

Д.А. Говорков, И.Г. Соловьев

## МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

*Изложена схема вычислительного анализа динамики трансформации растительности в зафиксированных границах формаций карты фитоценозов полуострова Ямал при вариациях среднегодовых температур. В основе подхода лежит утверждение, что при потеплении климата новые образы формаций следует искать из прообразов растительного покрова более южных широт, где естественный фон температур был априорно выше.*

**Формация, растительность, фитонаследственные группы, модель.**

Анализ трансформации растительного покрова суши в районах Крайнего Севера имеет важное научное и прикладное значение для оценки биоресурсных потенциалов территорий и предельных состояний устойчивого сосуществования экосистем. Фактическое состояние растительности, количественный и качественный состав ценозов есть следствие многих причин, в основе которых лежат климатические и антропогенные факторы. Вариационная модель эволюции видового разнообразия, предложенная в [1, 2, 3], объясняет возможный механизм динамики трансформации растительности в общих системных позициях. Адаптация подобных моделей к природно-климатическим параметрам конкретных формаций остается весьма проблематичной задачей. Предложенная ниже модель оценки динамики трансформаций растительности вследствие потепления приземного слоя атмосферы на примере тундр полуострова Ямал отличается от известных [4] и упомянутых выше подходов [3] требуемой для практики детальностью анализа [5] и меньшим уровнем неопределенности, характерным для вероятностных распределений генно-видового отбора.

Главные предположения излагаемого подхода формулируются следующим образом. Возможные прообразы формаций фитоценозов вследствие роста температуры на обследуемой территории следует искать из образов формаций, расположенных южнее, где естественный уровень температур был априорно выше.

В рамках данного предположения почти полностью снимается неопределенность с поиском и обоснованием видового разнообразия обследуемой территории в условиях возмущения температур, т.к. возможные формации существуют в реальности и доступны эмпирическому изучению, а их образы систематизированы в виде карт и схем различной детальности и масштаба.

Основные положения по конструированию подобной модели произведем на примере карты «Растительность Западно-Сибирской равнины» [6] масштаба 1:1500000 в части полуострова Ямал. Согласно легенде, на данной территории выделена 31 формация, для которых приведено описание состава и структуры растительного покрова и указаны основные характеристики ландшафтов, в которых эти формации распространены [7]. Геоботанические и ландшафтные исследования, проведенные в последние 20 лет группой ученых ИПОС СО РАН (Л.И. Мельцер, Э.И. Валеева, С.П. Арефьев, Д.В. Московченко, В.А. Глазунов и др.), детализировали описание растительных сообществ и свойств биотопов (геоморфологические условия, эдафические факторы, типы и интенсивность увлажнения) [8, 9, 10] и ландшафтных индикаторов [11], что позволяет перейти к формализованному описанию эволюции растительности.

Задача о построении модели эволюции фитоценозов в зафиксированных границах формаций согласно исходному предположению связана с анализом следующих вопросов:

— Выделение формаций с явно выраженным широтно-зональным позиционированием.

— Районирование обследуемой территории по сочлененным границам формаций в пределах широтных зон, соответствующих трансгрессии среднегодовых температур с геотермальным вектором состояний  $\theta = [\theta_1 \dots \theta_m]^T$ ,  $\theta_{i+1} - \theta_i = \Delta\theta > 0$ , где  $m$  – количество выделяемых зон,  $\theta_i$  — температура  $i$ -й зоны,  $\Delta\theta$  — шаг температур.

— В условиях широтного районирования формирование «вертикальных» фитонаследственных групп (ФНГ) формаций, образующих наследуемые образы ценозов при вариации широтного поля температур на  $\Delta\theta$ .

— Разработка количественной модели трансформации растительности формаций, обусловленной вариациями или трендами поля среднегодовых температур.

Результаты анализа по данным вопросам применительно к карте растительности тундр полуострова Ямал свидетельствуют, о нижеследующем:

1. Растительный покров полуострова систематизирован по формациям в количестве 31. Каждая формация нумеруется  $j \in J = \{1, \dots, 31\}$  и имеет название, прописанное в легенде [7]. Доля суммарной площади  $S_j$  выделов, образующих  $j$ -ю формацию относительно общей площади полуострова, отражена диаграммой на рис. 1, где также указано количество  $l_j$  выделов  $j$ -й формации  $\langle S_j, l_j \rangle$ .

2. Основное количество формаций позиционируется с выделением четырех широтных зон (рис. 2), которые именуются [7]:

—  $Z_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$  — арктические тундры;

—  $Z_2 = \{10, 11, 12, 13, 14\}$  — северные субарктические тундры, соответствующие северной подзональной полосе субарктических типичных тундр;

—  $Z_3 = \{15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 30\}$  — центральные субарктические тундры, соответствующие южной подзональной полосе субарктических типичных тундр;

—  $Z_4 = \{22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 32\}$  — южные (кустарниковые) субарктические тундры.

Это свидетельствует о том, что структура растительности таких формаций обладает ярко выраженными температурными зависимостями.

3. Имеются формации {8, 31}, расположенные одновременно во всех широтных зонах. Температура для них не выступает главным структурообразующим фактором (интразональные формации). К данным формациям относятся сообщества приморских засоленных лугов, болота.

Выделяются формации с укрупненными широтными зонами {14, 15}, менее чувствительные к шагу вариации температур. Так, относительно малочувствительны к температурному режиму лишайниковые тундры, распространение которых в значительной степени определяется эдафическими факторами.

<i>j</i> – я формация	<i>S<sub>j</sub></i>	<i>I<sub>j</sub></i>
1) осок.-лиш.-мох. кочковатые тундры...	3,4	26
2) лиш.-мох. и кустарнич.-мох. кочк. тундры...	1,1	10
3) 2 в сочетании с моховыми заболоченными тундрами...	6,6	19
4) осок.-пуш.-мох. заболоченные тундры...	4,5	21
5) мох.-лиш. полигон. тундры... кустарничково-мохово-	1,3	15
6) 5 в сочетании с открытыми группировками растений...	1,4	8
7) арктические трав. и трав.-мох. болота...	2,5	13
8) приморские засоленные злак.-осок. заболоченные луга...	1,2	14
9) аркт. серия разнотравно-осок. и разнотравно-злак. лугов...	2,2	11
10) кустарнич.-лиш.-мох. с ивой и ерником бугорковатые тундры...	5,2	19
11) кустарнич., преимущ. дриад. с ивой и ерником тундры...	1,6	13
12) кустарнич.-мох. и лиш.-мох. с ивой и ерником тундры...	0,4	3
13) 12 в сочетании с осок.-гипн. и осок.-сфагн. болотами...	4,8	24
14) кустарнич.-мох.трав. с ивой и ерн. кочкарные тундры...	7,7	34
15) лишайниковые алекториевые тундры...	4,7	24
16) субаркт. серия сообществ разнотравно-злаковых лугов...	1,2	4
17) ерн.-ивн. осок.-лиш.-мох. бугорковатые тундры...	3,1	15
18) ерн.-ивн. местами с ольхой кустарнич.-мох. тундры...	2,9	19
19) ерн.-ивн. кустарнич.-лиш. алекториевые тундры...	2,3	15
20) 18 в сочетании с осок.-мох.-лиш. тундрами... трещиновато-	7,0	20
21) ерн.-ивн. трав.-кустарнич.-мох. заболоченные тундры...	4,2	18
22) ерн. и ивн.-ерн. кустарнич.-лиш.-мох. бугорковатые тундры...	4,0	12
23) ерн. и ивн.-ерн. с ольхой кустарнич.-мох. бугорковатые тундры...	5,7	20
24) ерн. и ивн.-ерн., местами с ольхой, мох.-лиш. тундры...	3,5	11
25) ерн. и ивн.-ерн. с ольхой кустарнич.-лиш.-мох. тундры...	3,0	6
26) ивн. трав.-мох. тундры в соч-ии с ивн.-ерн. лиш.-мох. тундрами	4,4	14
28) редкокустарниковые кустарнич.-зеленомошно-лиш. тундры...	1,7	5
29) серия гипн.-осок. болот, болотистых осоковых лугов...	3,5	38
30) субаркт. серия хвощ. на песках лугов...	0,6	1
31) осок.-гипн. и осоково-сфагн. на полигонах болота...	4,0	21
32) кустарнич.-зеленомошно-лиш. на полигонах болота...	0,3	4

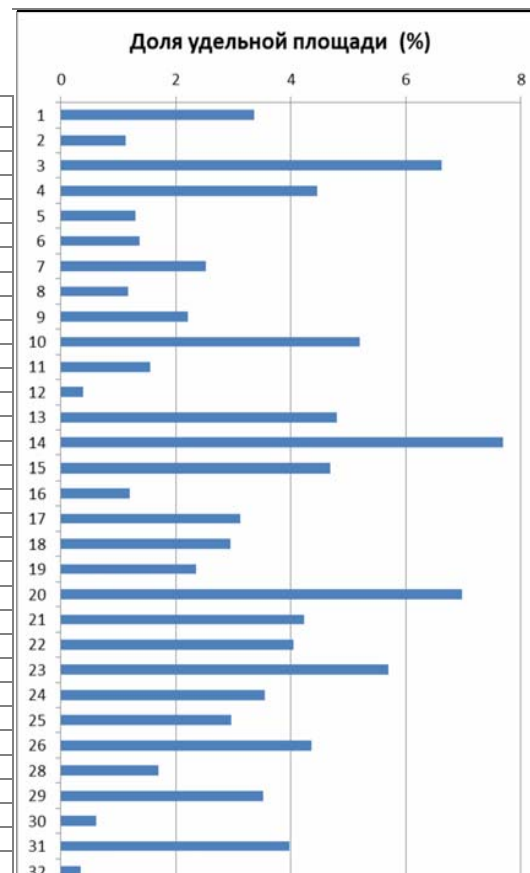
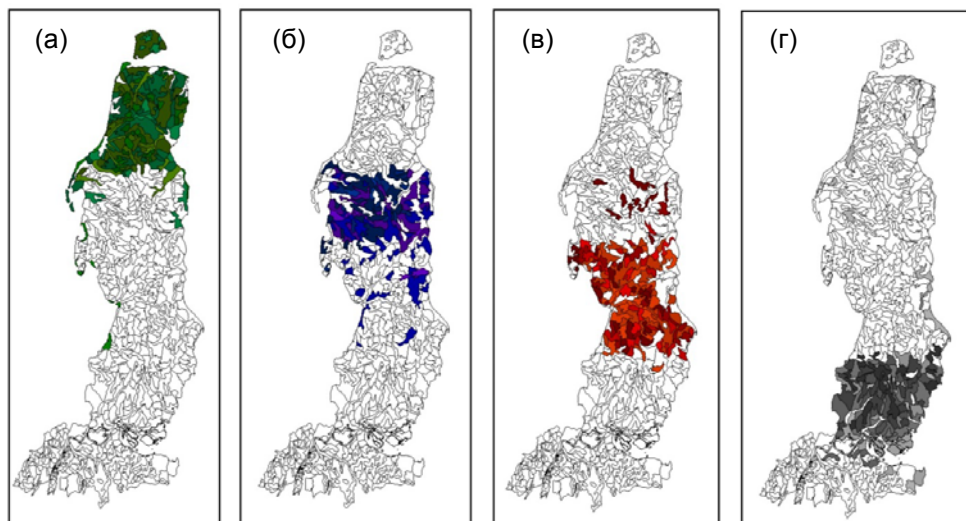


Рис. 1. Диаграмма относительных площадей формаций полуострова Ямал



**Рис. 2.** Карты формаций полуострова Ямал с распределением по широтным зонам: (а) — арктические тундры; (б) — субарктические типичные (северная полоса); (в) — центральные субарктические (южная полоса); (г) — субарктические кустарниковые

4. Выделение фито наследственных групп для формаций с явно выраженной широтной иерархией осуществлялось на основе корреляционной группировки ландшафтно-факторных признаков, связанных:

- с названием формации, отражающим состав эдификаторов и доминантов растительного покрова;
- с геоморфологическими условиями и характером увлажнения;
- с почвенно-эдафическими факторами;
- с мощностью сезонно-талого слоя.

Результаты корреляционного анализа по выделенным 8 ФНГ формаций сведены в табл. 1 и отображены на карте-схеме рис. 3.

Таблица 1

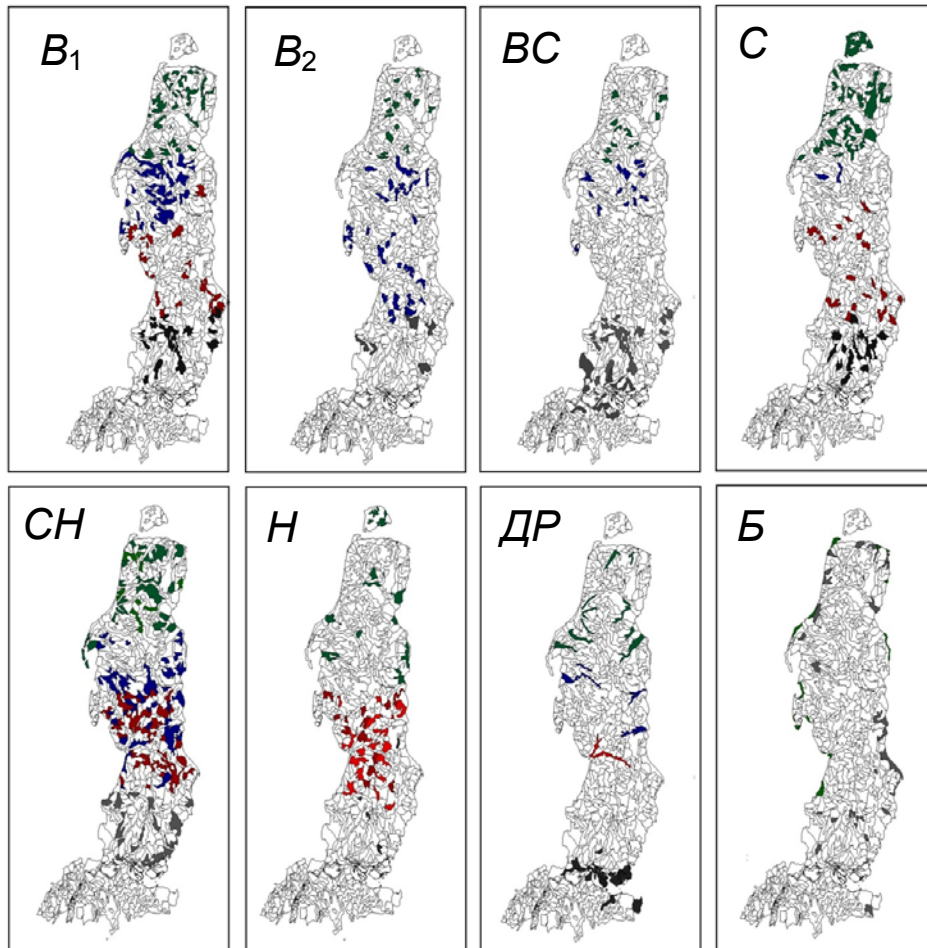
**Результаты группировки формаций с фито-наследственными признаками**

Наименование	В <sub>1</sub>	В <sub>2</sub>	ВС	С	СН	Н	ДР	Б
Арктические	1	5	2	3	4,6	7	9	8,31
Северные субарктические	10	—	11	12	13,14	—	6	
Центральные субарктические	17	15	—	18	20	19,21	30	
Южные субарктические	22	28	23,25	24	26	32	29	

Идентификаторы ФНГ и их базовые признаки:

- В<sub>1</sub> — плакоры относительно дренированные, с атмосферным проточным увлажнением и преобладанием тундровых глеевых и торфяно-глеевых почв (верховые);
- В<sub>2</sub> — плакоры относительно дренированные, с атмосферным проточным увлажнением и песчаными подзолистыми почвами (верховые);
- С — сниженные участки водоразделов, слабодренированные, с проточно-застойным увлажнением (средние);
- Н — понижения и западины с застойным увлажнением (низовые);
- ДР — поймы и долины рек;

- Б — береговые отмели и полосы (интрозональные).
- Группы с промежуточными переходными признаками:
- ВС — (верховые-средние);
- СН — (средне-низовые).



**Рис. 3.** Карты формаций полуострова Ямал с выделенными ФНГ

Согласно таблице 1 и в соответствии с картой [6] для четырех широтных зон выделяются семь ФНГ с индексными множествами формаций:

- $B_1 : I_1 = \{1, 10, 17, 22\}$ ,
- $B_2 : I_2 = \{5, 15, 28\}$ ,
- $BC : I_3 = \{2, 11, 23, 25\}$ ,
- $C : I_4 = \{3, 12, 18, 24\}$ ,
- $CH : I_5 = \{4, 6, 13, 14, 20, 26\}$ ,
- $H : I_6 = \{7, 19, 21, 32\}$ ,
- $DP : I_7 = \{9, 16, 30, 29\}$ .

5. Флористическое разнообразие полуострова представлено тремя списками:

- мхи и лишайники — 62 вида,
- кустарнички и травы — 389 видов,
- деревья и кустарники — 18 видов.

В соответствии с отмеченными списками состояние каждой  $j$ -й формации характеризуется тремя векторами состояний:

— мохово-лишайникового яруса

$$\mathbf{v}_M(j, k) = [v_M(1, j, k) \quad \dots \quad v_M(62, j, k)]^T,$$

— травяно-кустарничкового яруса

$$\mathbf{v}_T(j, k) = [v_T(1, j, k) \quad \dots \quad v_T(389, j, k)]^T,$$

— кустарниково-древесного яруса

$$\mathbf{v}_D(j, k) = [v_D(1, j, k) \quad \dots \quad v_D(18, j, k)]^T.$$

Учитывая возможную эволюцию состояния видов вводится параметр дискретного времени  $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ . Вариации векторов оцениваются с периодом в один год. Всякая ненулевая компонента вектора  $\mathbf{v}_\bullet(i, j, k)$  определяет меру присутствия особей  $i$ -го вида для  $j$ -й формации в баллах (подобие площади проекционного покрытия, биомассы и прочих количественных характеристик).

Асимптотическая динамика трансформации фитоценозов формаций при вариации среднегодовой температуры для каждой  $l$ -й ФНГ будем представлять системой разностных уравнений вида [5]:

$$\mathbf{v}(j, k+1) = \mathbf{v}(j, k) + \Lambda \left( \sum_{s \in I_l} \mu(s, \theta(j, k)) \cdot \mathbf{w}(s) - \mathbf{v}(j, k) \right), \quad j \in I_l,$$

где блочный вектор состояния ценозов  $j$ -й формации в  $k$ -м годовом цикле имеет вид

$$\mathbf{v}(j, k)^T = [\mathbf{v}_M(j, k)^T \quad \mathbf{v}_T(j, k)^T \quad \mathbf{v}_D(j, k)^T],$$

блочные векторы равновесного состояния ценозов формаций  $s \in I_l$ ,  $l$ -й ФНГ

$$\mathbf{w}(s)^T = [\mathbf{w}_M(s)^T \quad \mathbf{w}_T(s)^T \quad \mathbf{w}_D(s)^T]$$

для фиксированного поля широтных температур

$$\theta_0 = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_m]^T, \quad \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta,$$

$\theta(j, k)$  — текущее состояние температуры в зоне  $j$ -й формации.

Блочно-диагональная матрица динамики трансформации ценозов

$$\Lambda = \text{blockdiag}[\Lambda_M \quad \Lambda_T \quad \Lambda_D],$$

где  $\Lambda_M = \text{diag}\{\dots \Lambda_{Mi} \dots\}$ ,  $\Lambda_T = \text{diag}\{\dots \Lambda_{Ti} \dots\}$ ,  $\Lambda_D = \text{diag}\{\dots \Lambda_{Di} \dots\}$  с параметрами собственного времени самовосстановления  $i$ -го вида ценоза.

Если  $T_{\bullet i}$  — время переходного процесса регенерации  $i$ -го ценоза, то параметр  $\lambda_{\bullet i} (< \bullet > := < M, T, D >)$  будем оценивать по выражению

$$\lambda_{\bullet i} = \frac{3,38}{T_{\bullet i}} - 0,182 \left( \frac{11}{T_{\bullet i}} - 1 \right)_+.$$

В приведенном уравнении вектор

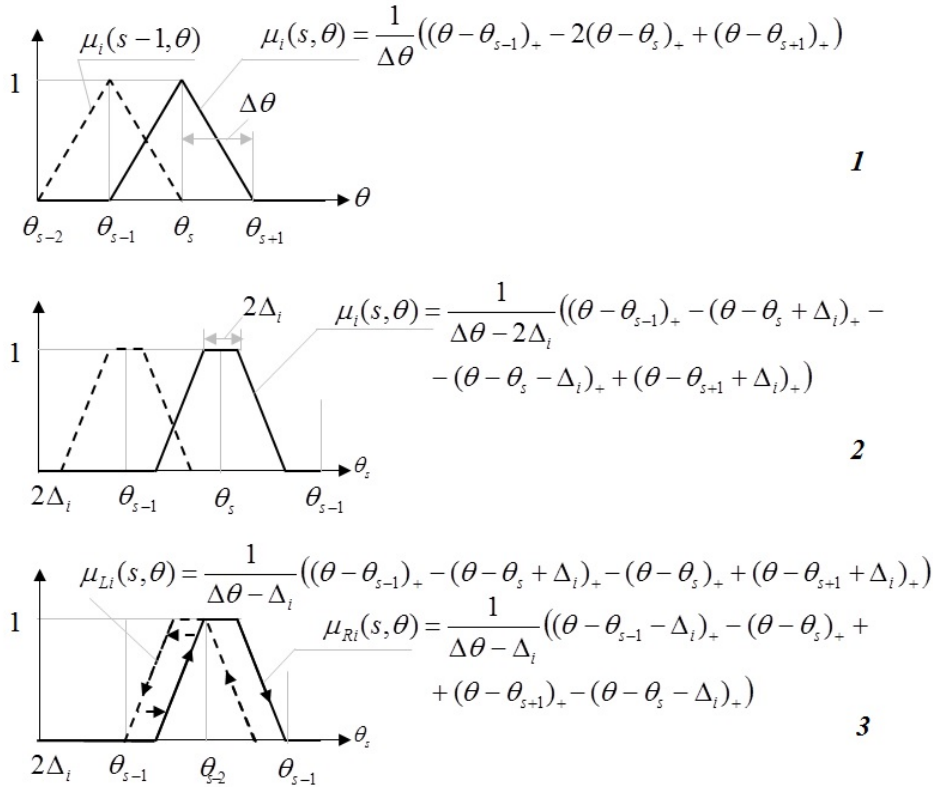
$$\mathbf{v}(j, \theta_j) = \sum_{s \in I_j} \mu(s, \theta(j)) \cdot \mathbf{w}(s)$$

есть равновесное состояние растительности  $j$ -й формации  $l$ -й ФНГ при зафиксированной температуре  $\theta(j)$ , возможно, отличной от  $\theta_j$ .

Диагональные матрицы трансформационных преобразований

$$\mu(s, \theta(j)) = \text{diag}\{\dots \mu_i(s, \theta(j)) \dots\}$$

образованы функциями переходов, возможные графики которых представлены на рис. 4 (1-3).



**Рис. 4.** Функции переходов трансформируемых формаций при вариации зональной температуры  $\theta_{\bullet}$ : 1 — равномерные линейные трансформации;

2 — равномерные линейные трансформации с зонами нечувствительности  $\Delta_i$  (устойчивости) относительно стационарных температур  $\theta_j$ ; 3 — трансформации гистерезисного типа с зоной нечувствительности  $\Delta_i$  при обратных сменах температур

Функция перехода гистерезисного типа (см. рис. 4 (3)) строится следующим образом:

$$\mu_i(s, \theta(k+1)) = \begin{cases} \max\{\mu_i(s, \theta(k)), \mu_{Ri}(s, \theta(k+1))\}, & \text{если } \theta(k+1) - \theta(k) \geq 0 \\ \min\{\mu_i(s, \theta(k)), \mu_{Li}(s, \theta(k+1))\}, & \text{если } \theta(k+1) - \theta(k) < 0 \end{cases}$$

и отражает свойство устойчивости отдельных особей и/или микробиом [4] к возвратным вариациям хода среднегодовых температур.

Авторы признательны д.т.н. В.Р. Цибульскому за активное обсуждение темы исследований и д.г.н. Д.В. Московченко — за высказанные замечания и предложения по корректуре текста работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Левич А.П. Принцип максимума энтропии и теоремы вариационного моделирования // Успехи современной биологии. — 2004. — Т. 124, № 6. — С. 3–21.
2. Алещенко Г.М. Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия / Г.М. Алещенко, Е.Н. Букварева // Известия РАН Сер. биол. — 2010, № 2. — С. 5–15.
3. Фурсова П.В. Экстремальные принципы в математической биологии / П.В. Фурсова, А.П. Левич, В.Л. Алексеев // Успехи современной биологии. — 2003. — Т. 123, № 2. — С. 115–137.
4. Анисимов О.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России [Электрон. ресурс] / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, С.А. Ренева. — Режим доступа: [http://permafrost.su/sites/default/files/veg\\_web.pdf](http://permafrost.su/sites/default/files/veg_web.pdf).
5. Калайджан В.М. Динамика трансформации растительного покрова при вариации среднегодовой температуры / В.М. Калайджан, И.Г. Соловьев, В.Р. Цибульский // Вестн. кибернетики, 2014. — № 1 (13). — С. 37–42.
6. Карта «Растительность Западно-Сибирской равнины» / Под общ. ред. ак. В.Б. Соचाва. — М.: ГУГК, 1976.
7. Растительный покров Западно-Сибирской равнины / И.С. Ильина, Е.И. Лапшина, Н.Н. Лавренко и др. — Новосибирск: Наука, 1985. — 251 с.
8. Мельцер Л.И. Фитоценоотические аспекты устойчивости ландшафтов Ямала // Западная Сибирь — проблемы развития. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1994. — С. 128–141.
9. Природная среда Ямала: В 2-х томах / В.Р. Цибульский, Э.И. Валева, С.П. Арефьев и др. — Т. 2. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1995. — 104 с.
10. Московченко Д.В. Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири / Д.В. Московченко, отв. ред. С.П. Арефьев. — Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2013. — 259 с.
11. Московченко Д.В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал) // Вестник ТюмГУ. — 2013. — № 12. — С. 57–66.

Тюмень, ТГНГУ  
dagovorkov@mail.ru  
Тюмень, ИПОС СО РАН  
solovyev@ikz.ru

*D.A. Govorkov, I.G. Solovyev*

*Model of vegetation transformation in formations of Yamal*

*The computational analysis scheme of vegetation transformation dynamics in formations of Yamal phytocoenosis map due to average annual temperature variations is presented.*

*It is suggested that with the warming new formation shapes are according to the preimage of southern regions vegetation with the higher natural temperature.*

**Formation, vegetation, groups of phyto inheritance, model.**