

В.М. Калайджан, И.Г. Соловьев, В.Р. Цибульский

## ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПРИ ВАРИАЦИИ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Предложена вычислительная схема анализа трансформации растительного покрова тундр вследствие изменения среднегодовых температур приземного слоя атмосферы. В основе анализа лежит очевидная идея о том, что с повышением температуры типологические образы ценозов южных широт смещаются к Северу.*

**Фитоценозы, карта растительности, динамика трансформации, фито-наследственные группы.**

В работе изложена схема построения модели динамики трансформации естественного растительного покрова тундр на примере фитоценозов полуострова Ямал, представленных картой растительности севера Западной Сибири [1].

Известно, что основным регулятором изменения биоразнообразия является биом [9]. Оценка изменения (смещения) природно-климатических зон под действием изменения климата в арктической зоне должна проводиться в географических масштабах, охватывающих совокупность биомов. В этом случае возможно найти связь между смещениями биомов и природно-климатических зон и тем самым оценить динамику биоразнообразия.

Поставленная задача есть упрощенный вариант анализа более общего вопроса оценки динамики биоразнообразия вследствие изменения климата [2, 3, 4, 9]. Актуальность исследований в условиях возрастающей техногенной нагрузки на арктическую и субарктическую зоны обусловлена крайне низкими репродукционными потенциалами фитоценозов Севера, которые, кроме того, эволюционируют по естественно-климатическим причинам: изменения температур приземного слоя атмосферы [5].

В основе нижеизложенного лежат следующие предположения.

1. Структура растительного покрова, представленная картой-схемой обследуемой территории, зависит от среднегодовой температуры [6].

2. Фактор потепления в зональных условиях вечной мерзлоты с глубиной деятельного слоя от 0,3 до 1,5 м [7, 8] закладывает потенциал фундаментальной трансформации ландшафта с адекватной сменой растительности. Всякая климатическая вариация температуры, например в сторону потепления, сопровождается пошаговым смещением фитоценозов южных широт в сторону Севера. В равной степени смещается граница субарктической зоны тундры, обозначая появление древесных и кустарниковых форм на более высоких широтах.

3. Всякая широтная трансформация растительного покрова, отраженная в структуре картографируемых единиц, осуществляется для одинаковых типологических структур ландшафтов, образующих группу фитонаследуемых структур<sup>1</sup>. В рамках расширенной легенды карты растительности полуострова Ямал [7] главными типологическими признаками ландшафтов, образующих группу, были приняты:

— динамика и степень увлажнения природного комплекса, отраженного на карте как естественное следствие структуры рельефа и соотношения осадков и испарения;

<sup>1</sup> Карта растительности Западно-Сибирской равнины М 1:1500000. ГУГК 1976 г. М. Под общ. рук. ак. В.Б. Сочавы. Тематическое содержание карты дано в монографии: Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.

— типология почв, связанная с микро- и мезорельефом.

4. В свете изложенного каждый полигональный элемент схемы можно назвать парой идентификаторов  $\langle i, j \rangle$ , где  $i \in \{1, \dots, l\}$  — номер фитоэкологической группы, общее количество которых  $l$ ,  $j \in \{1, \dots, n\}$  — номер зоны, соответствующей установленной сетке естественного роста температуры при смещениях к югу.

При фиксированном шаге температур  $\Delta\theta$  имеем

$$\theta_{j+1} = \theta_j + \Delta\theta, \quad j \in \{1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Здесь  $j = 1$  соответствует холодной (высокой) широте, а  $j = n$ , напротив, наиболее теплой широте на наблюдаемой территории.

5. Количество фитоэкоценозов каждого  $\langle i, j \rangle$  элемента ландшафта будем оценивать блочным вектором состояния

$$\mathbf{v}(i, j, t) = \text{col} [\mathbf{v}_M(i, j, t) \mathbf{v}_T(i, j, t) \mathbf{v}_D(i, j, t)], \quad (2)$$

включающим состояния мохово-лишайникового яруса (M)

$$\mathbf{v}_M(i, j, t) = \text{col} [v_M(1, i, j, t) \dots v_M(m_M, i, j, t)],$$

травянисто-кустарникового яруса (T)

$$\mathbf{v}_T(i, j, t) = \text{col} [v_T(1, i, j, t) \dots v_T(m_T, i, j, t)]$$

и кустарниковый ярус (D)

$$\mathbf{v}_D(i, j, t) = \text{col} [v_D(1, i, j, t) \dots v_D(m_D, i, j, t)]$$

или объединенным графиком соответствующей спектрограммы, как на рис. 1.

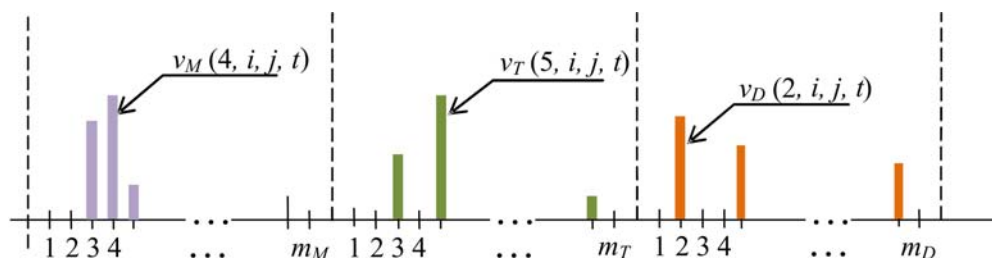


Рис. 1. Объединенная спектрограмма вектора состояния фитоэкоценозов  $\langle i, j \rangle$  элемента карты

В приведенных выражениях:

$v(r, i, j, t)$  — количественная характеристика присутствия  $r$ -го вида ценоза, приходящаяся на единицу площади  $\langle i, j \rangle$ -ого элемента (балльная оценка обилия, доля проективного покрытия, густота или плотность, прочее);

$m_M, m_T, m_D$  — учетное количество доминирующих видов на обследуемой территории;

$t$  — целочисленная переменная времени с шагом в один год.

6. Для анализа температурно-возмущенных процессов в фитоэкологических группах определим по аналогии с (2) векторы равновесных состояний системы для заданного зафиксированного распределения температур  $\{\dots\theta_j, \dots\}$ .

$$\mathbf{w}(i, j, t) = \text{col} [\mathbf{w}_M(i, j, t) \mathbf{w}_T(i, j, t) \mathbf{w}_D(i, j, t)]. \quad (3)$$

Всякое возмущение температурного поля  $\theta \neq \theta_j$  смещает равновесные состояния системы. Используя схему кусочно-линейной аппроксимации равновесных состояний широтно-сопряженных зон, введем выражение для вектора спектров распределения ценозов  $i$ -й группы для любого температурного возмущения  $\theta$  из диапазона возможных значений  $\theta \in [\theta_0, \theta_{n+1}]$ ,  $\theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_n < \theta_{n+1}$ ,

$$\mathbf{w}(i, \theta) = \sum_0^{n+1} \mu(j, \theta) \mathbf{w}(i, \theta_j), \quad (4)$$

где графики функций  $\mu(j, \theta)$  долевых пропорций, представленные на рис. 2, рассчитываются по формуле

$$\mu(j, \theta) = \frac{1}{\theta_j - \theta_{j-1}} [(\theta - \theta_{j-1})_+ - (1 + \alpha_j)(\theta - \theta_j)_+ + \alpha_j(\theta - \theta_{j+1})_+], \quad (5)$$

где  $\alpha_j = (\theta_j - \theta_{j-1}) / (\theta_{j+1} - \theta_j)$ ,  $j \in \{1, \dots, n\}$ .

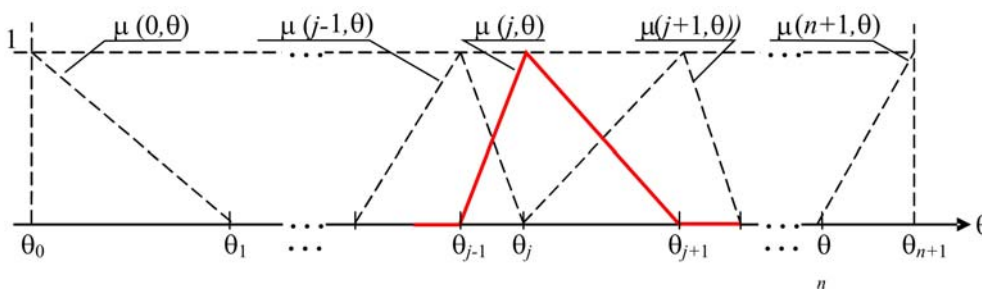


Рис. 2. Графики функций долевых пропорций (неравномерная сетка зональных температур)

Введение расширенных границ отрезка крайних векторов температур и соответствующих им векторов равновесных состояний  $\mathbf{w}(0, \theta_0)$ ,  $\mathbf{w}(n+1, \theta_{n+1})$  позволяет оценивать предельные образы состояния фитоценозов для крайних зон в условиях потепления,  $\theta \rightarrow \theta_{n+1}$  или похолодания,  $\theta \rightarrow \theta_0$  приземного слоя атмосферы.

Заметим, что для любых  $\theta \in [\theta_0, \theta_{n+1}]$  функций долевых пропорций (4) удовлетворяются условия нормирования

$$\sum_0^{n+1} \mu(j, \theta) = 1.$$

7. Определим модель динамики переходных режимов в фито наследственных группах при зональных возмущениях температурного слоя. Пусть, к примеру, в начальный момент времени  $t = 0$  структура растительного покрова соответствовала состоянию, близкому к равновесному:

$$\mathbf{v}(i, j, 0) \approx \mathbf{w}(i, \theta_j), \quad l = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

и с момента  $t = 0$  поле зональных температур равновесных состояний системы искажается климатическими возмущениями, т.е.

$$\theta(j, t) = \theta_j + u \theta(j, t), \quad \theta_0 \leq \theta(1, t) < \dots < \theta(n, t) \leq \theta_{n+1}. \quad (7)$$

Тогда асимптотическая динамика переходных режимов в фито наследственных группах может быть описана системой рекуррентных уравнений вида

$$\mathbf{v}(i, j, t+1) = \mathbf{v}(i, j, t) + \Lambda(i) (\mathbf{w}(i, \theta(j, t)) - \mathbf{v}(i, j, t)), \quad l = \overline{1, l}, \quad (8)$$

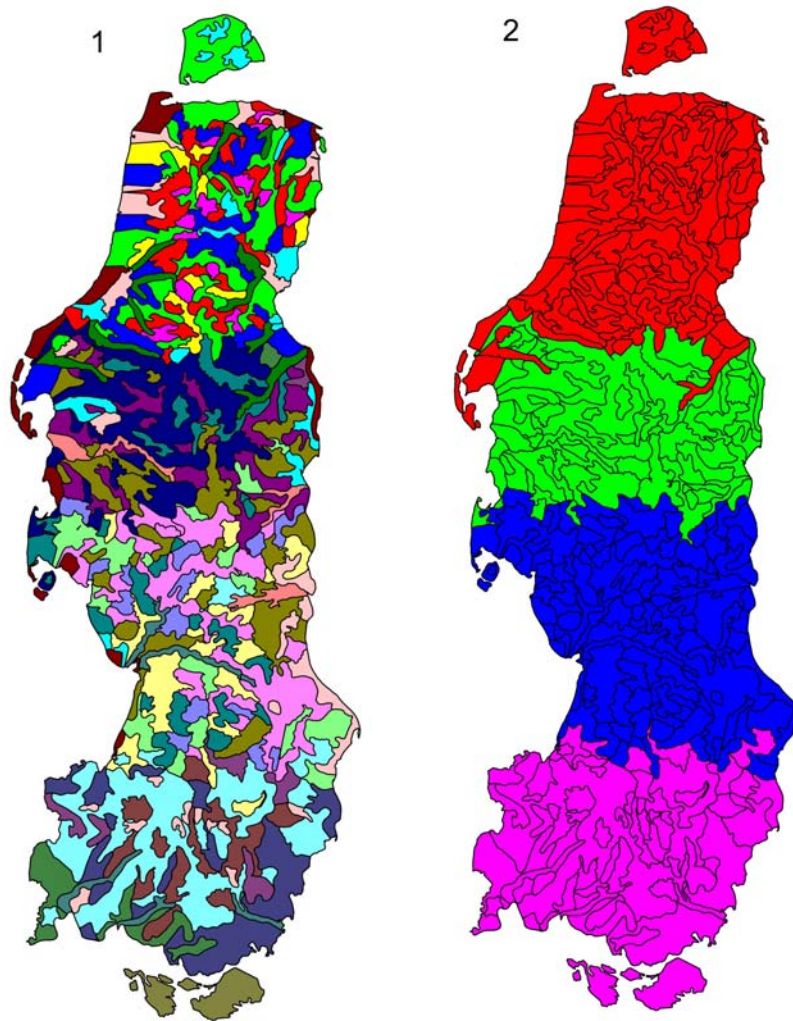
где в соответствии с (2) динамика трансформации ценозов устанавливается матрицей

$$\Lambda(i) = \text{diag}\{ \Lambda_M(i) \ \Lambda_T(i) \ \Lambda_D(i) \}, \quad (9)$$

в которой диагональные элементы  $\Lambda(i) = \text{diag}\{\lambda(1, i) \dots \lambda(m, i)\}$  индивидуальных скоростей процессов трансформации ценозов соответствуют репродукционным показателям вида. Если повидовая оценка периода трансформации —  $T(r, i)$  известна, то справедливо приближенное соотношение

$$\lambda(r, i) = (3 - 0,2(11 - T(r, i))_+) / T(r, i).$$

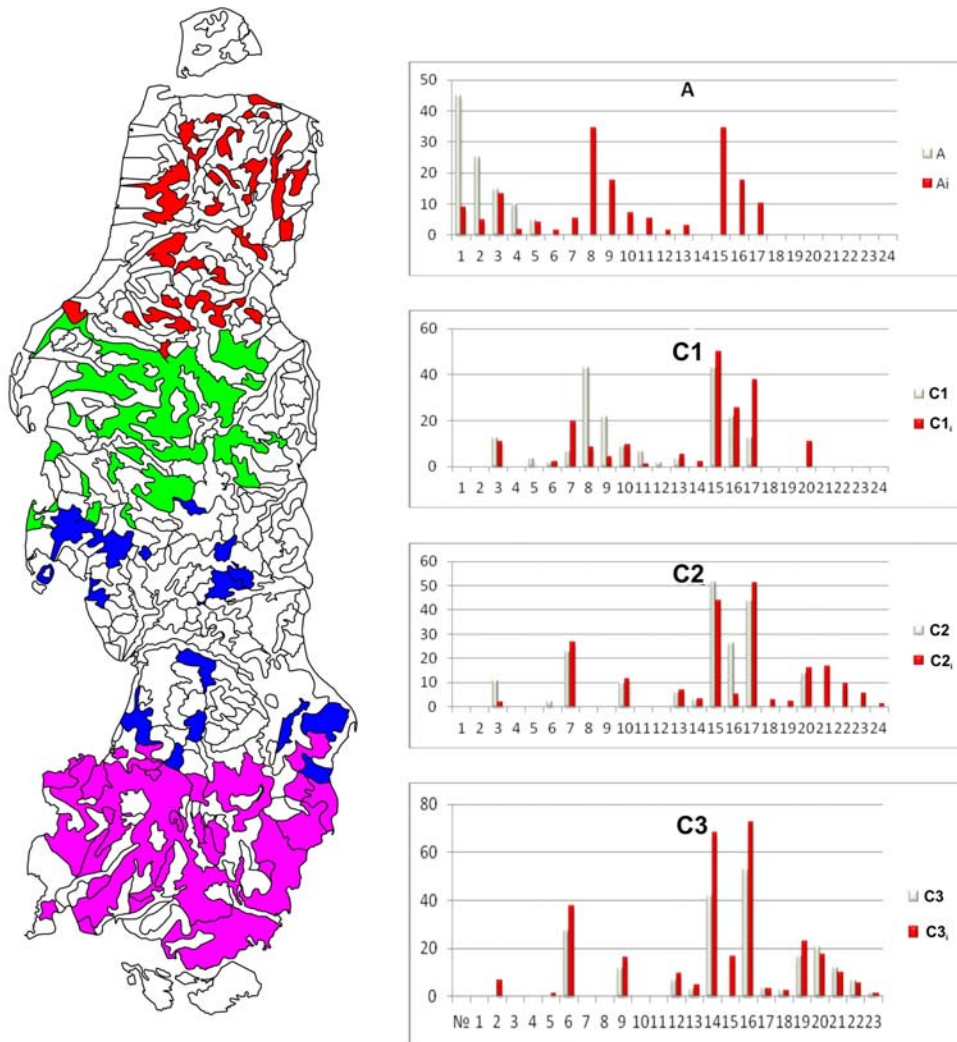
Сформулируем кратко результаты модельного анализа динамики трансформации фитоценозов полуострова Ямал.



**Рис. 3.** Карта-схема растительности полуострова Ямал (1) и результат широтно-зонального моделирования (агрегирования) (2)

В основе анализа лежит генерализованная карта-схема фитоценозов полуострова, представленная рис. 3, 1 [1] с легендой из 25-ти типологических единиц (классов и групп ассоциаций) растительного покрова. Качественная структуризация данных расширенного набора признаков ландшафта [6, 7, 8] с учетом широтно-зонального позиционирования структурных единиц расти-

тельного покрова позволила смоделировать на территории полуострова две зоны: тундры арктическую и субарктическую и три подзоны субарктической тундры (см. рис. 3, 2) и шесть фитонаследуемых групп. Результаты группировки структурных единиц растительного покрова приведены в таблице. На рис. 4 вынесены элементы первой фитонаследственной группы с балльной спектрограммой равновесных состояний до возмущения температурного поля и после долевого вариацией  $u\theta/\Delta\theta = 0,8$ .



**Рис. 4.** Карта-схема первой фитонаследственной группы и спектрограммы растительного покрова до и после температурной вариации.  
 А — тундры арктические, С1 — субарктические, подзона 1,  
 С2 — субарктические, подзона 2, С3 — субарктические, подзона 3

Предложенный подход и вычислительная схема анализа динамики трансформации растительного покрова удобна в практическом использовании, максимально ориентирована на типизированные данные полевых исследований, обобщенные в классификациях растительности и легендах геоботанических

карт. Ближайшая задача развития данного направления связана с классификацией и выделением фитонаследственных групп.

#### Результат агрегирования легенды из двадцати пяти формаций

	Широтно-зональное деление	A	C1	C2	C3
	Динамика и степень увлажнения				
1	Атмосферное проточное (Верхний уровень – 1)	1	9	14	18, 21
2	Атмосферное проточное оподзоленные песчаные (Верхний уровень – 2)	4, 5	12	22	
3	Атмосферное проточное и проточно-застойное (Средний уровень)	2, 3	10	15	19
4	Проточно-застойное, заболоченное с возможным грунтовым питанием (Низкий уровень)	6	11	16, 17	20, 25
5	Долины рек	8	13	24	
6	Приморские береговые отмели	7		23	

**Примечание.** А — тундры арктические; С1 — субарктические, подзона 1; С2 — субарктические, подзона 2; С3 — субарктические, подзона 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карта «Растительность Западно-Сибирской равнины». М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР. 1976.
2. Алещенко Г.М., Букварева Е.Н. Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия // Известия РАН Сер. биол. 2010, № 2. С. 5–15.
3. Галицкий В.В. Моделирование сообщества растений: индивидуально-ориентированный подход. 1. Модель сообщества // Известия РАН Сер. биол. 2000, № 1. С. 178–185.
4. Левич А.П. Принцип максимума энтропии и теоремы вариационного моделирования // Успехи современной биологии. 2004. Т. 124, № 6. С. 3–21.
5. Последствия изменения климата для биоразнообразия и биологических ресурсов России: Приоритетные направления исследований // Д.С. Павлов, В.М. Захаров // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131, № 4. 123 с.
6. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. ФГУП «Омская картографическая фабрика». Салехард; Тюмень: Администрация ЯНАО, ТюмГУ. 2004.
7. Мельцер Л.И. Фитоценотические аспекты устойчивости ландшафтов Ямала // Западная Сибирь — проблемы развития. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1994. С. 128–141.
8. Природная среда Ямала // В.Р. Цибульский, Э.И. Валеева, С.П. Арефьев и др. В 2-х томах, Т. 2. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1995. 104 с.
9. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://permafrost.su/sites/default/files/veg\\_web.pdf](http://permafrost.su/sites/default/files/veg_web.pdf).

V.M. Kalaydjan, I.G. Solovjov, V.R. Tsibulsky

#### DYNAMICS OF VEGETATION TRANSFORMATION AT CHANGES IN AVERAGE ANNUAL TEMPERATURE

A calculation scheme for the analysis of transformation in tundra vegetation due to the changes of the average annual temperatures in ground layer of atmosphere has been suggested. The analysis is based on the apparent idea that typological images of low latitude coenosis shift to the North with temperature rise.

**Phytocoenosis, vegetation map, transformation dynamics, phytohereditary groups.**