

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЦЕНАРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КЛИМАТОГЕННЫХ СУКЦЕССИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА РОССИИ НА ОСНОВЕ РЕГИОНАЛЬНО АДАПТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ SEVER

Хвостиков С.А., Барталев С.А.

khvostikov@d902.iki.rssi.ru



Глобальное моделирование динамики растительности

Глобальные модели динамики растительности (DGVM – Dynamic Global Vegetation Model) воспроизводят процессы в растительном покрове Земли;

Они учитывают влияние растительности на мировой баланс энергии и углерода, что позволяет увеличить точность прогнозов глобального изменения климата и его влияния на биосферу;

Адекватность модельных прогнозов во многом зависит от точности задания значений параметров модели;

Определения модельных параметров требует большого объема данных реальных наблюдений за процессами в растительности при различных условиях на этапе построения и настройки моделей;

Многолетние архивы спутниковых данных могут предоставить необходимую для настройки моделей информацию о состоянии растительности и динамике ее изменения на больших территориях.

Модель динамики растительности SEVER¹

Модель SEVER основана на механистическом описании процессов в наземной растительности;

Моделирование осуществляется на уровне регулярной сети клеток 0,5х0,5 градусов;

В каждой клетке присутствует доля растений разных типов;

Для осредненных индивидов растений имитируется их продуктивность, рост, конкуренция, отмирание, размножение;

Ежегодно по результатам имитации обновляются характеристики растений и их доля в клетках.

1) Venevsky S, Maksyutov S. SEVER: A modification of the LPJ global dynamic vegetation model for daily time step and parallel computation. Environmental Modelling & Software. 2007;22(1):104–109.

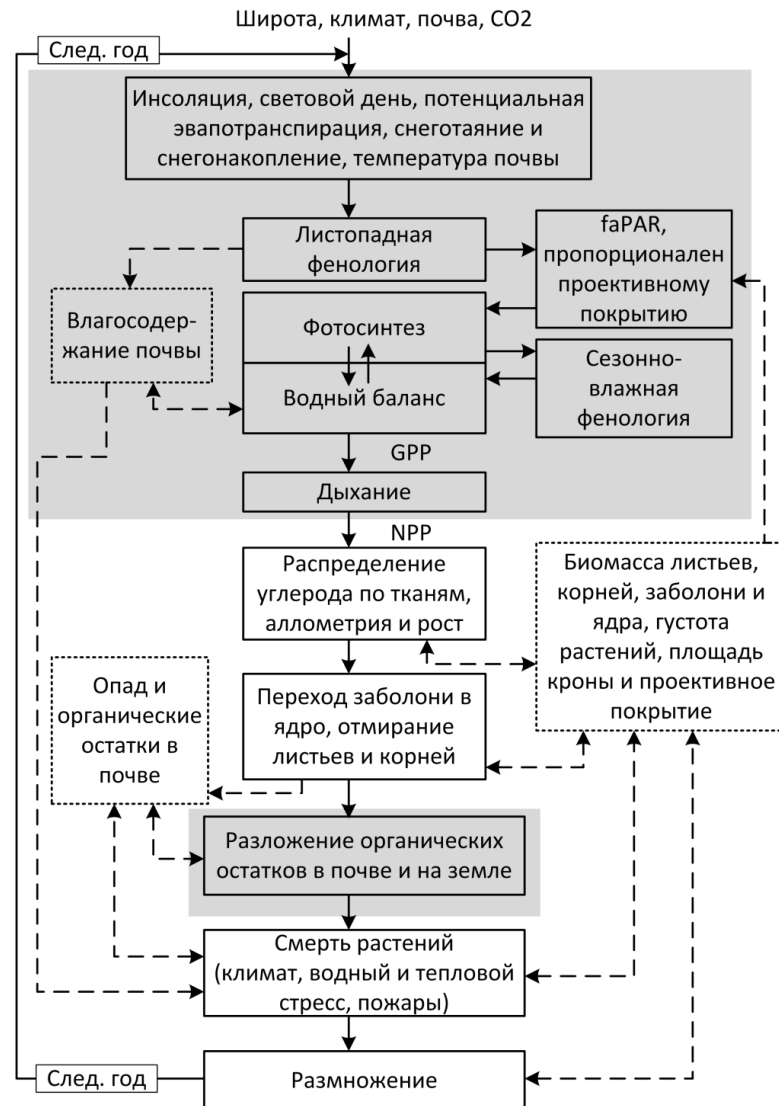


Схема взята из работы Sitch S et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. Global Change Biology. 2003; 9(2):161–185.

Модель динамики растительности SEVER

Вычисление проективного покрытия:

$$FPC = CA * P * FPC_{ind} \quad FPC_{ind} = 1 - e^{-0,5 * LAI_{ind}}$$

$$LAI_{ind} = \frac{C_{leaf} SLA}{CA} \quad SLA = 2,0 * 10^{-4} \frac{e^{6,15}}{(12 a_{leaf})^{0,46}}$$

CA - площадь кроны P - плотность типа в клетке

a_{leaf} - продолжительность жизни листа

Проективное покрытие и солнечная радиация используется для оценки первичной продукции.

Чистая первичная продукция с учетом затрат на дыхание:

$$NPP = 0,75(GPP - R_m)$$

$$R_m = \left[\sum_{d=1}^{365} (R_{leaf} + R_{sapwood} + R_{root}) \right] * P$$

$$R_{tissue} = r * C_{tissue} / cn_{tissue} * g(T)$$

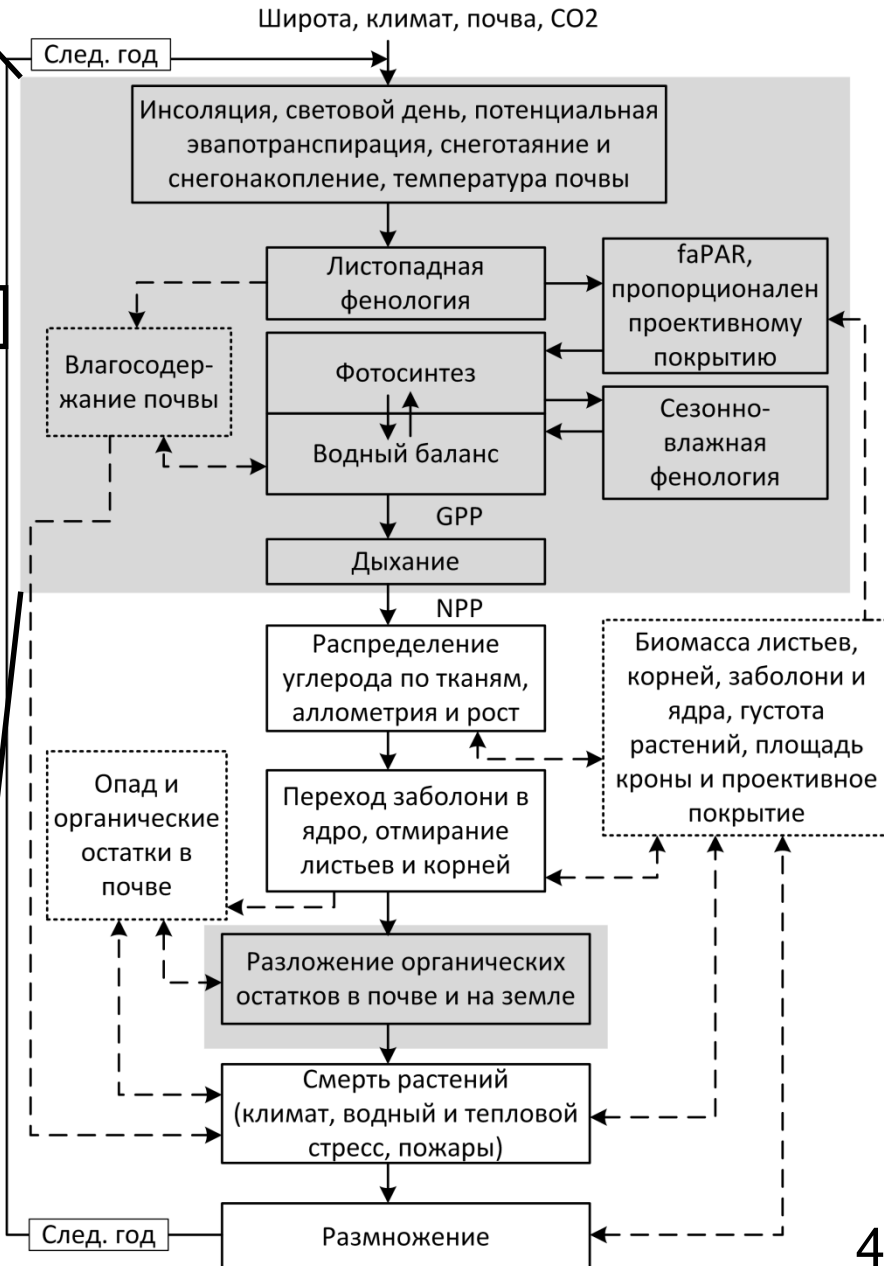
$$g(T) = \exp(308.56 * (1/56.02 - 1/(T + 46.02)))$$

r - коэффициент, зависящий от типа растения

C_{tissue} - биомасса данного типа тканей

cn_{tissue} - коэффициент отношения содержания углерода к азоту для ткани

T - температура воздуха или почвы



Модель динамики растительности SEVER

Модель учитывает естественное отмирание тканей:

$$C_{root,new} = C_{root,old} (1 - f_{root})$$

$$C_{sapwood,new} = C_{sapwood,old} (1 - f_{sapwood}) \quad C_{leaf,new} = C_{leaf,old} (1 - f_{leaf})$$

$$C_{heartwood,new} = C_{heartwood,old} + C_{sapwood,old} f_{sapwood}$$

$$\Delta C_{L,ag} = \sum_{PFT} (C_{leaf} f_{leaf} P) \quad \Delta C_{L,bg} = \sum_{PFT} (C_{root} f_{root} P)$$

C_{tissue} - биомасса ткани

f_{tissue} - доля отмирающей биомассы

$C_{L,ag(bg)}$ - запас отмершей биомассы над(под) землей

Распределение чистой первичной продукции, с учетом аллометрических уравнений:

$$\Delta C = \Delta C_{leaf} + \Delta C_{sapwood} + \Delta C_{root}$$

$$LA = k_{lasa} * SA \quad C_{leaf} = l_{r_{max}} * w * C_{root}$$

$$H = K_{allom2} * D^{k_{allom3}} \quad CA = k_{allom1} * D^{k_f}$$

SA - площадь ствола LA - площадь листьев

CA - площадь кроны D, H - диаметр, высота ствола

w - коэффициент водного стресса

$k_{lasa}, l_{r_{max}}, k_{allom1}, k_{allom2}, k_{allom3}, k_f$ - эмпирически

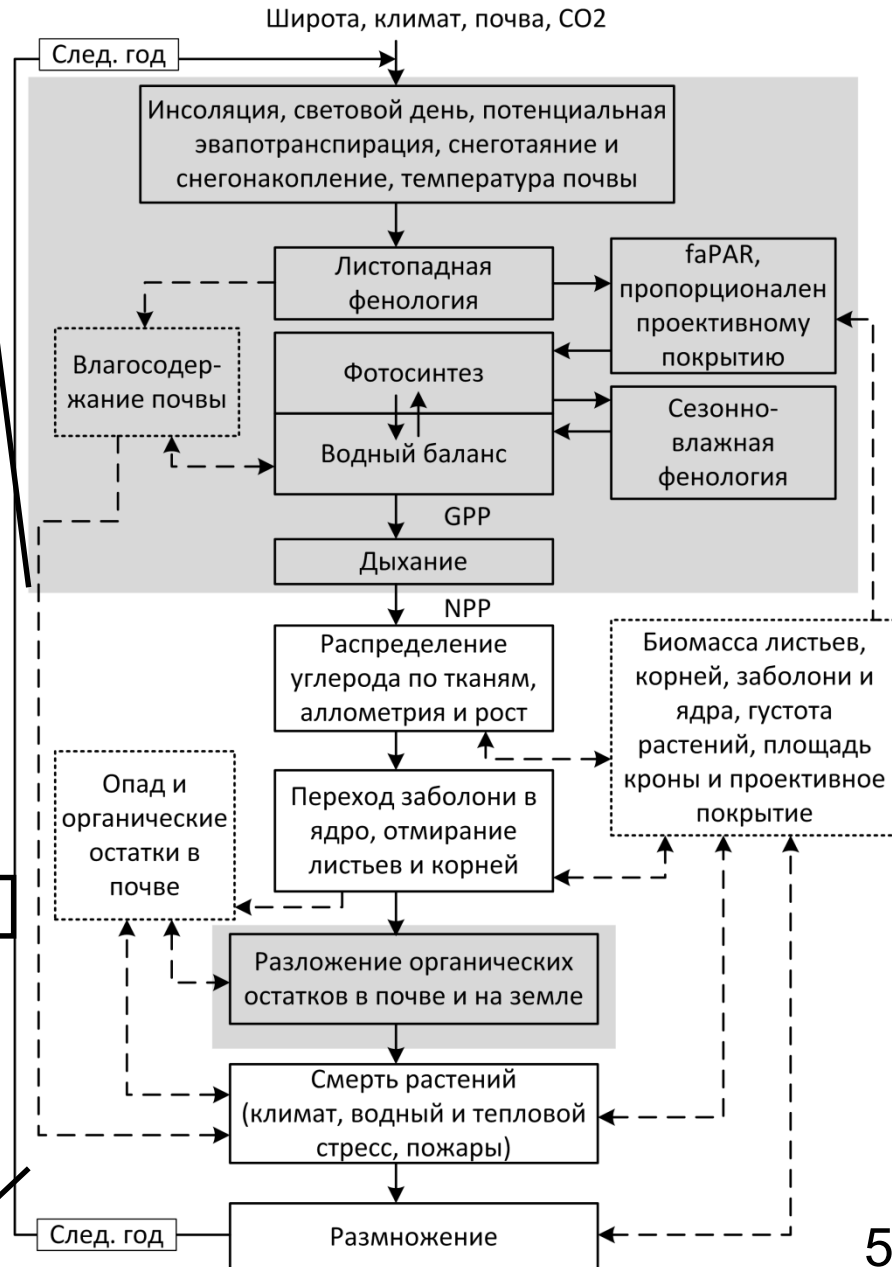
определенные константы

Также учитывается смертность растений от различных факторов:

$$P_{new} = P_{old} (1 - mort)$$

$$C_{L,ag,new} = C_{L,ag,old} + P_{old} * mort * (C_{leaf} + C_{sapwood} + C_{heartwood})$$

$$C_{L,bg,old} = C_{L,bg,old} + P_{old} * mort * C_{root}$$



Карта растительного покрова России

- 23 типа растительного покрова
- разрешение 250 метров

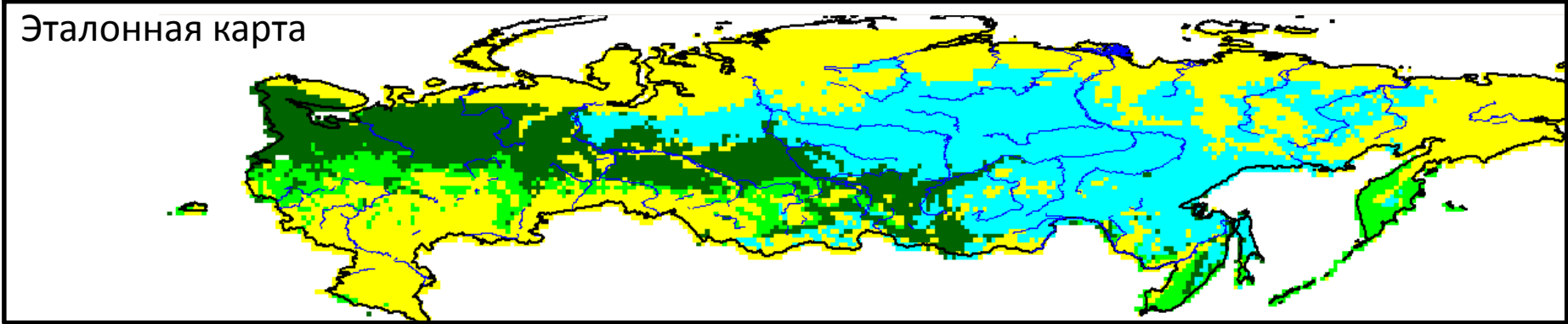
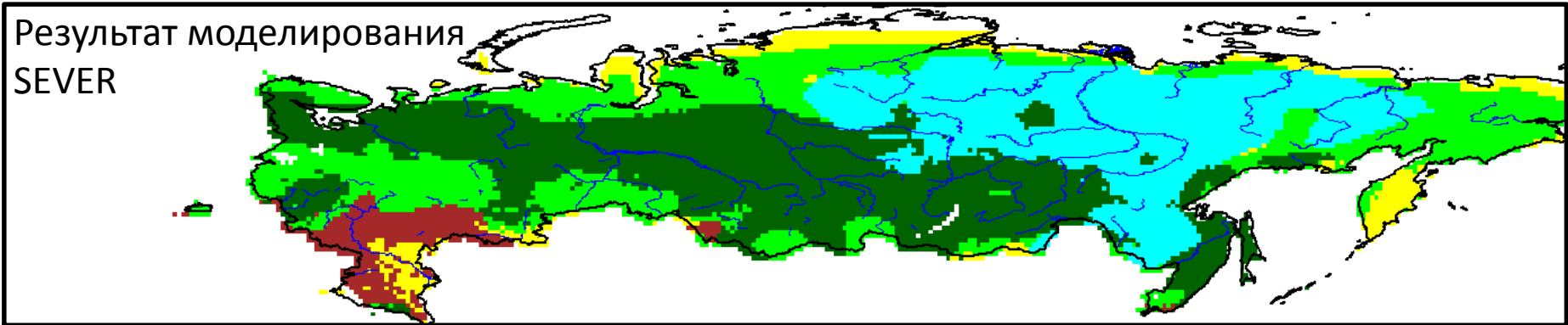
- создан временный ряд карт с 2001 года по текущее время



Анализ согласованности результатов картографирования и моделирования растительного покрова

Преобладающий тип растительности	Хвойные вечнозеленые леса	Хвойные листопадные леса	Мелколиственные леса	Твердолиственные леса	Травянистые и тундровые экосистемы	Критерий качества (Q)
Легенда						
Коэффициент корреляции	0,48	0,39	0,0	-	0,34	0,50

$Q = \sum_i \text{corr}(X_i^{\text{map}}, X_i^{\text{model}})^2$ где i – тип растительности, а корреляция считается с учетом площади клетки.



Модификация модели динамики растительности

Модификация модели выполнена для следующих процессов:

Конкуренция за свет	Проективное покрытие не должно превышать площадь клетки: $P_{t0} + \Delta P_{t0} = P_{t1} \leq 1.0$ Для чего вводится коэффициент R $\Delta P = \sum_i R \Delta P_i$ $R = \frac{(1 - P_{t0})}{\sum_i \Delta P_i}$	Введен учет высоты $\Rightarrow$ $\Delta P = \sum_i C \omega_i \Delta P_i$ $C = \frac{(1 - P_{t0})}{\sum_i \omega_i \Delta P_i}$ $\omega_i = A \frac{(h_i - \bar{h})}{\bar{h}}$ $\bar{h} = \sum_{i=1}^n h_i / n$ A Эмпирически определенный параметр h_i Высота индивида данного типа												
Имитация тундры	При выполнении условия: $\Pi \geq 0,5$; $\Pi = f(x_{SNOW}) * (1 - f(x_{TEMP})) * f(x_{WIND})$ в клетке вводится ограничение на древесную растительность $f(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < X_{\min} \\ \frac{(x - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} & , \quad X_{\min} \leq x \leq X_{\max} \\ 1 & , \quad X_{\max} < x \end{cases}$	<table> <tr> <th>Параметр</th><th>Xmin</th><th>Xmax</th></tr> <tr> <td>X_{SNOW} ,м</td><td>0</td><td>0,1</td></tr> <tr> <td>X_{TEMP} ,C°</td><td>-35,4</td><td>-12,2</td></tr> <tr> <td>X_{WIND} ,м/с</td><td>1,875</td><td>5,46</td></tr> </table>	Параметр	Xmin	Xmax	X_{SNOW} ,м	0	0,1	X_{TEMP} ,C°	-35,4	-12,2	X_{WIND} ,м/с	1,875	5,46
Параметр	Xmin	Xmax												
X_{SNOW} ,м	0	0,1												
X_{TEMP} ,C°	-35,4	-12,2												
X_{WIND} ,м/с	1,875	5,46												
Коррекция температуры	Значения температуры воздуха корректируются по формуле $T_{corr} = T - 0,6 * \Delta H$ где ΔH - максимальная разница высот в клетке по цифровой модели рельефа													

Параметризация модели динамики растительности

Параметризация осуществлялась методами оптимизации 12 параметров модели, включая:

- биоклиматические пределы для основных типов растительности России, контролирующие их пространственное распределение;
- эмпирически определенные коэффициенты в модификациях модели.

Рассматриваемые параметры модели SEVER			Исходное значение	Оптимизация
Индекс континентальности лиственницы			43	36,6
Мин. температура, С°	самый холодный месяц	Широколист. умеренного пояса	-17	-18,9
		Мелколист. леса	-50	-24,4
		Лиственничные леса	-50	-42,5
		Хвойные вечнозеленые	-32,5	-27,3
Макс. температура, С°	самый жаркий месяц	Хвойные вечнозеленые	-2	-0,5
		Мелколист. леса	-2	-12,8
		Хвойные вечнозеленые	23	24,5
		Мелколист. леса	23	22
Коэффициент снижения температуры для км. разницы высот, С°/км			0	0,011
Коэффициент конкуренции за свет			1	10e4
Множитель лиственного коэффициента площади листа			1	0,69

Параметризация модели динамики растительности

Значения параметров получены в результате двух этапов оптимизации, максимизировавших критерий качества модели.

1. Метод Efficient Global Optimisation (EGO), состоящий в итеративном поиске оптимума аппроксимации критерия с ее постоянным обновлением):

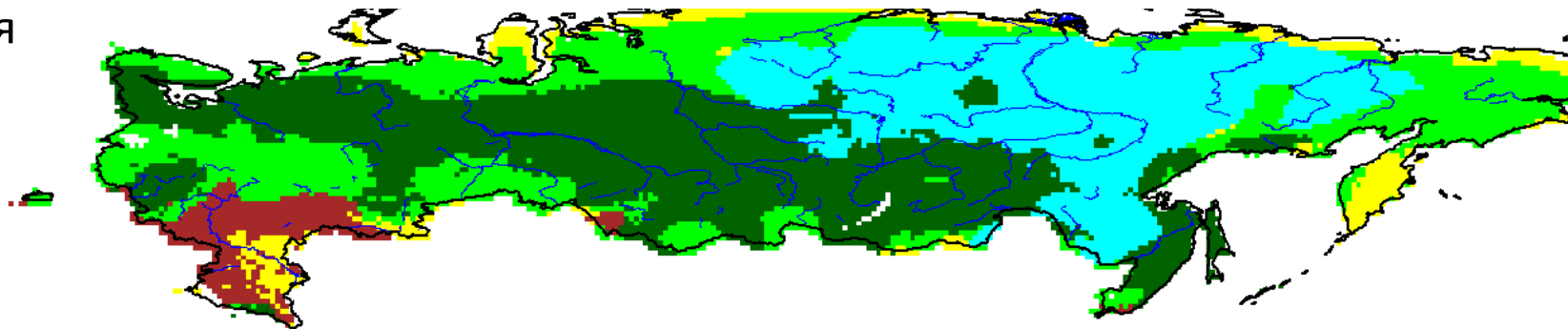
- Применен быстрый поиск глобального оптимума по выборочной функции;
- Достигнуто улучшение критерия качества на 33%;
- Выполнено 1250 итераций модели.

2. Метод BFGS (поиск оптимума вдоль направления градиента):

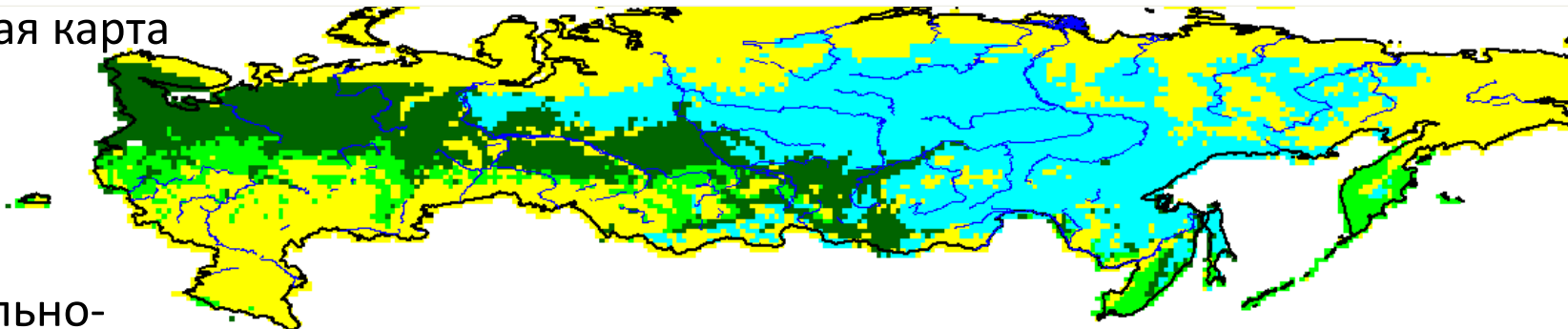
- Выполнен поиск точного локального оптимума модели;
- Достигнуто улучшение критерия качества на ~3%;
- Выполнено 160 итераций модели.

Повышение качества моделирования распределения типов растительности

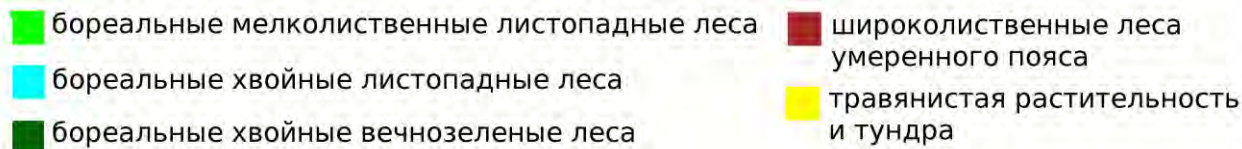
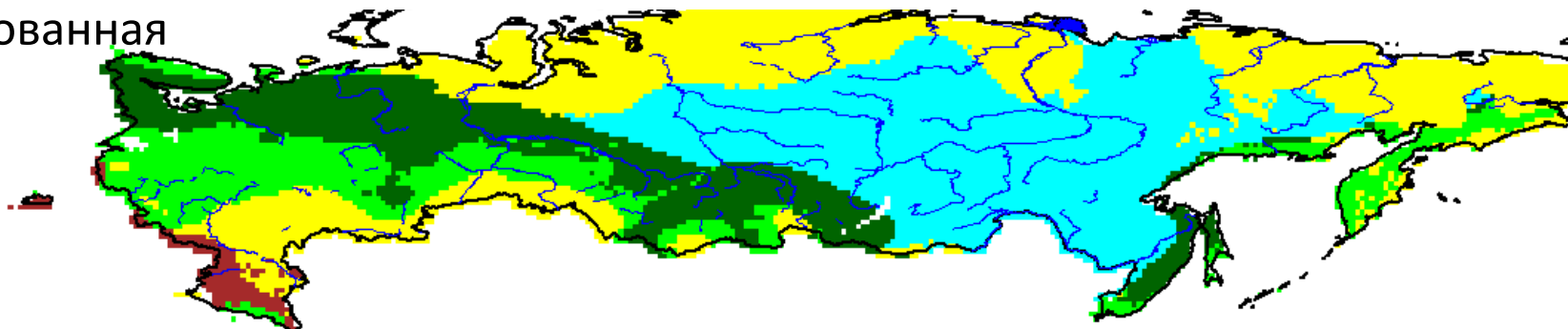
Исходная модель



Эталонная карта

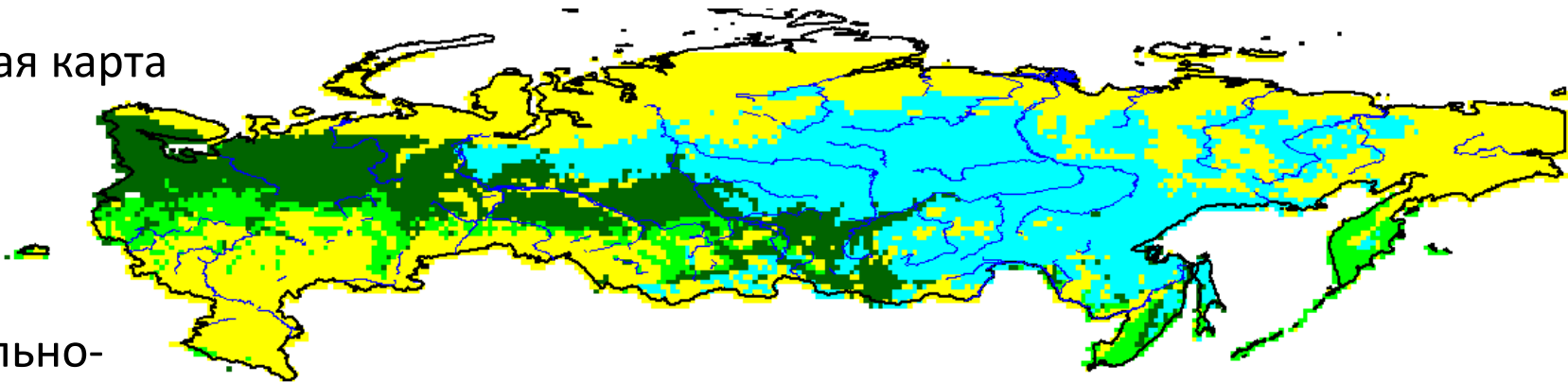


Регионально-адаптированная модель

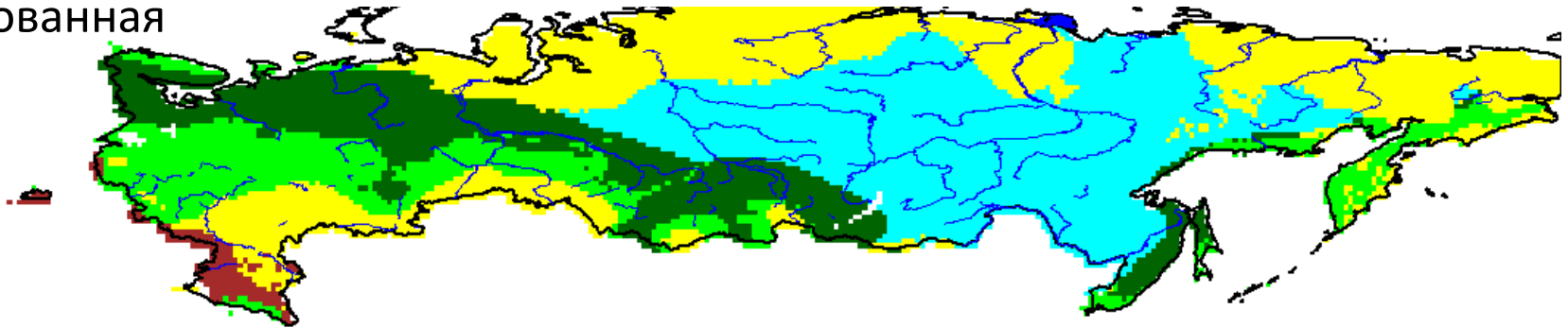


Повышение качества моделирования распределения типов растительности

Эталонная карта



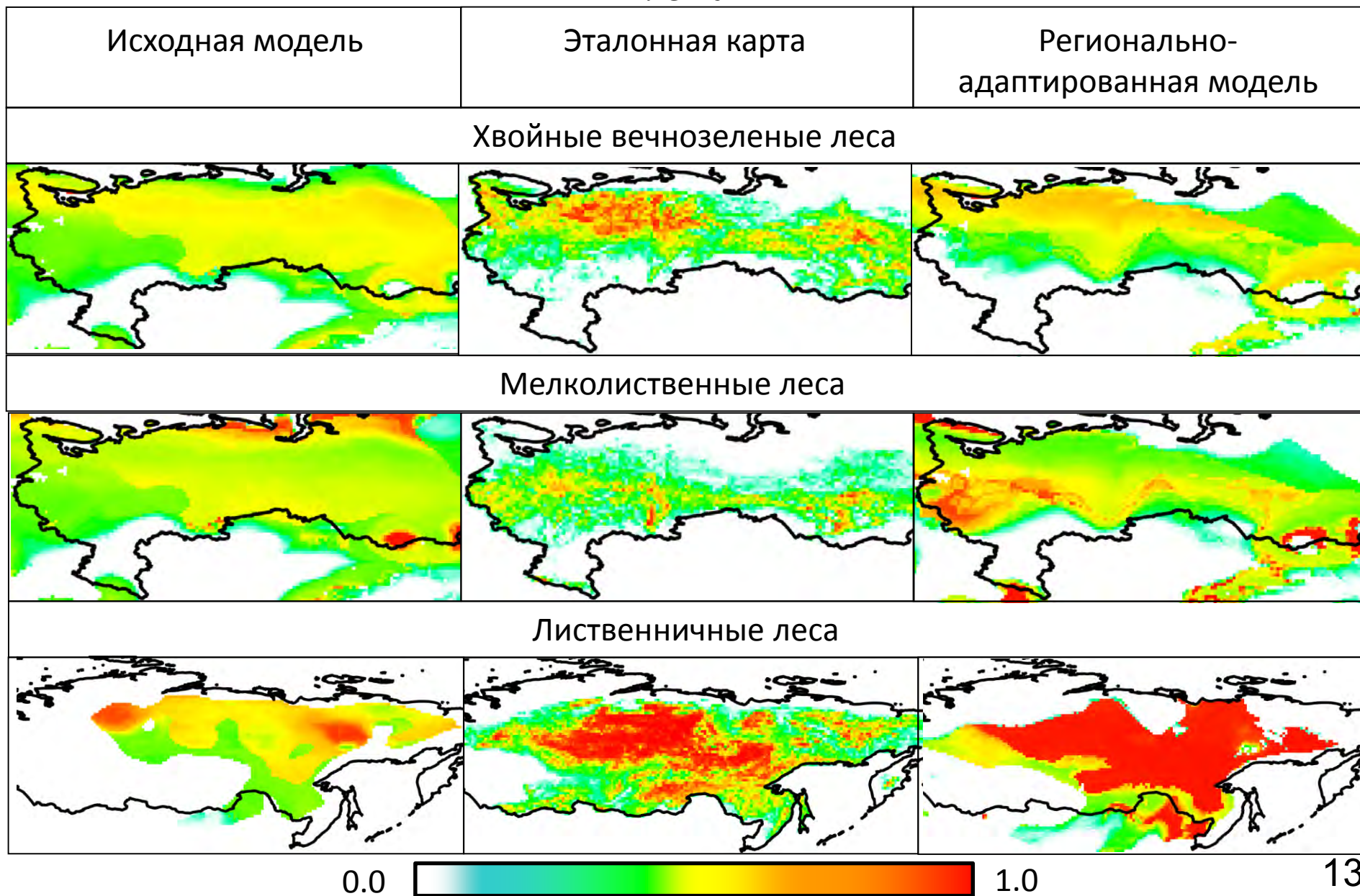
Регионально-адаптированная модель



Преобладающий тип растительности	Хвойные вечнозеленые леса	Хвойные листопадные леса	Мелколиственные леса	Твердолиственные леса	Травянистые и тундровые экосистемы	Критерий качества
Легенда						
Исходная модель, коэффициент корреляции	0,48	0,39	0,0	-	0,34	0,50
Регионально-адаптированная модель, коэф. корреляции	0,55	0,60	0,42	-	0,50	1,09

Повышение качества моделирования

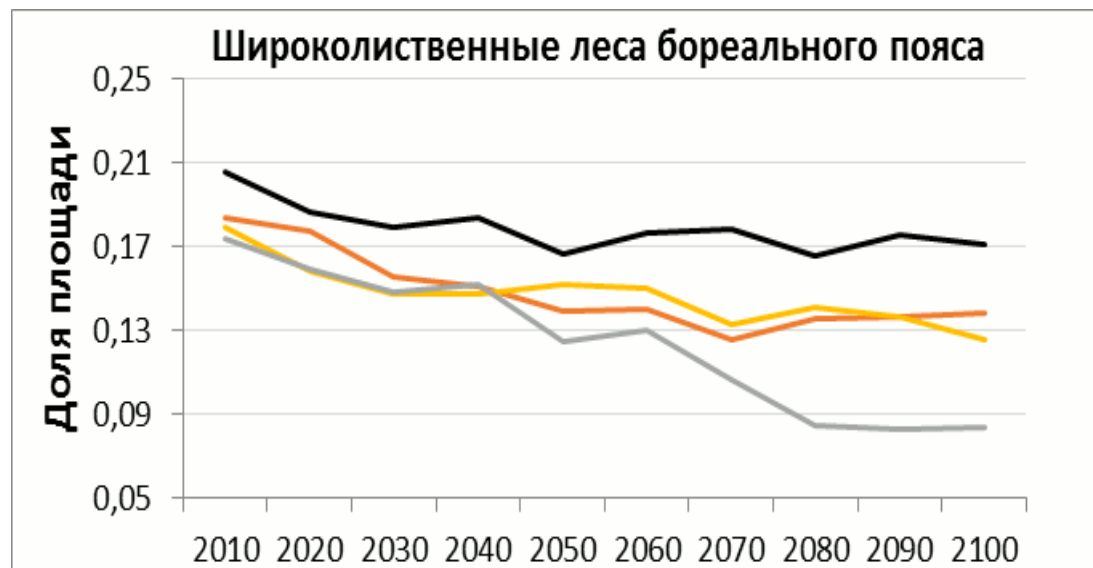
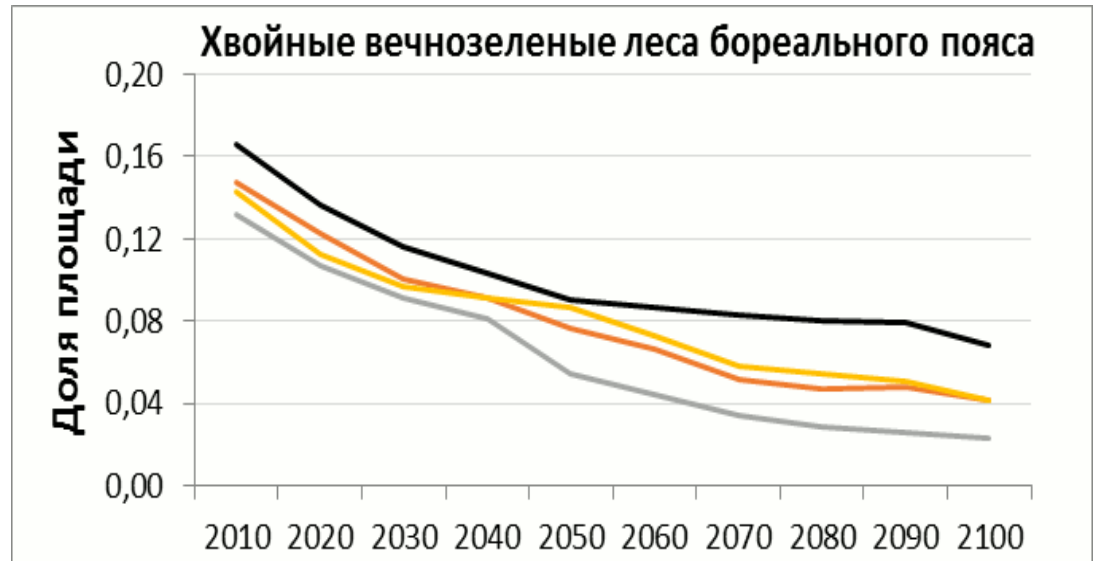
Анализ результатов моделирования на уровне доли различных типов растительности в клетках



Прогноз динамики растительности до 2100 года

Прогноз показывает устойчивое уменьшение площади хвойных вечнозеленых и лиственных бореальных лесов России.

— RCP 2.6
— RCP 4.5
— RCP 6.0
— RCP 8.5

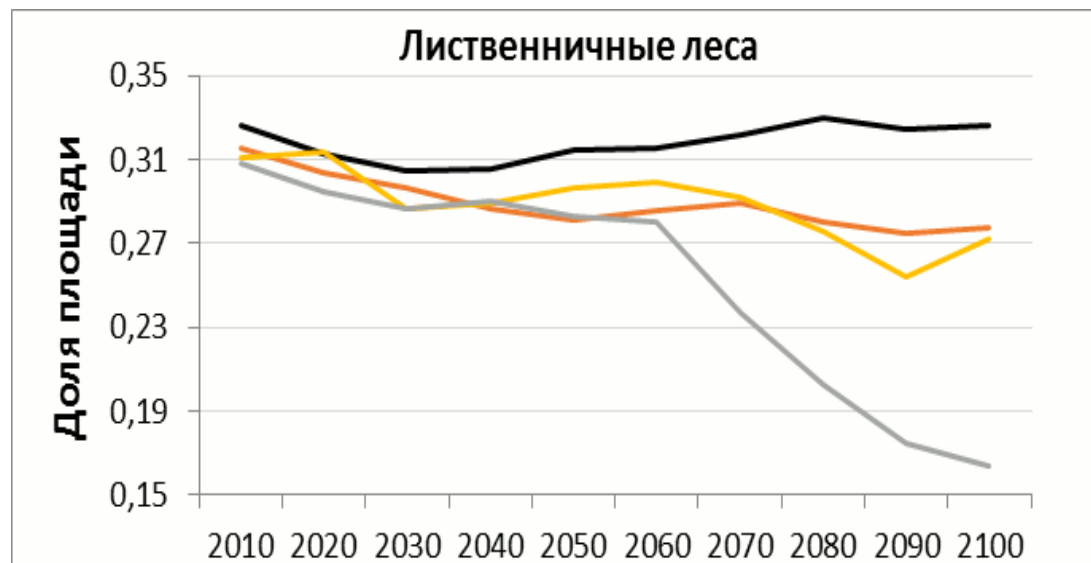
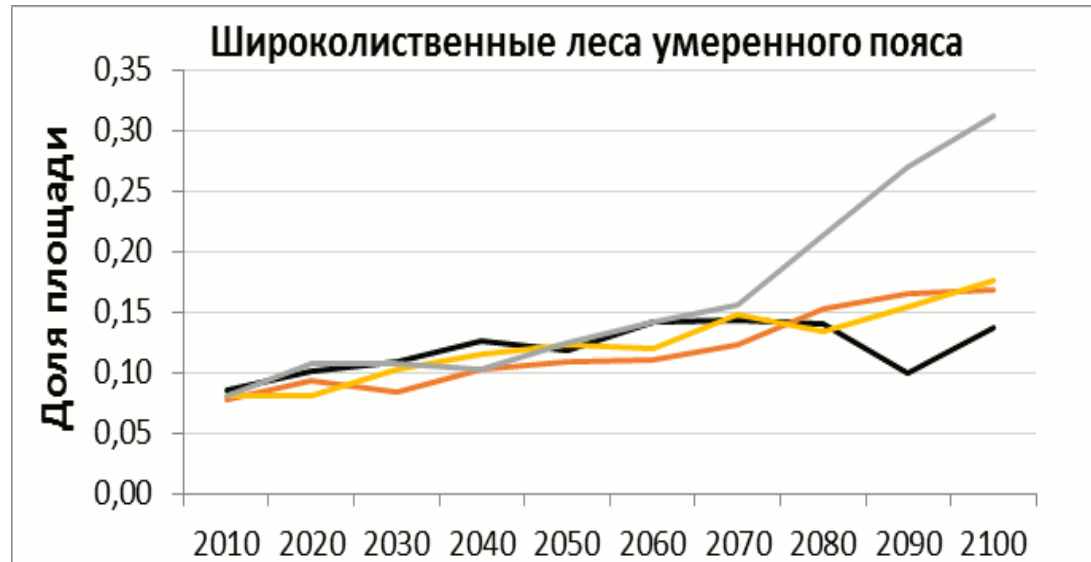


Прогноз динамики растительности до 2100 года

Преимущественно бореальные леса заменяются лиственными листопадными лесами умеренного пояса.

Также наблюдается экстремальное падение площади лиственных лесов в сценарии RCP 8.5.

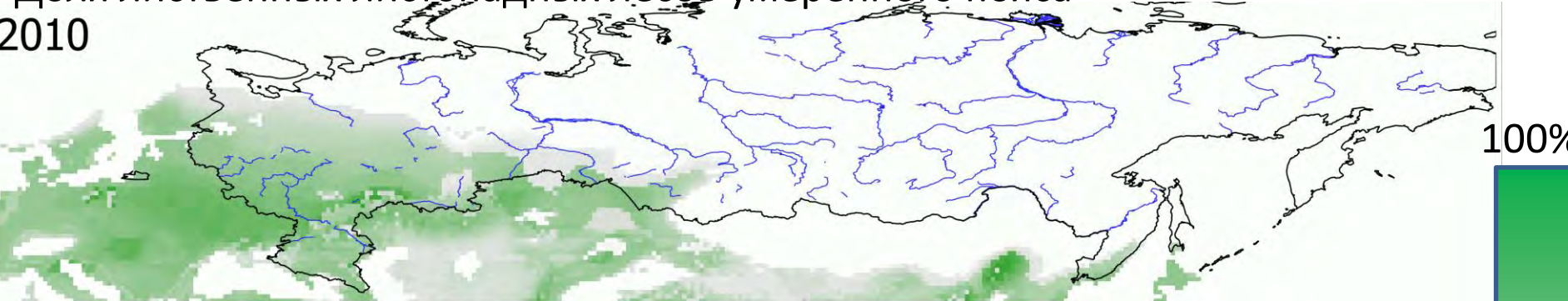
— RCP 2.6
— RCP 4.5
— RCP 6.0
— RCP 8.5



Прогноз динамики растительности, сценарий RCP 6.0

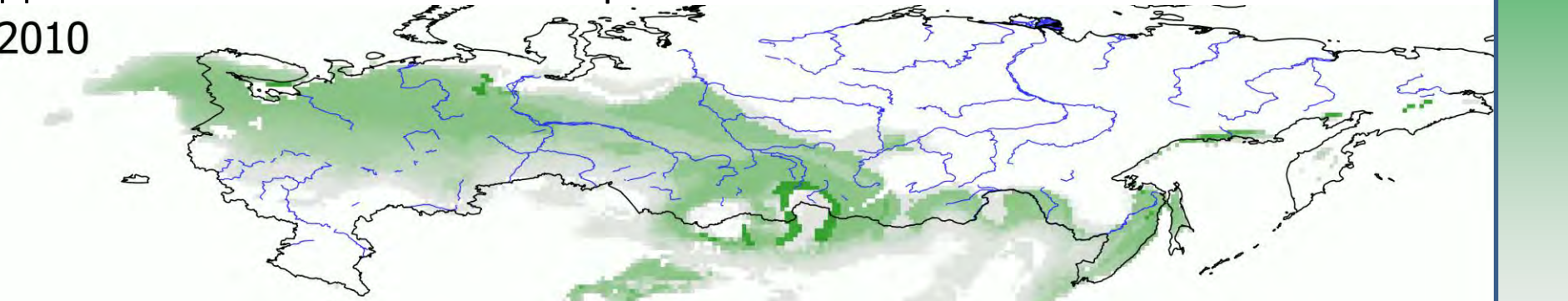
Доля лиственных листопадных лесов умеренного пояса

2010



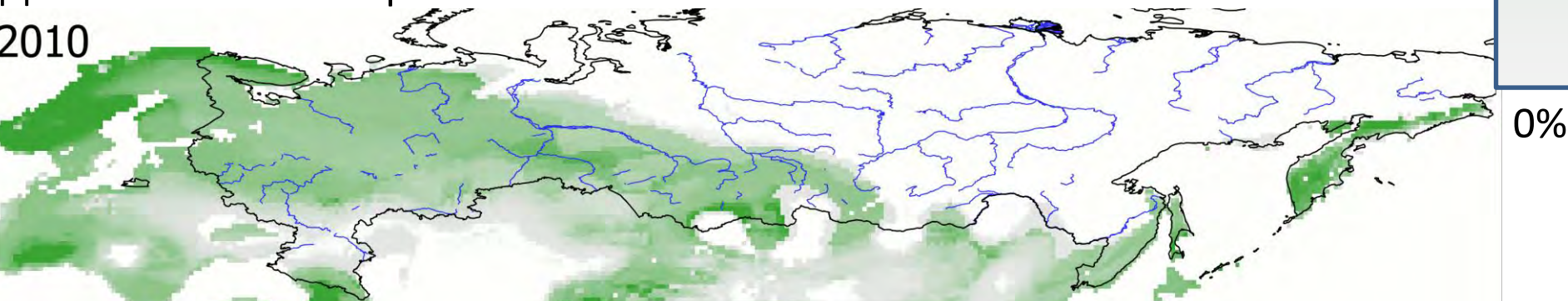
Доля хвойных вечнозеленых бореальных лесов

2010



Доля лиственных бореальных лесов

2010



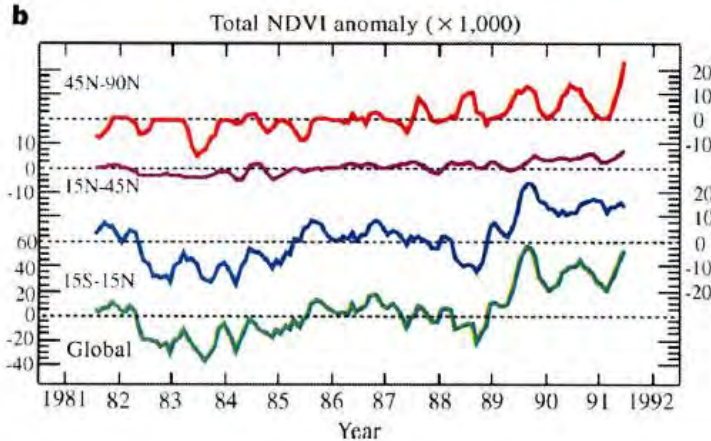
100%



0%

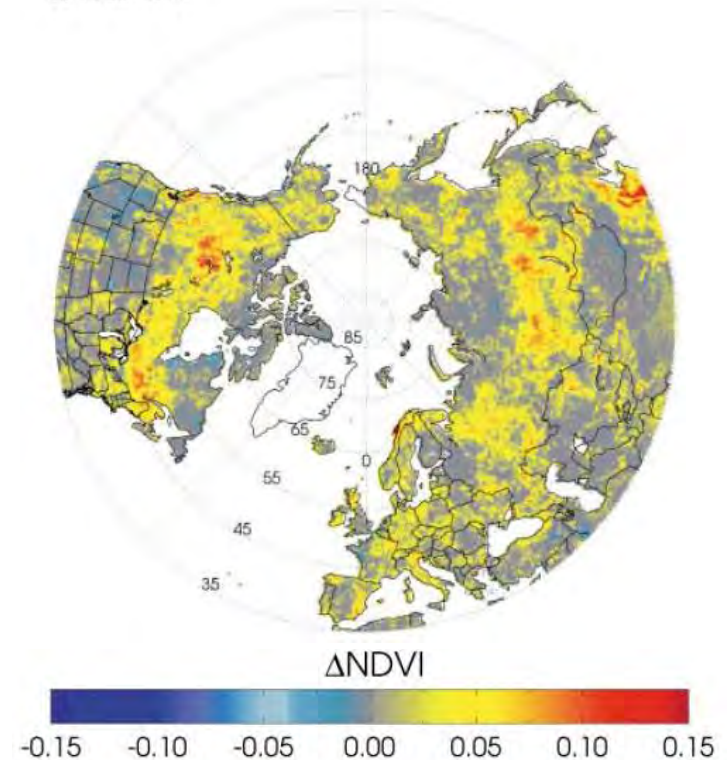
Тренды динамики растительного покрова

Результаты исследований указывают на устойчивые положительные тренды продуктивности растительного покрова северных широт



Myneni R. B. et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 //Nature. – 1997. – Т. 386. – №. 6626. – С. 698.

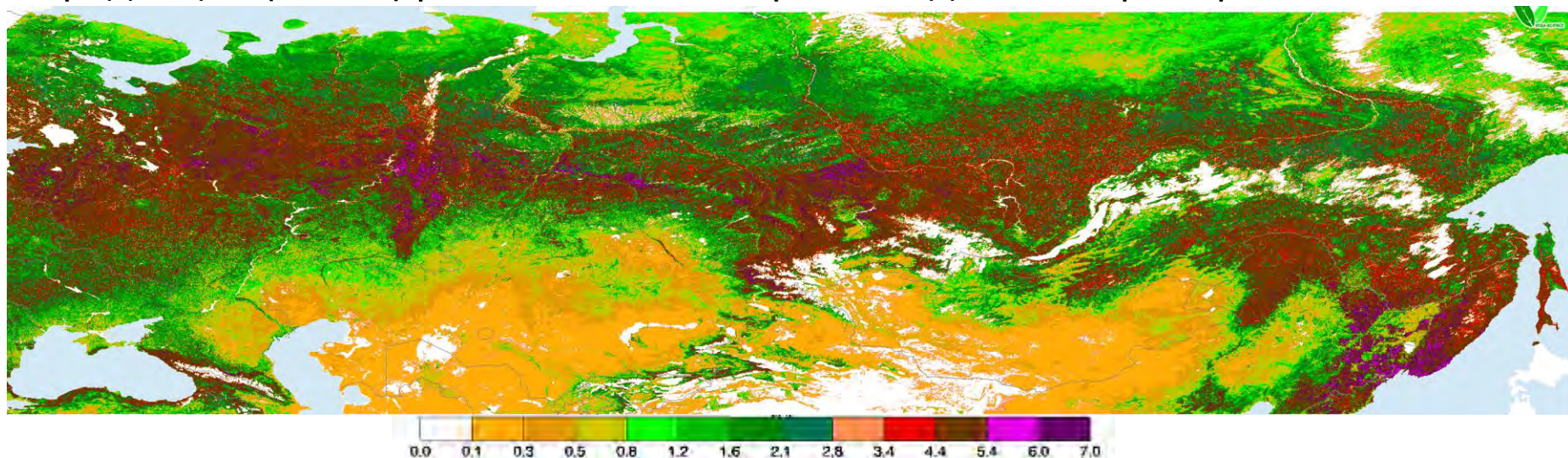
a) 1982-1991



Tucker C. J. et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 //International journal of biometeorology. – 2001. – Т. 45. – №. 4. – С. 184-190.

Оценка и моделирование трендов динамики растительного покрова

В ИКИ РАН разработан улучшенный метод оценки площади листовой поверхности (LAI) и доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (FAPAR) растительного покрова по данным прибора MODIS;



LAI по данным MODIS (2016-06-20), полученное на основе методов ИКИ РАН, обеспечивающих малый уровень шумов и повышение пространственного разрешения до 250 м. (Шабанов и др.)

Представленные в работе методы применимы для адаптации модели к наблюдаемым трендам. Для настройки модели необходимо разработать критерий степени соответствия динамики LAI и FAPAR по модельным и спутниковым данным.

Заключение

- Данные дистанционного зондирования были успешно использованы для калибровки глобальных моделей растительности;
- Улучшенная модель позволяет точнее воспроизводить текущее пространственное распределение типов растительности на территории России;
- Прогноз динамики пространственного распределения типов растительности указывает на возможность существенного изменения ареалов распространения бореальных лесов.

Спасибо за внимание

Модель динамики растительности SEVER

Ассимиляция углерода в результате фотосинтеза оценивается по формулам:

$$A_{nd} = I_d \left(\frac{C_1}{C_2} \right) * [c_2 - (2g-1)s - 2(c_2 - gs)\sigma_c]$$

$$\sigma_c = [1 - \frac{(c_2 - s)}{(c_2 - g_s)}]^{0,5}$$

$$c_1 = \alpha f_{temp} \frac{(p_i - \Gamma_*)}{(p_i + 2\Gamma_*)}$$

$$c_2 = \frac{(p_i - \Gamma_*)}{(p_i + k_c(1 + \frac{pO_2}{k_0}))}$$

$$s = \left(\frac{24}{h}\right)a$$

$$\Gamma_* = \frac{pO_2}{2\tau}$$

$$p_i = \lambda p_a$$

I_d - интеграл faPAR за день

h - продолжительность светового дня

f_{temp} - температурное ограничение на эффективность фотосинтеза

pO_2 - парциальное давление кислорода

p_i - парциальное давление углекислого газа

τ, k_0, k_c - параметры, зависящие от температуры

