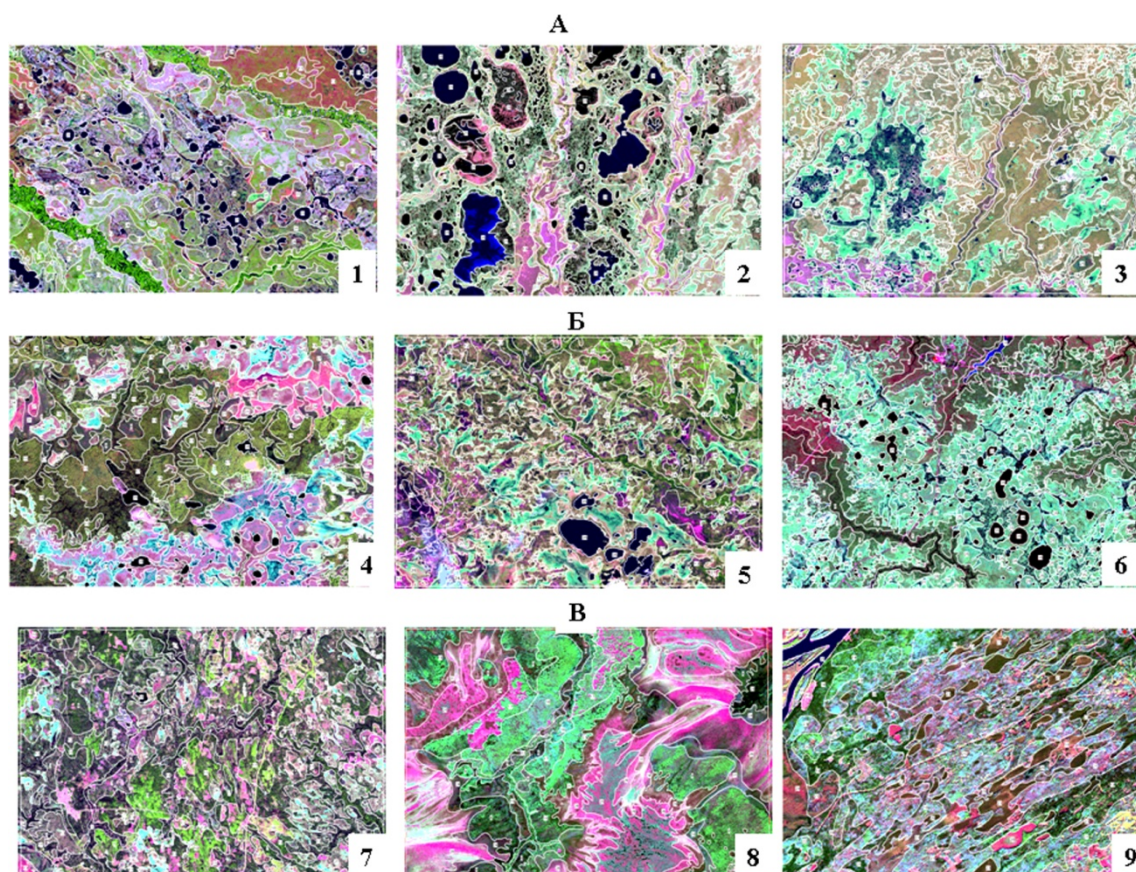


Рис. 11. Среднемасштабные почвенные карты ключевых участков ландшафтных провинций бореальной зоны Западной Сибири, созданные на основе дистанционных исследований. А – северная тайга: 1- Обско-Тазовская, 2 - Сибирских Увалов, 3 – Верхнетазовская. Б – средняя тайга: 4 – Северо-Сосьвинская, 5- Кондинская, 6 – Среднеобская. В – южная тайга: 7 – Нижнетобольская, 8 – Васюганская, 9 – Чулымо-Енисейская

### Оценка потока углекислого газа на земной поверхности по измеренным вертикальным профилям $CO_2$ в приземном слое атмосферы (ИВМ)

Предложен метод для определения потока  $CO_2$  ( $Q_C$ ), использующий точечную модель для концентраций углекислого газа в атмосфере и измеренные на высоких вышках профили концентраций в атмосфере. Показано, что для оценки потока  $Q_C$  достаточны данные измерений концентраций  $CO_2$  на уровне вышки. Выполнен анализ данных измерений концентраций  $CO_2$  на вышке, взятых с сервера <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/towers/>.

Среднемесячные концентрации  $CO_2$ , измеренные в хорошо перемешанной области атмосферного пограничного слоя (АПС) с 400 метровой вышки, отражают постоянно присутствующую разницу в несколько ppm между концентрацией  $CO_2$  в АПС и в свободной тропо-

сфере (СТ) [Helliker, B., Berry, J., Betts, A., Davis, K., Bakwin, P., 2004, Estimates of ABL-scale net carbon dioxide flux in Central Wisconsin. *Transitions of American Geophysical Union*. 84(46)]. Концентрации, измеряемые на высокой вышке, являются результатом процессов на области порядка  $10^4 \text{ км}^2$  [Cleugh, H.A., Grimmond, C.S.B. 2001, Modelling regional scale surface energy exchanges and CBL growth in a heterogeneous, urban-rural landscape. *Boundary layer meteorology*. 98, pp. 1–31].

Метод баланса АПС фокусируется на процессах, которые влияют на баланс  $\text{CO}_2$  в континентальной атмосфере на месячном и сезонном временных масштабах. Значительные (в несколько ppm) и постоянные горизонтальные градиенты концентрации формируются на масштабах в сотни км, а различие в несколько ppm между пограничным слоем высотой 1-2 км и тропосферой над ним присутствует почти постоянно. Поэтому, хотя горизонтальный перенос может вызывать большие изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в отдельные дни, среднемесячные концентрации определяются вертикальным обменом.

Из уравнения баланса  $\text{CO}_2$  в АПС, проинтегрированного от поверхности до максимальной дневной высоты АПС  $H_K$  в предположении, что горизонтальный перенос может не учитываться, получается соотношение для определения потока с поверхности  $Q_C$

$$Q_C = H_K \frac{d\varphi}{dt} + W(C - C_{FT}),$$

где  $C$  – молярная концентрация  $\text{CO}_2$  (мкмоль  $\text{CO}_2$  на моль сухого воздуха, ppm),  $C_{FT}$  – концентрация  $\text{CO}_2$  в СТ,  $\varphi = \frac{1}{H_K} \int_0^{H_K} C dz$ ,  $W$  – величина (по модулю) вертикальной скорости (по модулю) на высоте  $H_K$ .

Эта формула использовалась для вычисления  $Q_C$  по измерениям на Зотинской вышке. Среднесуточные концентрации  $\text{CO}_2$ , измеренные на 300 м, рассматривались как средние концентрации в АПС. Регулярные измерения концентрации  $\text{CO}_2$  в СТ проводились в районе Зотино в 1998-2000 гг. [Lloyd, J., Langenfelds, R.L., Francey, R.G. et. al., 2002, A trace-gas climatology above Zotino, central Siberia. *Tellus, Ser. B*, 54, pp. 749–767]. Разница в концентрациях  $\text{CO}_2$  между морскими станциями и континентальной СТ в общем значительно меньше чем между АПС и СТ. Поэтому, из-за отсутствия прямых измерений  $C_{FT}$  в районе Зотино в 2009 г., использовались данные измерений на Мауна Лоа в 2009 г., подкорректированные на разницу между измерениями на Мауна Лоа и СТ над Зотино в 1998-2000 гг.  $W$  оценивалось как модуль среднесуточной вертикальной скорости, полученной из базы NCEP Reanalysis. Значения скорости интерполировались на высоту пограничного слоя ( $H_K$ ) и координаты Зотинской мачты. Для высоты пограничного слоя  $H_K$  в районе Зотино использовались оценки, полученные с помощью измерений на самолётах в работе [Lloyd, J., Langenfelds, R.L., Francey, R.G. et. al., 2002, A trace-gas climatology above Zotino, central Siberia. *Tellus, Ser. B*, 54, pp. 749–767]. Выполнены пробные расчеты. Расчеты для годового периода не выполнены из-за отсутствия необходимых данных измерений на вышке.

### **Функциональные модели расчета запасов углерода с учетом высоты (ИГ)**

Разработан алгоритм вычисления запаса углерода на основе данных ландшафтной классификации, высоты местоположения и запасов углерода на ключевых участках исследования. Реализуется возможность экстраполяции данных и знаний на территорию, основываясь на идее информационной комплексности географических систем.

Для решения задач оценки углеродного баланса создавались и проверялись функциональные модели связи запасов углерода от высоты местоположения. Если эти связи регламентируются общими закономерностями, то на основе принципов подобия (гомологии) имеется возможность одни кривые трансформировать в другие с учетом специфики местополо-



жения. Географические особенности места задаются размещением объекта в распределении географических явлений на территории по влияющему признаку, в частности, кривой встречаемости ареалов геомов по градиенту высоты. Нормированные по отношению к моде и центрированные относительно некоторой высоты, кривые распределений оказываются близки по форме, а нормированные значения функций распределений - пропорциональны. Это говорит об общности действия законов географического варьирования признаков, когда основная площадь геомов данного вида концентрируется на высоте, соответствующей положению моды, а все отклонения связаны с различием экспозиции, составом материнских пород, влажностью почвы и т.д. Изучены закономерности распределения географических систем ранга геомов по высотному градиенту. Исследования проводились с использованием ГИС ландшафтной карты окружения оз. Байкал и цифровой карты рельефа. Предложена математическая модель функций отклика разных геосистем на влияние комплексных факторов среды (рис.12). На основе полученных кривых распределений ареалов геомов по высоте доказано существование инвариантной функции отклика, обоснован ее аналитический вид и определены правила ее варьирования по географическим ситуациям в соответствии с коррелированным изменением коэффициентов функции.

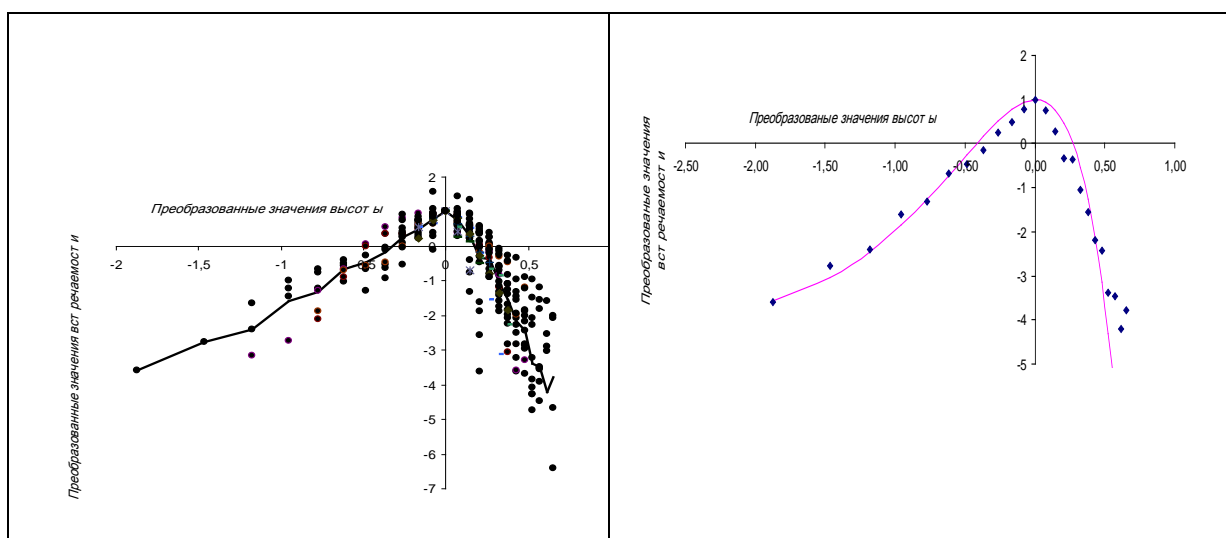


Рис. 12. Нормированные и центрированные логарифмические значения встречаемости различных геомов и линия тенденции их изменения по логарифму высоты (а), сравнение этой тенденции с результатами расчета (б).

При наличии подобных закономерностей требуется одну из этих кривых принять в качестве базы сравнения (инварианта), а остальные восстановить с применением гомотопических индексов. Результатом исследования является карта запасов углерода в фитомассе растительности Прибайкалья (рис. 13), являющаяся производной от ландшафтной карты территории и цифровой карты рельефа и составленная при помощи средств ГИС, реализующих возможности перехода от одних географических характеристик и закономерностей к другим.

### Разложение крупного древесного детрита (ИЛ)

Интенсивность возвратного потока углекислоты из лесных экосистем в атмосферу практически на 90% определяется минерализацией фитодетрита. В его составе такие грубые древесные остатки, как сухостой и валеж являются наиболее медленно разлагающимся материалом. В суммарном запасе детрита в лесотундре Центральной Сибири на них приходится от 8 до 29%, в северотаежных лесах - от 10 до 23%, в южнотаежных - от 28-30% (в березняках) до 48-62% (в пихтачах). Различия хвойных и лиственных видов древесных растений по химическому составу древесины (начиная от общего содержания различных минеральных веществ и органических соединений и заканчивая особенностями состава фенолов, участвующих в формировании молекулы лигнина) и по ее физическим свойствам обуслов-

ливают разный характер разложения грубых древесных остатков этих групп видов и, как следствие, различия в скорости разложения.

Исходя из этих предпосылок, связь скорости разложения с основными климатическими условиями анализировалась отдельно для древесного детрита лиственных и хвойных видов. При этом для хвойных видов выделялись две фракции грубых древесных остатков (сухостой и валеж), скорость разложения которых также существенно различается вследствие различного положения стволов относительно поверхности почвы.



Рис. 13. Карта углеродного запаса потенциального (соответствующего коренному состоянию геосистемы) растительного покрова Прибайкалья.

В результате проведенного анализа было установлено, что величина скорости разложения грубых древесных остатков лиственных видов, собранных в базе данных, на 44% определяется периодом времени, в течение которого проводилось наблюдение, или иными словами, зависит от периода разложения этих древесных остатков. Для хвойных видов, продолжительность разложения определяет только 20% вариации скорости разложения ( $R=0.20$ ), однако это влияние также достоверно. В обоих случаях скорость существенно снижалась с увеличением времени, прошедшего от момента начала разложения. В связи с этим возникла необходимость первоначального анализа динамики скорости разложения древесного детрита за время от начала разложения.

Полученные модели показали, что как для хвойных так и для лиственных видов эта зависимость имеет вид параболы (рис. 14). Скорость разложения грубых древесных остатков стремительно снижается в течение первых 5-8 лет разложения для хвойных видов, и в течение 10-12 лет для лиственных. После этого снижение скорости разложения продолжается, но становится уже незначительным в течение десятков лет. Такой ход кривой зависимости константы разложения от периода разложения позволяет установить рекомендуемую минимальную продолжительность экспериментов по разложению грубых древесных остатков, которая может давать более достоверные оценки скорости разложения древесного детрита. Как для хвойных, так и для лиственных видов период наблюдения за разложением грубых древесных остатков должен составлять не менее 20 лет.

Полученные модели позволяют также оценить среднюю скорость разложения и рассчитать продолжительность среднего периода полуразложения древесных остатков этих групп видов. Для лиственных видов константа средней скорости разложения составляет  $0,04 \text{ год}^{-1}$ , а соответствующий ей период полуразложения оценивается в 17,5 лет. Для хвойных видов в целом средняя скорость разложения несколько ниже и константа скорости разложения составляет только  $0,025 \text{ год}^{-1}$ , а период полуразложения соответственно увеличивается и достигает 26 лет.

Поскольку значительная часть вариабельности данных по скорости разложения древесного детрита определяется периодом его разложения, то в модели зависимости скорости разложения от климатических факторов в качестве необходимого члена был введен натуральный логарифм продолжительности периода разложения.

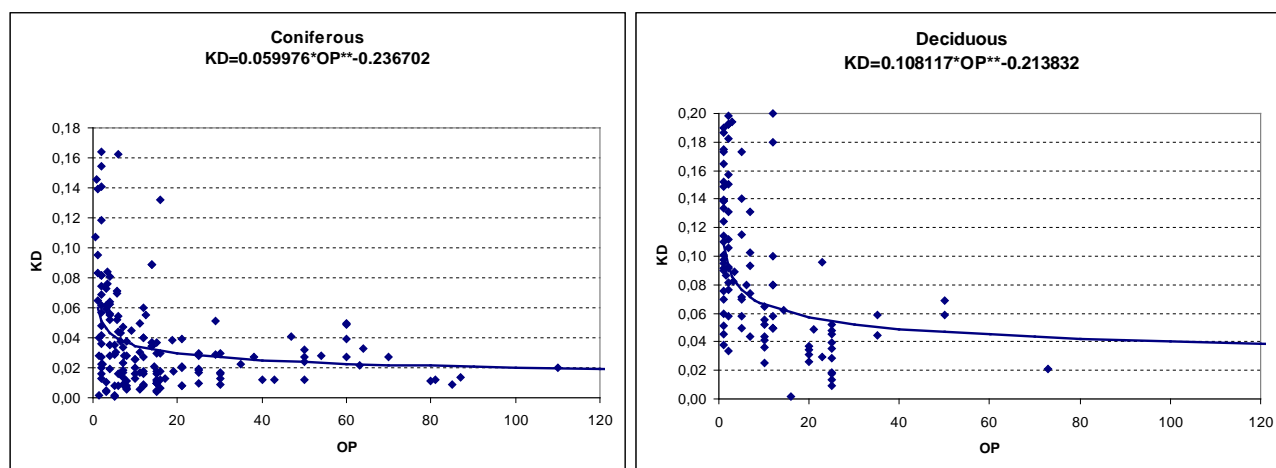


Рис. 14. Динамика константы разложения (KD) для валежа хвойных (Coniferous) и лиственных (Deciduous) видов. (OP – время от начала разложения, лет).

Для грубых древесных остатков лиственных видов была установлена достоверная зависимость скорости разложения от величины гидротермического коэффициента за период со среднесуточной температурой воздуха выше  $10^{\circ}\text{C}$ :

$$\ln k = -3.0659 - 0.4854 \cdot \ln OP + 1.4652 \cdot \text{GTK}_{10} - 0.3631 \cdot \text{GTK}_{10}^2, (R^2=0.43, R=0.66, p<0.05), (1)$$

где  $k$  – константа скорости разложения,  $\text{год}^{-1}$ ; OP – продолжительность разложения, лет;  $\text{GTK}_{10}$  – гидротермический коэффициент за период со среднесуточной температурой воздуха выше  $10^{\circ}\text{C}$ .

Эта зависимость имеет вид гиперболы с максимумом в точке со значением  $\text{GTK}_{10}=2.02$ . Величина  $\text{GTK}_{10}$  для данных по разложению валежа лиственных видов, собранных в базе, варьирует от 1.26 до 3.30. При таких значениях рассчитанная по модели константа скорости разложения равна 0.038 и 0.0618, соответственно, что находится в пределах значений полученных экспериментальным путем для этих регионов.

Зависимость подобного вида получена также для скорости разложения грубых древесных остатков лиственных видов в зависимости от среднегодового количества осадков:

$$\ln k = -2.4579 - 0.4732 \cdot \ln OP + 0.00136 \cdot \text{Prec} - 0.5584 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Prec}^2 (R=0.66, R^2=0.43, p<0.05), (2)$$

где Prec – среднегодовое количество осадков, мм.

Однако данная модель, в отличие от модели (1) никоим образом не учитывает тепловой режим территории, который может в значительной степени нивелировать влияние количества осадков за счет увеличения или снижения их испаряемости. Константы разложения, полученные с помощью этой модели, значительно занижены, по сравнению с экспериментальными.

Тесная зависимость скорости разложения древесных остатков лиственных видов от гидротермических условий в самый теплый период года, вероятно, обусловлена тем, что именно сочетание тепла и влаги в данный период может быть определяющим для всего процесса разложения древесины, тем более что лиственные виды деревьев произрастают в основном в

относительно теплом климате, где продолжительность периода с температурой выше 10<sup>0</sup>С значительна.

Для хвойных видов связь константы скорости разложения с климатическими условиями носит более сложный характер. Скорость разложения грубых древесных остатков хвойных видов зависит от сочетания гидротермических условий в течение различных промежутков безморозного периода:

$$k=0.1133 - 0.01832*\ln OP - 0.06130*GTK_0 + 0.1218*GTK_5 - 0.1329*GTK_{10} + 0.00613*GTK_0^2 - 0.01879*GTK_5^2 + 0.0472*GTK_{10}^2 \quad (R=0.59, R^2=0.35, p<0.05), \quad (3)$$

где k – константа скорости разложения, год<sup>-1</sup>; OP – продолжительность периода разложения; GTK\_0 – гидротермический коэффициент за период с температурой воздуха выше 0<sup>0</sup>С, GTK\_5 – гидротермический коэффициент за период с температурой воздуха выше 5<sup>0</sup>С, GTK\_10 – гидротермический коэффициент за период с температурой воздуха выше 10<sup>0</sup>С.

Анализ данной модели показывает, что в течение безморозного сезона выделяется 3 периода, в течение которых влияние гидротермических условий проявляется по-разному. Для периода со среднесуточной температурой выше 0 и 10<sup>0</sup>С ветви гиперболы направлены вверх с минимумом в точках со значением GTK 5 и 1.41, соответственно. Увеличение или снижение гидротермического коэффициента ведет к увеличению скорости разложения грубых древесных остатков. Для периода с температурой выше 5<sup>0</sup>С максимум гиперболы находится в точке соответствующей GTK = 3.24. Увеличение или снижение этого показателя ведет к снижению скорости разложения.

Поскольку предполагалось, что GTK в течение различных промежутков безморозного периода, возможно, являются величинами, тесно связанными между собой, проанализирована степень связи показателей GTK в течение периодов со среднесуточной температурой воздуха выше 0<sup>0</sup>С, 5<sup>0</sup>С и 10<sup>0</sup>С.

Установлено, что достаточно сильная линейная зависимость существует только между GTK за период с температурой выше 0<sup>0</sup>С и выше 5<sup>0</sup>С (R=0.91). Связь между гидротермическими условиями в течение всего безморозного периода и самого теплого периода в течение года более сложная, линейный коэффициент корреляции составляет только 0.53. Между GTK за период с температурой выше 5<sup>0</sup>С и выше 10<sup>0</sup>С связь несколько более сильная (R=0.72), однако она лучше описывается не линейной функцией, а полиномом второго порядка (R=0.74) (рис. 15).

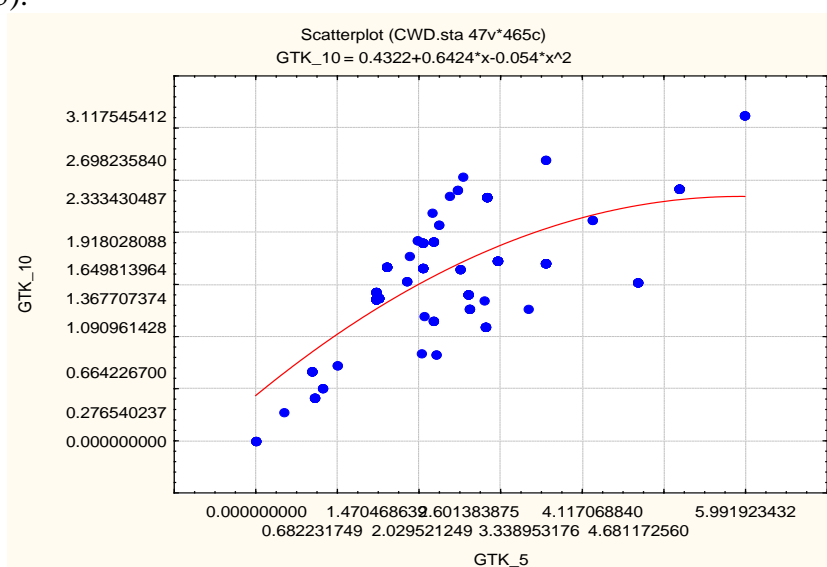


Рис. 15. Зависимость между гидротермическими коэффициентами за периоды со среднесуточной температурой воздуха выше 5<sup>0</sup>С и выше 10<sup>0</sup>С.

Сухостой хвойных видов разлагается в целом с более низкой скоростью и демонстрирует более тесную связь с климатическими параметрами. Одна из полученных моделей показыва-



ет зависимость константы скорости разложения сухостоя от сочетания гидротермических условий в течение различных промежутков теплого периода года:

$$k=0.07315-0.1084*GTK_0+0.1893*GTK_5-0.1098*GTK_{10} \quad (R=0.85, R^2=0.73, p<0.05) \quad (4)$$

Как и в случае разложения валежа, влияние гидротермических условий в течение безморозного и в течение самого теплого периода года имеет отрицательное влияние на величину константы скорости разложения, а период с температурой выше 5<sup>0</sup>С положительно влияет на процесс разложения. При этом наиболее важными для сухостоя хвойных видов являются гидротермические условия в течение всего безморозного периода:

$$k=0.5447-0.4856*GTK_0+0/1014*GTK_0^2 \quad (R=0.85, R^2=0.73, p<0.05) \quad (5)$$

Наихудшими условиями для разложения сухостоя, таким образом, является отношение количества осадков к температуре, соответствующее ГТК, равному 2.39. Скорость разложения сухостоя, рассчитанная по данной модели, составляет 0.0151 год<sup>-1</sup> для Хабаровска, 0.0371 для С.-Петербурга, 0.00476 для Красноярска и 0.00654 для Иркутска. Экспериментально полученные константы скорости разложения для этих регионов составляют 0.035, 0.0270-0.0460, 0.003-0.020, и 0.0043-0.0100, соответственно.

К сожалению, данные по разложению сухостоя лиственных видов очень немногочисленны, что не позволило нам провести подобный анализ связи скорости разложения с климатическими условиями для этой группы видов.

В дополнение к анализу связи скорости разложения с климатическими условиями был проведен анализ зависимости скорости разложения древесного валежа от его размеров (рис. 16). Скорость разложения древесины как хвойных, так и лиственных видов, существенно снижается с увеличением диаметра ствола.

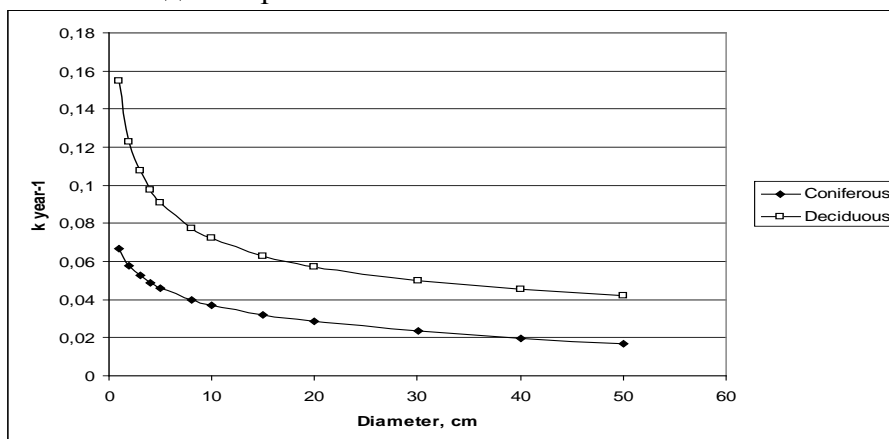


Рис. 16. Зависимость константы скорости разложения стволового валежа от его диаметра.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- Одним из наиболее значимых факторов, определяющих динамику скорости разложения грубых древесных остатков, является продолжительность периода разложения. Скорость разложения закономерно снижается с увеличением времени. Это вполне объяснимо, исходя из химического состава грубых древесных остатков. Утилизируемые, в первую очередь, легкогидролизуемые органические соединения обеспечивают высокую скорость разложения на начальных этапах процесса, однако по мере истощения их запасов микробный комплекс переключается на более сложные соединения, деструкция которых требует уже более значительных затрат энергии, что ведет к снижению общей скорости разложения древесины. Выбор нами периода полуразложения древесины в качестве основного промежутка времени для установления скорости разложения обусловлен, в первую очередь тем, что поскольку в среднем древесина на 50% состоит из целлюлозы, и по 25% приходится на гемицеллюлозы и лигнин (Уголев и др., 2004), то предполагается, что период полуразложения определяет почти полную потерю запаса гемицеллюлозы и частичной потери целлюлозы и лигнина. Это ведет к значительному снижению скорости разложения в последующие этапы и снимает влияние видовых особенностей древесины на скорость разложения.

2. Из климатических факторов, влияющих на скорость разложения грубых древесных остатков, основным является сочетание гидротермических условий в определенные промежутки вегетационного периода. Для лиственных видов наиболее значимым для разложения является период со среднесуточной температурой выше  $10^{\circ}\text{C}$ . Для хвойных видов решающее значение для процесса разложения имеют все выделяемые в течение безморозного времени периоды. Однако их влияние на скорость разложения не однозначно.

3. Скорость разложения сухостоя определяется сочетанием гидротермических условий в течение всего безморозного периода. При этом скорость разложения сухостоя ниже таковой для валежа, разлагающегося в тех же самых условиях, что является следствием особенности расположения стволов относительно поверхности почвы. Этим определяется и более тесная зависимость скорости разложения этого компонента грубых древесных остатков от сочетания условий тепла и увлажнения.

### **Интенсивность основных потоков углерода в лесах на территории Центральной Сибири в пределах охвата высотной вышки ZOTTO (ИЛ)**

Комплексные исследования Института леса СО РАН биосферной роли бореальных лесов на Енисейском меридиональном трансекте позволили получить количественные оценки основных потоков углеродного цикла для лесных экосистем Центральной Сибири. Методические подходы при анализе цикла углерода могут быть объединены в несколько групп: камерные измерения, метод вихревых пульсаций (микрометеорологический), статистический, биометрический.

Измерение потоков углекислоты микрометеорологическим методом в 200-летнем сосновом лесу на экспериментальной станции Зотино ( $60^{\circ}53'$  с.ш.,  $89^{\circ}38'$  в.д.), проведенное с июня 1998 г. по октябрь 2000 г. Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в тесном сотрудничестве с Институтом биогеохимии Макса Планка в Йене (Германия), предполагало проведение наземных биометрических исследований с целью сопряжения оценок, характеризующих интенсивность основных потоков углеродного цикла. Такие исследования были проведены: в 2006 г. О.В. Трефиловой была защищена кандидатская диссертация на тему «Годичный цикл углерода в сосняках средней тайги Приенисейской Сибири» (руководитель Ведрова Э.Ф.). Кроме этого, в экосистемах основных лесообразователей Центральной Сибири (сосна, кедр, ель, пихта, береза), входящих в охват измерений станции действующей высотной мачты ZOTTO, сотрудниками Института леса под руководством С.В. Верховца проведены работы по таксации, инвентаризации и мониторингу (в т.ч. спутниковому) для расчетов полного углеродного бюджета. Результаты расчетов показали, что средневзвешенные оценки интенсивности чистой первичной продукции, гетеротрофного потока и чистой экосистемной продукции для лесных экосистем Центральной Сибири на территории охвата высотной мачты составляют, соответственно, 1.98, 1.77 и 0.21 тС/(га год).

### **Оценка запасов парникового газа метана в угольных шахтах (ИУУ)**

В 2010 году выполнены работы по оценке запасов парникового газа метана в угольных шахтах. На основании обработки экспериментальных данных установлено подобие поверхностей распределения метана (газонасности угольных пластов) и его залегания (рис. 17). С учетом проведенных численных экспериментов, можно делать прогноз распределения метана в угольных пластах, имея только характеристики залегания. Установленные закономерности следует подтвердить на основе более представительной экспериментальной выборке. Однако это связано с дополнительным шахтным экспериментом, что потребует значительных финансовых вложений.

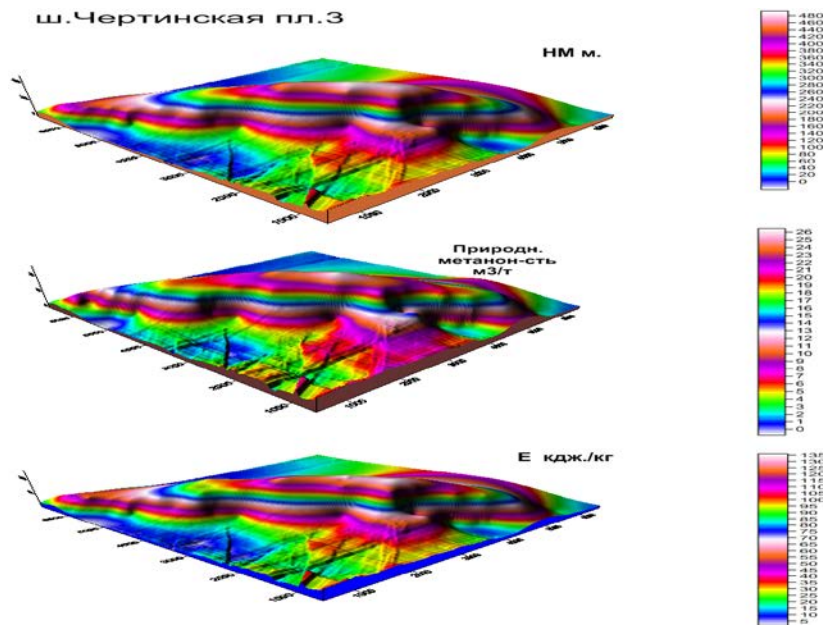


Рис. 17. Поверхности залегания угольного пласта (Нм), природной метаносности и приведенной энергии для пласта 3 шахты Чертинская.

Анализ спутниковых систем для получения информации об атмосферном метане показывает, что преобладают лимбовые схемы измерений. Такие схемы эффективно работают в стратосфере и выше. Спутниковые системы, позволяющие обнаружить метан в тропосфере немногочисленны: HIRS, IASI, IMG, MIPAS, SCIAMATCHY, TES. Отдельные спутниковые приборы мало пригодны для количественных измерений применительно к поставленной задаче ввиду большого угла поля зрения прибора, что сильно увеличивает пространственные размеры излучающего пиксела на поверхности Земли (более  $10 \text{ км}^2$ ). Наиболее подходящий режим измерений – надирный, имеют приборы HIRS (его более поздний аналог MODIS) и TES.

Измеряемые в ходе эксперимента величины связаны с характеристиками поглощения. Так, например, в задаче измерения собственного излучения Земли и атмосферы эта связь определяется известным уравнением переноса, которое имеет вид:

$$I_V(h, \varphi) = \varepsilon_V B_V(T_0) P_V(h_0, h, \varphi) + \int_{h_0}^h B_V(T(z)) \frac{\partial P_V(z, h, \varphi)}{\partial z} dz, \quad (1)$$

$$P_V(h_0, h, \varphi) = \int_{\Delta\nu} A(\nu, \nu') P(\nu', h_0, h, \varphi) d\nu'; \quad P(\nu', h_0, h, \varphi) = \exp\left\{-\frac{1}{\cos(\varphi)} \int_{h_0}^h \alpha(\nu', z) dz\right\},$$

где  $P_V(h_0, h, \varphi)$  - функция пропускания атмосферы в слое  $[h_0, h]$  на трассе с зенитным углом  $\varphi$ ,  $A(\nu, \nu')$  - аппаратная функция измерительного прибора,  $B_V(T_0)$  - функция Планка,  $P(\nu, h_0, h, \varphi)$  - спектральное пропускание на частоте  $\nu$ ,  $\alpha(\nu, h)$  - объемный коэффициент поглощения газовых составляющих атмосферы:

$$\alpha(\nu, h) = \sum_{i=1}^{N_g} K_i(\nu, h) \rho_i(h), \quad (2)$$

здесь  $K_i(\nu, h)$ ,  $\rho_i(h)$  - коэффициент поглощения  $i$ -ым газом на единицу концентрации, профиль концентрации в атмосфере и  $N_g$  - число газов.

При прохождении на атмосферных трассах излучения искусственных или естественных источников излучения (Солнце, Луна и др.), уравнение переноса приобретает вид:

$$I_V(\varphi) = \int_{\Delta\nu} A(\nu, \nu') I_O(\nu) P_{V'}(h_0, h, \varphi) d\nu', \quad (3)$$

где  $I_O(\nu)$  - спектральное распределение интенсивности Солнечного излучения на входе в атмосферный канал.

Приведенные выше уравнения (1-3) показывают, что связь концентрации исследуемого газа с измеряемым сигналом разнообразна и определяется схемой проведения эксперимента (трасса вертикальная, наклонная, горизонтальная), источником излучения (монохроматический, широкополосный, и др.), базированием приемной системы и др. Разнообразие схем проведения газоаналитического эксперимента определяет и количество схем обращения данных измерений относительно искомых концентраций газов.

### Исследование возможности измерения выбросов метана из шахт со спутников.

Согласно работе [Потапов В.П., Мазикин В.П., Счастливец Е.Л., Вашлаева Н.Ю. Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: Наука. 2005. 652 с.], концентрация метана в районе выброса может достигать  $50 \text{ мг/м}^3$ , что составляет примерно 1500 ppm, согласно формуле пересчета

$x[\text{ppm}] = x[\text{г/м}^3] \cdot R \cdot T \cdot 10^{-3} / (P_a \cdot \mu)$ ,  $R = 8.314 \cdot 10^7$ ,  $\mu = 16$ ,  $P_a = 1$ . Видно, что примерно в 1000 раз величина в эпицентре выброса превышает фоновое значение концентрации метана. Площадь охватываемая выбросом занимает несколько квадратных километров. Высота подъема метанового облака не превышает 500 м. Для этих условий нами было выполнено моделирование пропускания метана по всей толщ атмосферы для трех ситуаций: 1 – фон (1.7 ppm), 2 – 10 ppm и 3 – 1000 ppm. Результаты моделирования приведены на рис. 18. На рисунке приведено сравнение пропусканий всей толщи атмосферы в полосе поглощения метана для трех ситуаций: 1 – фоновая концентрация (сплошная линия), 2 – в приземном слое 0-1 км концентрация метана увеличена до 10 ppm, 3 – в приземном слое 0-1 км концентрация метана увеличена до 1000 ppm.

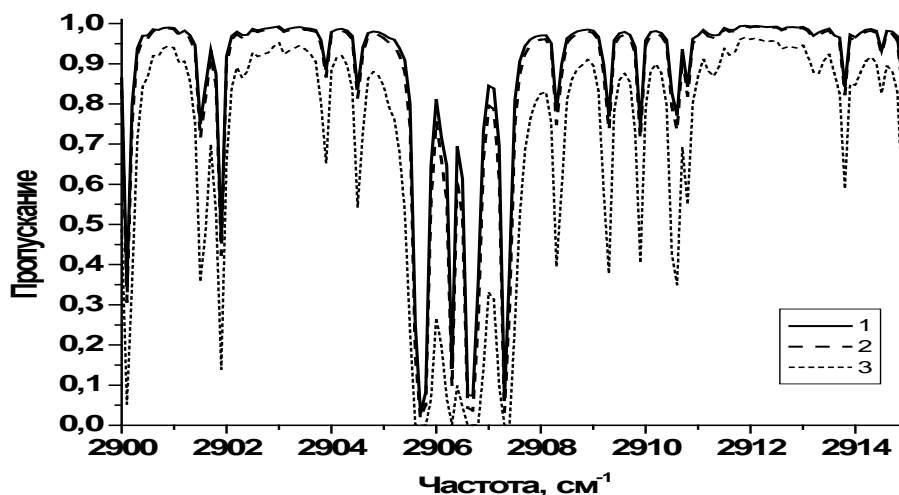


Рис. 18. Пропускание всей толщи атмосферы в полосе поглощения метана при трех ситуациях: 1 – фоновая концентрация (сплошная линия), 2 – в приземном слое 0-1 км концентрация метана увеличена до 10 ppm, 3 – в приземном слое 0-1 км концентрация метана увеличена до 1000 ppm.

Из рисунка видно, что первые две ситуации практически не различимы при измерениях из космоса со спутников. Третья ситуация (1000 ppm) хорошо отличается от первых двух. Однако, такая концентрация реализуется в крайне небольшом пространственном масштабе (не более  $1 \text{ км}^2$ ). Поэтому, возможно обнаружение только очага выброса, а его распространение

ние обнаружить невозможно (только при значительных концентрация в шлейфе). Также трудно реализовать разделение источников, если они расположены в непосредственной близости (до 3 км). В последнее время ведутся работы по созданию приборов относительно высокого спектрального ( $0.1 \text{ см}^{-1}$ ) и пространственного (менее  $1 \text{ км}^2$ ) разрешения. Например, работающий сейчас прибор MODIS имеет 36 спектральных каналов, часть из которых в надире имеет наземный пиксел  $0.25 \times 0.25 \text{ км}^2$ .

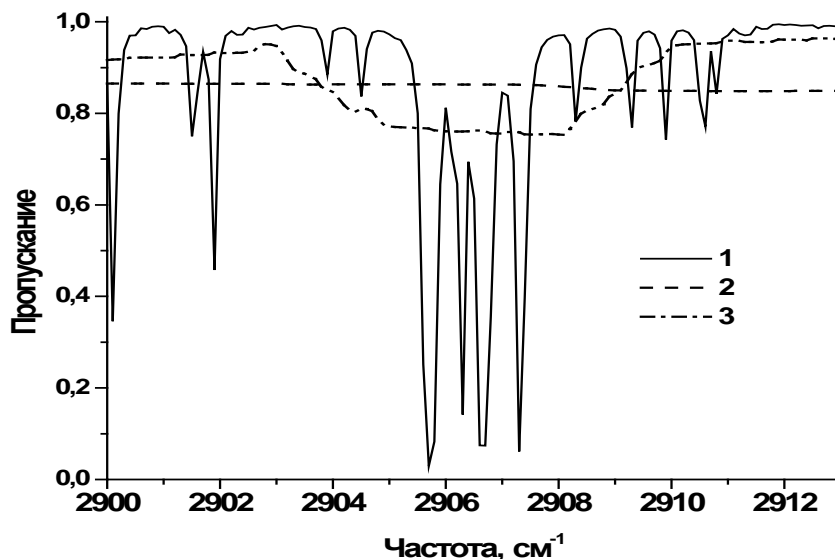


Рис. 19. Пример использования фильтров различной спектральной ширины. 1 – монохроматические измерения, 2 – ширина фильтра (пунктир)  $5 \text{ см}^{-1}$ , 3 - ширина фильтра (точка-пунктир)  $15 \text{ см}^{-1}$ .

На рис. 19 приведен анализ спектрального разрешения спутниковых приборов на возможность обнаружения метана. На рисунке приведены три кривые для различных ширин спектральных фильтров: (монохромат,  $5 \text{ см}^{-1}$  и  $15 \text{ см}^{-1}$ ) при приземной концентрации метана в  $1000 \text{ ppm}$ . Видно, что грубое ( $15 \text{ см}^{-1}$ ) спектральное разрешение значительно снижает возможности обнаружения метана на поверхности Земли.

На рисунке 20(А, Б) приведены реальные данные измерений уходящего излучения с территории Кемеровской области с разрешением  $1 \text{ км}^2$  для трех каналов прибора AVHRR спутника NOAA. Хотелось бы отметить некоторые условия, при которых возможно обнаружение приземного метана с достаточной для практики точностью: 1) калибровка (спутниковые данные по ходу полета калибруются на эталонный источник, однако на Земле создать такой полигон практически сложно); 2) привязка (на рисунках хорошо видно, что привязка рек, городов проводится не совсем точно из-за того, что земной шар вращается во время полета спутника и передачи информации, что приводит к смещениям реальной информации относительно реперов (русла рек, очертания озер или береговой линии)). Поэтому необходимо проводить привязку получаемой информации по реперам исследуемой территории.

В Институте угля и углехимии СО РАН разработана методика оценки запасов метана в выработанном пространстве шахты. Методика включает расчет диффузии метана в выработанное пространство закрытых угольных шахт по критерию тяжелого и опасного видов состояния промышленных и жилых объектов на поверхности ликвидируемых горных отводов.

На основе теории массопереноса по механизму фильтрации и газовой диффузии произведен расчет количества свободного метана в пределах горных отводов ликвидированной шахты «Центральная» (2-й район) и закрытой шахты «Северная» (1-й район) до глубины 360 метров от поверхности. Эти районы горных отводов находятся в городской черте г. Кемерово и по нашим расчетам содержат в свободном состоянии свыше  $50 \text{ млн. м}^3$  метана. Резерв-

ные запасы сорбированного метана в угольных пластах оцениваются в 1292 млн.м<sup>3</sup>, из них 10% считаются промышленно извлекаемыми.

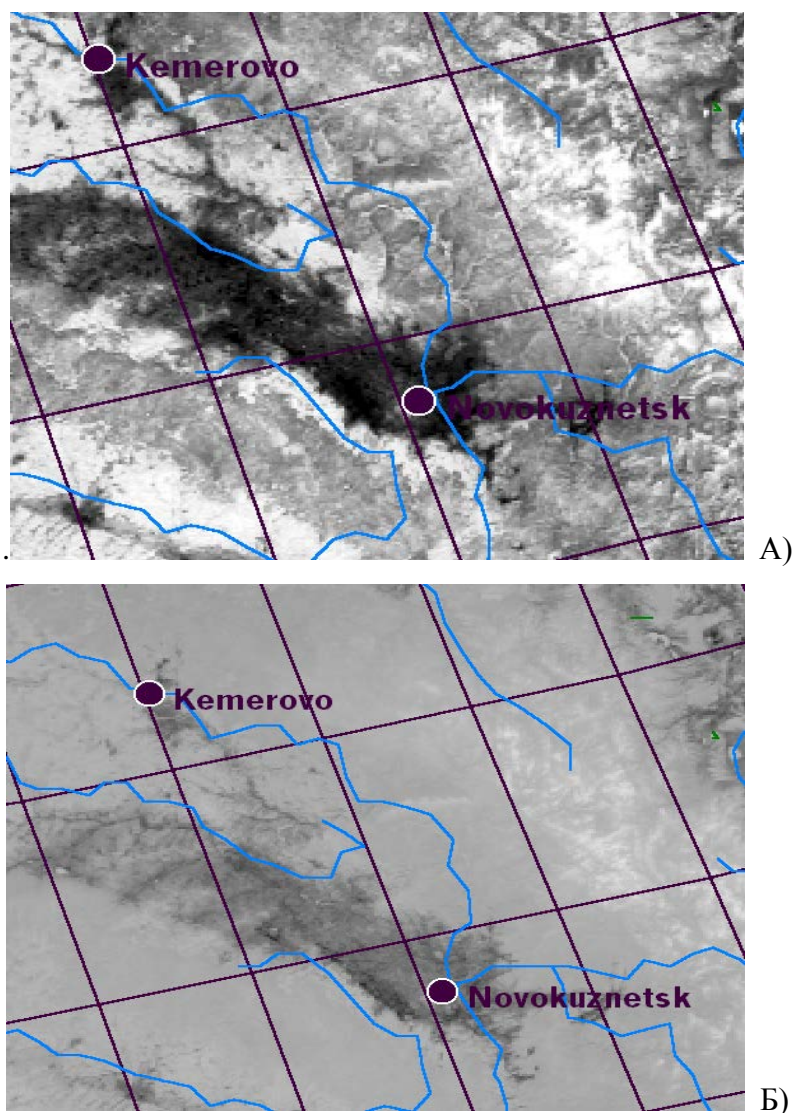


Рис. 20. Реальные данные измерений уходящего излучения на территории Кемеровской области прибором AVHRR спутника NOAA. А) – 1-ый канал, Б) – 3-ий канал.

### Универсальная компьютерная онтология и ее апробация (ИЦиГ)

При моделировании экосистем большого размерного класса, где на первый план выходит сам факт наличия круговорота веществ (в частности, углерода) на определенной территории, доминирует функциональный подход. Основные блоки, между которыми происходит перенос вещества, в моделях стандартизированы (например, литомассы, педомассы, мортмассы, биомассы, водные массы и аэромассы) и отражают обобщенные показатели, полученные на основе характеристик, снятых через определенные промежутки времени с различных участков земной поверхности, горизонтов почв, аэромасс и т.д. Поэтому дальнейшая детализация блоков часто нецелесообразна или невозможна из-за фрагментарности и/или отсутствия данных для выделяемых подблоков.

Разумное приближение к портретной детализации, определяемое задачами моделирования, остается актуальным для экосистем малой размерности или экосистем, включающих ограниченное число объектов или рангов объектов (например, озеро, участки древостоя), взаимодействия между которыми могут быть измерены и/или оценены. Особенностью работы с такими системами является нечетко формализованная терминологическая база. Стандарти-



зация в данном случае должна касаться не набора выделяемых блоков, а онтологии - описания предметной области. Гибкая онтология позволяет аккумулировать описания различных экосистем и применять для их анализа стандартные методы (химико-кинетический подход, методы теории графов, сетей Петри и т.д.).

В 2006 году были предложены концептуальные онтологии для описания макродинамики (изменение структуры графа взаимодействий в экосистеме) и микродинамики (фиксированная структура графа экосистемы при изменении «веса» отдельных ребер или вершин) экосистем [Сергеев М.Г., Сулов В.В., Мигинский Д.С. и др. Опыт создания базы данных для описания экосистем с использованием сетевых технологий // Биоразнообразие и динамика экосистем / Под ред. В.К. Шумный, Ю.И. Шокин, Н.А. Колчанов, А.М. Федотов. Новосибирск, 2006. - С. 95 – 116.]. Прямое перенесение этих онтологий в компьютерную информационную систему влекло за собой трудности, связанные с невозможностью реконструкции сетевой модели экосистемы с помощью двух онтологий одновременно. Таким образом, возникла потребность в разработке общей универсальной компьютерной онтологии. В ходе ее разработки выявлены ключевые объекты в концептуальных обоих онтологиях описания макродинамики и микродинамики экосистем, обобщены и уточнены различия ключевых объектов. В результате, разработана компьютерная онтология для комплексного описания макро- и микродинамики экосистем (рис. 21).

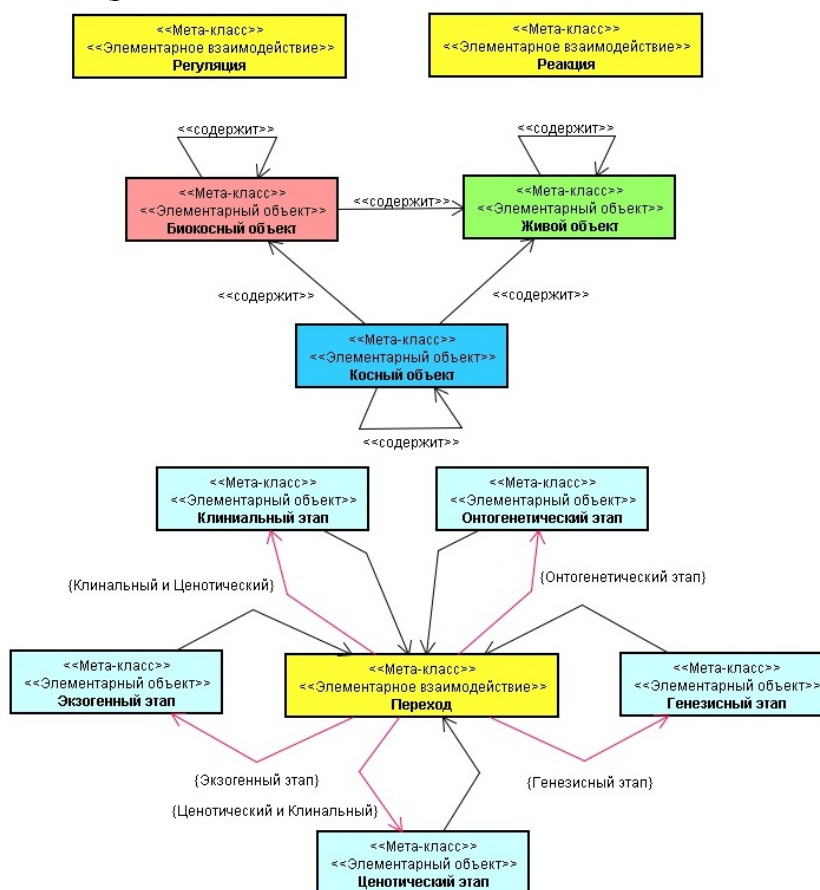


Рис. 21. Разработанная компьютерная онтология для описания макро- и микродинамики экосистем.

Онтология делится на элементарные объекты (ЭО) и элементарные взаимодействия (ЭВ) между ними и включает в себя следующие наборы объектов: (1) макро- и микродинамика (косный объект, живой объект, биосферный объект); (2) макродинамика (экзогенный этап, ценотический этап, генезисный этап, онтогенетический этап, клиниальный этап); (3) взаимодействия (регуляция, реакция, переход (только для этапов)). Каждый из объектов онтологии обладает набором рангов, характеризующих элементы сетевой модели (уникальные параметры). Реакции и регуляции обладают характером взаимодействий (трофическая, информационная, онтогенетическая и т.п.), которые можно уточнять и расширять с помощью специа-

лизированного средства - Ontology Manager. Всего насчитывается 10 типов взаимодействий для реакций и 5 типов для регуляций. Для описания сетевых моделей экосистем с учётом их макродинамики было сохранено понятие этапов.

EcoNetStudio и разработанная нами комплексная онтология были применены для визуальной реконструкции ряда сетевых моделей экосистем. Одной из них является экосистема содово-соленого озера №48. Это озеро входит в группу 10 озёр Купинского и Баганского районов Новосибирской области. Озёра входят в Чано-Кулундинскую область, разделенную на Западно-Барабинский, Восточно-Барабинский и Кулундинский геоморфологические районы. Реконструированная сетевая модель, построенная на основе ранее описанной онтологии, представлена на рис. 22 и включает в себя следующие элементы:

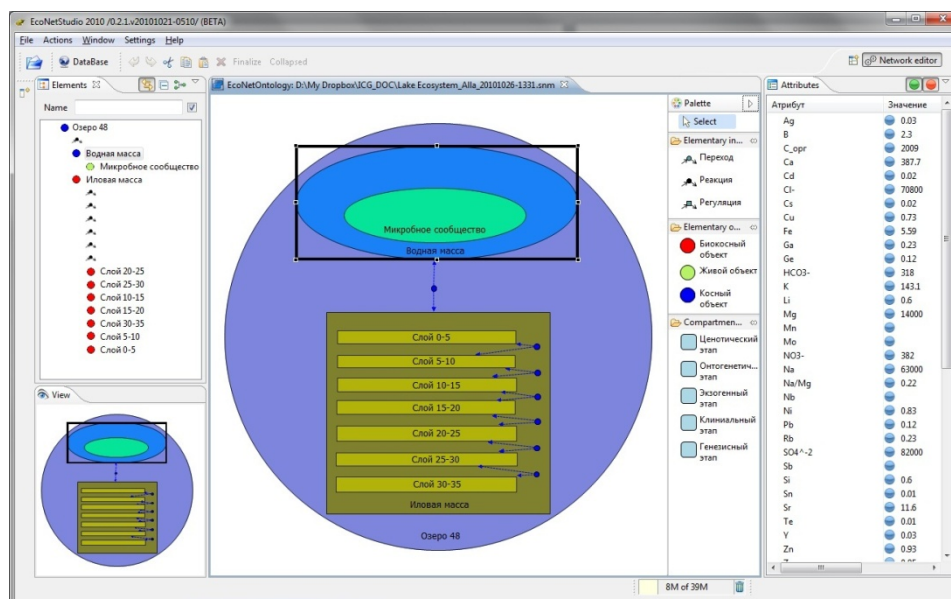


Рис. 22. Сетевая модель экосистемы озера №48, созданная в EcoNetStudio.

1. Озеро (компартмент);
2. Водная масса (компартмент);
3. Иловая масса (компартмент);
4. Микробное сообщество (компартмент);
5. 7 горизонтов (слоев) ила (каждый слой - компартмент);
6. Процессы переноса углерода и обменные геохимические процессы.

### Понятийно-терминологическая база для задач, связанных с балансом углерода (НГУ)

Продолжен анализ понятий и терминов, используемых для характеристики круговорота углерода. Дополнен их тезаурус, включающий более 160 терминов, для которых приведены определения и характеристики связей между ними (тип объекта, синонимия, включение, соподчиненность и т.п.), а также англоязычные эквиваленты.

### Анализ опубликованных данных по круговороту углерод в мезозое (НГУ)

Мезозой (250–65 млн лет) – одна из самых интересных эпох в истории Земли, как известно, характеризуется несколькими ключевыми событиями:

- 1) Распад Пангеи и расхождение континентальных блоков, начало постепенного процесса формирования современных океанов (в первую очередь Атлантического) и континентов;
- 2) Становление разнообразия диapsидных рептилий, в первую очередь, различных групп динозавров и птиц;
- 3) Появление основных эволюционных линий млекопитающих;



- 4) Становление основных эволюционных линий покрытосеменных растений.
- 5) Планктонный взрыв в середине мела, связанная с ним радиация илоедов и прикрепленных фильтраторов и формирование меловых толщ;
- 6) Биоценотический кризис середины мела, связанный с распространением антофильных групп насекомых.
- 7) Великое меловое вымирание (на границе мела и палеогена).

Принято расчленение данной эры на три периода: триас (250–200 млн лет), юра (200–145) и мел (145–65 млн лет).

Опубликованные данные по круговороту углерода в мезозое, с одной стороны, достаточно многочисленны и разнообразны, с другой, носят в основном качественный характер. Существенно меньше работ, в которых приводятся количественные оценки, в том числе расчеты на основе тех или иных моделей.

Считается, что вулканическая активность на границе перми (последний период палеозоя) и триаса способствовала увеличению содержания углекислого газа в атмосфере и потеплению, последнее стимулировало разрушение психросферы (сохранявшейся со времени оледенения конца карбона–начала перми) и дегазации газогидратов и, соответственно, привело к дальнейшему возрастанию концентрации углерод-содержащих газов [Чумаков, 2004б]. По геохимическим балансовым оценкам количество углекислого газа в атмосфере возросло в несколько раз [Berner, Kothalava, 2001]. Такой уровень сохранялся на протяжении всего мезозоя.

Общая картина перестроек круговорота углерода в значительной степени определяется балансом силикатного выветривания на суше и дегазации литосферы [Donnadieu et al., 2008]. Стимулирующее воздействие на выветривание оказывают наземные растения. Кроме того, сказывается изменение круговорота воды, изменение альбедо (в том числе в результате варьирования взаимоотношений суши и океана, открытых и покрытых растительностью поверхностей суши), а также «грубостью» (roughness) континентов.

Моделирование показывает, что изменения почти не зависят от динамики собственно биомов, а определяются их общими свойствами, в том числе пространственным распределением (соответственно, физико-географическими условиями) [Donnadieu et al., 2008].

Анализ фоссилий мохообразных демонстрирует значительные изменения в содержании углекислого газа в атмосфере – от 420 ppm в триасе до примерно 1130 в середине мелового периода и снижение до 680 к началу палеогена [Fletcher et al., 2008]

Такому увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере соответствует формирование в меловом периоде мощных и обширных угленосных бассейнов в средних и, отчасти, высоких широтах (до 85°) как Северного, так и Южного полушарий, причем в Северном они охватывают огромные территории [Жарков и др., 2004]. Фиксируется и одновременное формирование битуминозных толщ. Можно предполагать, что в значительной степени это определяется высокой скоростью формирования мортмассы в приполярных районах и уменьшением скоростей деструкции и интенсивным захоронением [Чумаков, 2004а]. При сравнительно высокой концентрации атмосферного кислорода пожары в лесных экосистемах способствуют формированию древесного угля, устойчивого к биодеградации и хорошо сохраняющегося [Lovelock, 1995]. Отмечается возможность увеличения содержания углерода в почвах. Вместе с тем есть противоречивые оценки роли голосеменных и покрытосеменных в выветривании силикатов [Berner, Kothavala, 2001], тогда как настоящие (сосудистые) растения резко увеличивают освобождение углекислого газа из почв и подстилающих горных пород [Berner, Kothavala, 2001].

В морских бассейнах, особенно эпиконтинентальных, шло интенсивное – карбонатное осадконакопление, в том числе биогенное (мшанково-водорослевые холмы и рифы) [Жарков, 2004]. В середине мезозоя, особенно в первой половине мела, фактически происходила ярко выраженная перестройка морских карбонатных циклов [Ridgwell, 2005]. Это получило отражение в так называемом планктонном взрыве середине мела, когда произошло резкое увеличение численности таких способных с фотосинтезу групп простейших, как кокколито-

фориды, диатомеи и динофлагелляты. Основная масса этих простейших имеет хорошо развитые поверхностные структуры (у кокколитофорид – карбонатные). Мощный поток погибающих простейших способствовал формированию илов, а затем карбонатных (в том числе меловых) толщ, что определило широкую адаптивную радиацию илоедов и прикрепленных фильтраторов.

Раскрытие Атлантического океана и подъем уровня океана вместе с изменениями в структуре фитопланктонных сообществ способствовали увеличению скорости биогенного выведения углерода с ранней юры – соответственно, накоплению биогенных карбонатов [Katz et al., 2005]. С перестройкой системы океанов и морей, в первую очередь эпиконтинентальных, идет перемещение карбонатов из внутренних мелководий на большие глубины шельфовой зоны (в современных условиях – до 90% накапливается здесь).

Следовательно, выведение углерода с участием живых организмов велось по двум основным путям – в виде биогенных карбонатов и в виде органики. К сожалению, в настоящее время невозможно разделение потоков органического углерода на суше и в море.

Вместе с тем для наземных условий скорость накопления такого углерода оценивается примерно в 15 000 Гт/млн лет [Katz et al., 2005]. В соответствии с используемой моделью в период с 205 до 30 млн лет т.н. в таких условиях из оборота выведено  $21.9 \times 10^{18}$  молей. Видимо, это около 25–30 % всего выводимого органического углерода. Общая оценка скорости захоронения углерода – 300 000 Гт/млн лет [Bernier, Kothavala, 2001]. В дальнейшем карбонатные осадочные породы могут быть увлечены на значительные глубины, например, с ходе субдукция у континентальных окраин. Возвратный поток углерода связан преимущественно с вулканической деятельностью. В итоге к концу мелового периода прослеживается уже отмеченное постепенное сокращение концентрации углекислого газа в атмосфере.

Существенно, что выведение из круговорота органики является принципиальным условием для высокой концентрации кислорода в атмосфере, поскольку сокращается его расход на окисление [Falkowski, Isozaki, 2008].

Граница между мелом и палеогеном четко выражена в резкой перестройке глобального цикла углерода, в первую очередь в резком сокращении накопления карбонатов в морских бассейнах [Schulte et al., 2010]. Общий биоценотический кризис конца мела в последние годы традиционно связывают с падением одного или нескольких крупных тел на поверхность Земли в этом случае значительное снижение продукции, в том числе на суше, определялось, вероятно, сокращением потока солнечного излучения, достигающего поверхности Земли. В любом случае массовое вымирание в конце мелового периода коснулось таких фотосинтезирующих простейших, как кокколитофориды, диатомеи и динофлагелляты, что отразилось в быстром сокращении скорости накопления биогенных карбонатов.

### **Обоснование подходов к прогнозу возможных изменений, предшествующих сукцессионным и филоценогенетическим процессам, в балансе углеродных потоков в биомах в ответ на климатические изменения (НГУ)**

Инициация сукцессионных и филоценогенетических процессов обычно ассоциируется с формированием пионерных растительных сообществ. Вместе с тем такое представление, судя по целому ряду работ, как минимум, ограничено, а во многих (если не во всех) случаях не корректно.

Для прогнозов возможных изменений, предшествующих сукцессионным процессам, существенен учет целого ряда характеристик, среди которых:

1. Особенности абиотической среды [Разумовский, 1981], в том числе характер рельефа, специфика делювиальных и дефляционных процессов [Исаков и др., 1986], доступность воды.
2. Особенности окислительно-восстановительного градиента [Limpens et al., 2008].

3. Возможность освоения участка комплексом прокариот (в том числе автотрофных и способных к использованию энергии солнечного излучения и(или) химических связей неорганических соединений, а также азотфиксирующих) и протистов.
4. Возможность освоения участка комплексом сапротрофных и хищных членистоногих [Edwards, Sugg, 2005].
5. Возможность поступления извне органического углерода (в том числе в виде трупов) [Edwards, Sugg, 2005]. Возможность поступления карбонатов.
6. Наличие в подстилающих горных породах углерода, как неорганического (карбонаты), так и органического.
7. Возможность поступления извне или наличие азота в доступной для фотосинтезирующих эвкариот форме [Работнов, 1978].

#### Список цитированных источников

- Жарков М.А. Палеогеографические перестройки и обстановки седиментации в перми и раннем триасе // Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. – М.: Наука, 2004. – С. 158–180.
- Жарков М.А., Мурдмаа И.О., Филатова Н.И. Палеогеографические перестройки и седиментация мелового периода // Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. – М.: Наука, 2004. – С. 52–87.
- Исаков Ю.А., Казанская Н.С., Тишков А.А. Зональные закономерности динамики экосистем. – М.: Наука, 1986. – 150 с.
- Разумовский С.М. Закономерности динамики биоценозов. – М.: Наука, 1981. – 231 с.
- Чумаков Н.М. Климатическая зональность и климат мелового периода // Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. – М.: Наука, 2004а. – С. 105–123.
- Чумаков Н.М. Динамика и возможные причины климатических изменений в позднем мезозое // Климат в эпохи крупных биосферных перестроек. – М.: Наука, 2004б. – С. 149–157.
- Berner R.A., Kothavala Z. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time // *American Journal of Science*. – 2001. – Vol. 301. – P. 182–204.
- Donnadieu Y., Godd eris Y., Bouttes N. Exploring the climatic impact of the continental vegetation on the Mesozoic atmospheric CO<sub>2</sub> and climate history // *Climate in the Past Discussions*. – 2008. – Vol. 4. – P. 1021–1045.
- Edwards J.S., Sugg P.M. Arthropods as pioneers in the regeneration of life on the pyroclastic-flow deposits of Mount St Helens // *Ecological Responses to the 1980 Eruption of Mount St. Helens*. – New York: Springer Verlag, 2005. – P. 127–138.
- Falkowski P.G., Isozaki Y. The story of O<sub>2</sub> // *Science*. – 2008. – Vol. 322. – P. 540–542.
- Fletcher B.J., Brentnall S.J., Anderson C.W., Berber R.A., Beerling D.J. Atmospheric carbon dioxide linked with Mesozoic and early Cenozoic climate change // *Nature Geoscience*. – 2008. – Vol. 1. – P. 43–48.
- Katz M.E., Wright J.D., Miller K.G., Cramer B.S., Fennel K., Falkowski P.G. Biological overprint of the geological carbon cycle // *Marine Geology*. – 2005. – Vol. 217. – P. 323–338.
- Limpens J., Berendse F., Blodau C., Canadell J.C., Freeman C., Holden J., Roulet N., Rydin H., Schaepman-Strub G. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis // *Biogeosciences*. – 2008. – Vol. 5. – P. 1475–1491.
- Lovelock J. The ages of Gaia: a biography of our living Earth. – New York and London: W.W. Norton & Co., 1995. – 255 p.
- Ridgwell A. A Mid Mesozoic revolution in the regulation of ocean chemistry // *Marine Geology*. – 2005. – Vol. 217, № 3–4. – P. 339–357.
- Schulte P., Alegret L., Arenillas I. et al. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous–Paleogene boundary // *Science*. – 2010. – Vol. 327. – P. 1214–1218.

## Полный библиографический список публикаций по проекту за 2010 г.

### Монографии

1. Isayev A.P., Protopopov A.V., Protopopova V.V. et al. Vegetation of Yakutia. In Eds: Troeva E.I. et al. The Far North: Plant Biodiversity and Ecology of Yakutia. Springer, 2010. P. 143-260.

### Центральная печать

1. Письман Т.И., Пугачева И.Ю., Жукова Е.Ю., Шевырнов А.П. Математическая модель сезонной динамики агрофитоценозов с учетом наземных и спутниковых измерений // Докл. АН СССР. 2009. Т. 428, № 6. С. 841-844.
2. Ермаков Н.Б., Николин Е.Г., Троева Е.И., Черосов М.М. Классификация сообществ пояса подгольцовых редколесий Восточного Верхоянья (Якутия) // Вест. Новосибирского гос. ун-та. Сер.: Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8, вып. 3. С. 137-151.
3. Махатков И.Д., Ермаков Н.Б. Ассоциация олиготрофных сосновых лесов (*Pinetum sibiricae-sylvestris*) подзоны северной тайги Западно-Сибирской равнины // Вест. Новосибирского гос. ун-та. Сер.: Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8, вып. 3. С. 152-159.
4. Шокин Ю.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В. и др. Корпоративная информационная система СО РАН сбора, хранения и обработки спутниковых данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс 2». С. 3-10.
5. Пестунов И. А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации // Вест. СибГАУ. 2010. Вып. 5 (31). 11с. (в печати).
6. Махатков И.Д., Ермаков Н.Б. Ассоциация олиготрофных сосновых лесов (*Pinetum sibiricae – Sylvestris*) подзоны северной тайги Западно-Сибирской равнины // Вест. Новосибирского гос. ун-та. Сер.: Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8, вып. 3. С. 137-152.
7. Махатков И.Д. Динамика озерных берегов в криолитозоне Западной Сибири на космических снимках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс 2». С. 221-224.
8. Пестунов И.А., Куликова Е.А., Бериков В.Б., Махатков И.Д. Сеточный алгоритм кластеризации с использованием ансамблевого подхода к принятию решений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс 2». С. 63-72.
9. Сергеев М. Г. Животные в круговороте углерода в наземных экосистемах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс 2». С. 325-328.
10. Белолипецкий В.М., Белолипецкий П.В. Об оценке потока углекислого газа на земной поверхности по измеренным вертикальным профилям CO<sub>2</sub> в приземном слое атмосферы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс 2». С. 153-157.
11. Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В., Иванов В.В., Кривобоков Л.В., Болонева М.В. Восстановление запасов органического вещества после рубок в лесных экосистемах Восточного Прибайкалья // Известия РАН. Сер.: Биология. 2010. №1. С. 83-94.
12. Богомоллов В.Ю., Гордов Е.П., Крупчатников В.Н. Моделирование региональных полей метеорологических величин с высоким пространственным шагом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс-2». С. 50-53.
13. Шульгина Т.М., Богомоллов В.Ю., Генина Е.Ю., Гордов Е.П. Изучение поведения температуры на территории Сибири по данным наблюдений и реанализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс-2». С. 275-279.

14. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Информационно-вычислительная система для хранения, поиска и аналитической обработки данных по окружающей среде основанная на технологиях SEMANTIC WEB // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс-3». С. 162-165.
15. Титов А.Г., Гордов Е.П., Окладников И.Г. Использование технологий Semantic Web в информационно-вычислительной системе для анализа данных по окружающей среде // Вест. НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2010. Т.8, вып. 1. С. 60-67.
16. Фролов А.А. Прогнозное картографирование изменений ландшафтной структуры Предбайкалья при потеплении климата // Геодезия и картография. 2010. № 9. С.27–32.
17. Потапов В.П., Пястунович О.Л. Системы регионального мониторинга – проблемы и решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отд. вып. «Кузбасс-2». С. 16-38
18. Ведрова Э.Ф., Евдокименко М.Д., Безкоровайна И.Н. и др. Запасы углерода в органическом веществе послепожарных сосняков Юго-Западного Прибайкалья // Лесоведение.
19. Ведрова Э.Ф. Биогенные потоки углерода в бореальных лесах Центральной Сибири // Известия РАН.
20. Черкашин А.К., Солодянкина С.В. Моделирование высотного распределения ландшафтных геомов Прибайкалья // Географии и природные ресурсы. Новосибирск: «Гео», 2011. (в печати).
21. Замараев Р.Ю., Попов С.Е. Программный комплекс для интеллектуального анализа данных в горном производстве // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 3. С. 86-101. (в печати)

#### *Статьи в международных журналах*

1. Ermakov N. Corresponding geographical types of hemiboreal forests in North Asia: peculiarities of ecology and genesis // Phytocoenologia. 2010. Vol. 40, N 1. Berlin-Stuttgart. P. 29-40.
2. Horsák M., Chytrý M., Danihelka J. et al. Habitats of relict terrestrial snails in southern Siberia: lessons for the reconstruction of palaeoenvironments of full-glacial Europe // J. of Biogeography. 2010. Vol. 37, N 8. Wiley-Blackwell. P. 1450-1462.
3. Pugacheva I.Yu., Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P. A study of backscattered spectra dynamics of agricultural crops during growth period on the territory of the Krasnoyarskii Krai // Adv. in Space Research. 2010. Vol. 45. P. 1224-1230.

#### *Принятые в печать*

4. Бурцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д. Минимальная биосферная модель для прогноза наихудшего варианта биосферной динамики в пределах неопределенности оцени параметров // Электронное моделирование. Киев, Украина.
5. Okhonin V.A., Bartsev S.I., Shchemel A.L., Ivanova J.D. Scenario analysis of long-term biosphere dynamics on human quality of life // Ecological Modelling.
6. Gordov E.P., Fazliev A.Z., Lykosov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G. Development of web based information-computational infrastructure for Siberia Integrated Regional Study // Earth Observation. 2010. Vol. 40, ser.: Field Studies and Modelling. P. 233-252.
7. Gordov E.P., Vaganov E.A. Siberia Integrated Regional Study: Multidisciplinary investigations of the dynamic relationship between the Siberian environment and global climate change // Environmental Research Lett. 2010. Vol. 5. (6 p.).

*Труды международных конференций*

1. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Belolipetsky P.V. Principle of the worst scenario in the modeling of biosphere-climate dynamics // Intern. Conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010. Tomsk, Russia. P.65.
2. Saltykov M. Adaptive metabolism as solution of the paradox of the plankton // 2<sup>nd</sup> Intern. Geography Symp. GEOMED 2010. Kemer, Antalya, Turkey. P. 261.
3. Pestunov I.A., Berikov V.B., Kulikova E.A. Grid-based ensemble clustering algorithm using sequence of fixed grids // Proc. of the 3<sup>rd</sup> IASTED Intern. Conf. on Automation, Control, and Information Technology (ACIT`2010). 15-18 June 2010, Novosibirsk, Russia. 2010. P. 103-110.
4. Добротворский Д.И., Куликова Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Веб-сервисы для непараметрической классификации спутниковых данных // Сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. С. 171-175.
5. Куликова Е.А. Непараметрическая классификация спутниковых данных с полубучением // Сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. С. 128-132.
6. Fedotov A.M., Pestunov I.A. Information support of interdisciplinary researches for development and analysis of dynamic models of biosphere // Abstracts of Intern. conf. on Environmental Observations, Modeling and Information Systems (ENVIROMIS-2010). 5-11 July 2010, Tomsk, Russia. P. 108.
7. Лбов Г.С., Полякова Г.Л., Пестунов И.А. Метод анализа коротких многомерных временных рядов для совместной обработки спутниковых и натуральных данных // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: Технологии, научные проекты». Барнаул: ООО «А.Р.Т.», 2010. С. 63.
8. Жижимов О.Л., Молородов Ю.И., Пестунов И.А., Федотов А.М. Интеграция данных для моделей динамики биосферы // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: Технологии, научные проекты». Барнаул: ООО «А.Р.Т.», 2010. С. 41.
9. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Синявский Ю.Н., Куликова Е.А. Построение ансамблей сеточно-плотностных алгоритмов для кластеризации больших массивов данных в условиях малой априорной информации // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: Технологии, научные проекты». Барнаул: ООО «А.Р.Т.», 2010. С. 79.
10. Лбов Г.С., Полякова Г.Л., Пестунов И.А. Метод прогнозирования на основе анализа коротких временных рядов // Тр. Междунар. конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'10». 3-10 сентября 2010 г. М.: Физматлит, 2010. Т. 1. С. 264-271.
11. Лбов Г.С., Полякова Г.Л., Пестунов И.А. Метод прогнозирования на основе анализа коротких временных рядов // Тр. Междунар. конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'10». М.: Физматлит, 2010. Т. 1. С. 264-271.
12. Черкашин А.К., Солодянкина С.В. Геоинформационное моделирование и картографирование углеродного запаса бореальных лесов Прибайкалья // Матер. Междунар. конф. «Устойчивое развитие территории: теория ГИС и практический опыт» (Интеркарто/ИнтерГИС-16). Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2010. С.388–395.
13. Солодянкина С.В., Черкашин А.К. Геоинформационное прогнозирование изменения геосистемных функций накопления углерода в бореальных лесах юга Восточной Сибири // Тез. II Междунар. конф. Геоинформатика: технологии, научные проекты. Барнаул: ООО «А.Р.Т.», 2010. С. 93
14. Gordov E.P., Vaganov E.A. Some results of Siberia Integrated Regional Study // Program and Abstracts of Intern. conf. ENVIROMIS-2010. Tomsk, 2010. P. 21.

15. Bogomolov V.Yu., Gordov E.P. Creation archive of regional meteorological fields with high spatial resolution for West Siberia 1960-2000 // Program and Abstracts of Intern. conf. ENVIROMIS-2010. Tomsk, 2010. P. 36.
16. Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P. Climatic characterisitcs which control Siberian forest ecosystems dynamics in the second half of XX century // Program and Abstracts of Intern. conf. ENVIROMIS-2010. Tomsk, 2010. P. 44.
17. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М. Использование геоинформационных технологий в построении Интернет-порталов для статистического анализа архивов пространственно-привязанных данных при проведении геофизических исследований // Тр. Междунар. суперкомпьютерной конф. «Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи». М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 464-471.
18. Шульгина Т.М., Генина Е.Ю., Гордов Е.П. Статистический анализ поведения температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: технологии, научные проекты». Барнаул, 2010. С. 106.
19. Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Вычислительных блок геоинформационной веб-системы для статитстического анализа климатических процессов // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: технологии, научные проекты». Барнаул, 2010. С. 107.
20. Барцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д. Минимальная биосферная модель для прогноза наихудшего варианта биосферной динамики в пределах неопределенности оцeni параметров // SIMULATION-2010. Киев, Украина.
21. Bartsev S.I. Specificity of mathematical description of statistical and dynamical properties of CELSS // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
22. Bartsev S.I., Pochekutov A.A. Mathematical modelling of soil respiration and carbon accumulation dynamics in soils of CELSS // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
23. Bartsev S.I., Lankin Yu.P., Saltykov M.Yu. Dependence of CELSS model stability on the properties of metabolism of composing organisms // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
24. IvanovaY., Larko A., Ovchinnikova N.,Saltykov M. Comparison And Estimation of Regional And Satellite Data On NPP // 2<sup>nd</sup> Intern. Geography Symp. GEOMED 2010. Kemer, Antalya, Turkey.
25. IvanovaY., Larko A., Taseyko O. Impact Assessment of Oil & Gas Extraction in Forest Ecosystems Using Satellite Data // 2<sup>nd</sup> Intern. Geography Symp. GEOMED 2010. Kemer, Antalya, Turkey.
26. Ivanova, Yuliya; Larko, Alexander; Mikhailuta, Sergey. Effect of oil and gas mining on forest ecosystems // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
27. Shchemel, Anton; Ivanova, Yuliya; Larko, Alexander. Remote analysis of anthropogenic effect on boreal forests using nonlinear multidimensional models // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
28. Shchemel A., Tang D., Bartsev S., Ivanova Yu. Analysis of carbon fluxes and the worst development scenario of South China Sea basing on remote sensing data // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
29. Chernetskiy M. A study of forest phenology of Southern Central Siberia from regional to subcontinental level using interannual time series of remote sensing data // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2010. Bremen, Germany.
30. Pasko I., Chernetskiy M. A study of land surface temperature space-time distribution in Central-Siberian permafrost areas using MODIS data // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Germany, 2010.
31. Botvich I., Sidko A., Pisman T., Shevyrnogov A. Determination of chlorophyll photosynthetic potential in vegetation using ground-based and satellite methods // 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. Germany, 2010.

32. Pestunov I., Berikov V., Kulikova E. Methods of constructing ensembles of clustering algorithms for large datasets // Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. St. Petersburg: LETI, 2010. 4 p. (in print)
33. Gordov E., Vaganov E. Siberia Integrated Regional Study megaproject: challenges, approaches and first results // Geophysical Research Abstracts. Vienna. Austria, 2010. Vol. 12.
34. Shulgina T., Bogomolov V., Genina E., Gordov E. Statistical peculiarities of air temperature behavior on Siberian territory in the second half of XX century revealed from reanalysis and observational data // Geophysical Research Abstracts. Vienna. Austria, 2010. Vol. 12.
35. Shulgina T., Bogomolov V., Genina E., Gordov E. Spatiotemporal behavior of climatic characteristics determining evolution of forest ecosystems in Siberia in the second half of XX century // Geophysical Research Abstracts. Vienna. Austria, 2010. Vol. 12.
36. Bogomolov V., Gordov E. Modeling of regional meteorological fields with high spatial resolution for West Siberia // Geophysical Research Abstracts. Vienna. Austria, 2010. Vol. 12.
37. Shulgina T., Gordov E., Okladnikov I., Titov A. Computational unit of geoinformation web-system for statistical analysis of climatic processes // Abstracts of Intern. Conf. on Data Anal. and Modeling in Earth Sciences DAMES'2010. Lisbon, Portugal, 2010.
38. Shulgina T.M., Genina E.Y., Gordov E.P. Spatiotemporal behavior of climatic characteristics of Siberia in the second half of 20<sup>th</sup> century: Reanalysis and in-situ data // Abstracts of Intern. conf. on Data Anal. and Modeling in Earth Sciences DAMES'2010. Lisbon, Portugal, 2010.

#### *Труды российских конференций*

1. Барцев С.И., Ланкин Ю.П., Салтыков М.Ю. Влияние типа метаболизма входящих в экосистему организмов на устойчивость моделей замкнутых экосистем // Всерос. симп. с междунар. участием «Сложные системы в экстремальных условиях». Красноярск, Россия, 2010. С. 11.
2. Иванова Ю.Д. Прогноз наихудших вариантов биосферной динамики на основе анализа минимальной биосферной модели // Всерос. симп. с междунар. участием «Сложные системы в экстремальных условиях». Красноярск, Россия, 2010.
3. Почекутов А.А., Барцев С.И. Математическое моделирование динамики углерода в компонентах почвы в зависимости от температуры и влажности // Матер. Всерос. конф. «Биосферные функции почвенного покрова». Пушкино: SYNCHROBOOK, 2010. С. 248-249.
4. Молородов Ю.И., Пестунов А.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В., Федотов А.М. Интеграция данных для разработки и анализа моделей динамики биосферы // Матер. Всерос. конф. «Биосферные функции почвенного покрова». Пушкино: SYNCHROBOOK, 2010. С. 216-217.
5. Пестунов И.А., Куликова Е.А., Синявский Ю.Н., Смирнов В.В. Применение ансамблей непараметрических алгоритмов кластеризации для обработки многоспектральных спутниковых изображений // Тез. Восьмой Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2010. <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=2180>.
6. Кудряшова С.Я., Дитц Л.Ю. Оценка запасов углерода в почвах Западной Сибири с использованием баз данных и дистанционных исследований // Матер. конф. «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов. К 100-летию профессора Н.И. Базилевич». М., 2010. Ч. 2. С. 391-395.
7. Сергеев М.Г. Современная энтомогеография: пространство выбора и выбор пространства // Матер. VIII Межрег. совещ. «Энтомологические исследования в Северной Азии». Новосибирск: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 181-182.
8. Белолипецкий В.М., Белолипецкий П.В., Мартынова А.А. О методе оценки потока углерода между атмосферой и наземной экосистемой по измеренным на вышке верти-



- кальным распределениям CO<sub>2</sub> // Тез. Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Новосибирск, 2010. С. 79.
9. Пестунов А.И. Качественное исследование глобальной минимальной модели многолетней динамики углерода в биосфере // Тезисы XI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (26-27 октября 2010 г.), Красноярск: ИВМ СО РАН, 2010. С. 34-35.
  10. Ведрова Э.Ф. Круговорот углерода в темнохвойных лесах южной тайги Сибири // Мат. конф. «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов». Новосибирск: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 221-224.
  11. Мухортова Л.В. Динамика структуры органического вещества почвы в развивающихся лесных экосистемах // Мат. конф. «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов». Новосибирск: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 477-481.
  12. Кудряшова С.Я., Дитц Л.Ю. Создание информационного обеспечения для оценки запасов углерода в почвах бореальных экосистем Западной Сибири // Матер. IV Всерос. конф. с междунар. участием «Отражение био-гео и антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове». Томск, 2010. С. 111-114.
  13. Солодянкина С.В. Определение количественных показателей ландшафтных функций для обоснования мер компенсации негативного воздействия хозяйственной деятельности // Матер. Междунар. конф. «Динамика геосистем и оптимизация природопользования». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2010. С. 205-207.
  14. Истомина Е.А. Геоинформационный анализ факторальной динамики ландшафтов Тункинской котловины // Матер. Междунар. конф. «Динамика геосистем и оптимизация природопользования». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2010. С.103-105.
  15. Опарин В.Н., Потапов В.П., Семенов А.В. О некоторых особенностях создания систем распределенного геомеханического мониторинга на основе данных дистанционного зондирования // Тр. конф. «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». Т. I. Прикладная геомеханика. Обогащение полезных ископаемых, экология. Новосибирск, 2010. С. 24-32
  16. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Обработка и анализ больших архивов пространственно распределенных данных с использованием геоинформационных веб-технологий // Тр. Всерос. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2010). Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2010. С. 193-200.
  17. Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Вычислительный блок информационной веб-ГИС системы для статистического анализа климатических процессов // Тр. Всерос. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2010). Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2010. С. 201-206.
  18. Фролов А.А. Лесные биогеоценозы зоны влияния Шелеховского промышленного узла // Матер. научно-практ. конф. «Стратегия развития лесного комплекса Иркутской области». Иркутск: РИО САПЭУ, 2010.
  19. Фролов А.А. Прогнозирование изменений ландшафтной структуры Предбайкалья при потеплении климата // Матер. Междунар. конф. «Динамика геосистем и оптимизация природопользования». Иркутск: Издательство ИГ СО РАН, 2010.

#### *Публикации в тематических сборниках*

1. Дитц Л.Ю. Изучение пространственно-временной динамики почвенного покрова на основе ГИС-технологий и космических снимков // Эколого-географические исследования восточной части Сибирских увалов. Нижневартовск, 2009. Вып.4. С. 4-15.

#### *Зарегистрированные программы для ЭВМ и базы данных*

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2010611807. Целевая обработка спутниковых изображений (наземная растительность, температура поверхности океана) / Ходяев А.В., Пасько И.В., Шевырногов А.П., Картушинский А.В. № 2010610449; заявл. 26.01.2010, зарег. 09.03.2010.
2. Программа для сегментации изображений EMeanSC/2010 / Синявский Ю.Н., Пестунов И.А. (подана заявка на государственную регистрацию программы).
3. Программа для сегментации изображений EССА/2010 / Пестунов И.А., Куликова Е.А., Рылов С.А. (подана заявка на государственную регистрацию программы).