= МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ==

УДК: 574.5:51-7:62

# МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ КЛИМАТОГЕННОЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ ДАННЫХ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Арефьев С.П.<sup>1,2</sup>, Глазунов В.А.<sup>1</sup>, Говорков Д.А.<sup>\*1</sup>, Московченко Д.В.<sup>1,2</sup>, Соловьёв И.Г.<sup>1</sup>, Цибульский В.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем освоения Севера Сибирского Отделения РАН, Тюмень, Россия <sup>2</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Рассмотрено правило геоинформационного конструирования модели динамики растительного покрова вызванной вариациями температурного фона. В основе конструкции лежит геоботаническая карта растительных формации определяющая детальность пространственного анализа, а также таблица данных видового и количественного состава растений обследуемой территории. Согласно постулируемых предположений при потеплении вектор состояния растительного покрова северной зоны будет приобретать значения, соответствующие растительному образу формации сопрягаемой южной зоны если они принадлежат одной ландшафтно-подобной группе. Приводятся результаты вычислительного анализа динамики растительности тундр для доминирующих видов растений северной субарктической зоны полуострова Ямал.

**Ключевые слова:** динамика, растительный покров, формация, опорная температура, опорный вектор состояния растительности, динамика самовосстановления, устойчивость.

Оценка динамики растительного покрова при изменении климатических факторов имеет не только теоретический интерес, но и важное практическое значение. Изменения растительности тундр полуострова Ямал при естественном росте температурного фона усиленные влиянием техногенеза меняют биоресурсную базу территории, а вместе с тем и традиционные уклады жизнеобеспечения [1, 2] аборигенного населения. Динамику флористического многообразия удобно оценивать на основе геоботанических карт формаций растительного покрова обследуемой территории. Масштаб карты предопределяет детальность пространственного анализа с вылелением фиксацией доминант ландшафтно-флористических И признаков образующих легенду карты. Без ограничения общности последующий анализ будем осуществлять с использованием флористических данных по тундрам Ямала на основе геоботанической карты формаций «Растительность Западно-Сибирской равнины» [3] масштаба 1:1500000, составленной и изданной в 1976 году под научным руководством академика В.Б. Сочавы.

Рассмотренная ниже модель реакции растительного покрова на вариации температурного фактора основывается на четырёх предположениях, два из которых отражают ландшафтно-экологическую закономерность распределения флористических образов формаций для дискретного поля распределения температурного фактора [4] – так называемая модель дискретных равновесных состояний. Два других

<sup>\*</sup>dagovorkov@mail.ru

предположения отражают общесистемные закономерности [5–7], фиксируя равновесные флористические образы формаций при непрерывной вариации температурного фактора, а также динамику переходных процессов популяций с учётом индивидуальных характеристик устойчивости и периодов самовосстановления каждого вида растений [8].

Основное предположение носит общий ландшафтно-экологический характер, отражая закономерности широтной ориентации природно-климатических зон ортогонально градиенту снижения температурного фактора в сторону Севера [9]. Постулируя доминирующее влияние температуры в условиях произрастания видов [10], первое предположение применительно к исходной карте формаций растений формулируется следующим образом.

**Предположение 1.** Флористические образы формаций южных зон с потеплением будут «смещаться» вдоль градиента температурного фактора и воспроизводиться в границах формаций сопрягаемых северных зон, а с похолоданием имеет место обратное «смещение» с Севера на Юг.

Описание флористического многообразия обследуемой территории на языке картографической модели формаций позволяет оценивать динамику растительного покрова с большей детальностью в отличие от традиционных схем анализа смещения границ крупных природных зон, отражая возможные вариации флористических состояний в границах выделов каждой формации. Желаемая детальность анализа достижима, если удастся найти ответ на вопрос: Какой из флористических образов формаций южной зоны будет воспроизводиться в пределах границ заданной формации сопрягаемой северной зоны при полношаговой вариации температуры? Под полношаговой понимается такая вариация температурного фактора по шкале градиента, которая соответствует позициям формаций из сопрягаемых широтных зон. Ответ на вопрос предлагается искать, основываясь на следующем предположении.

**Предположение 2.** Ориентированные вдоль градиента температурного фактора группы формаций, в рамках которых реализуются процессы «смещения» флористических образов при вариациях температур имеют сходные ландшафтно-экологические условия произрастания.

Для плоскоравнинного рельефа Ямала к главным ландшафтным признакам произрастания можно отнести следующие.

- Степень и характер увлажнения, оцениваемые по признакам:
  - атмосферно-проточные зоны,
  - атмосферно-проточно-застойные,
  - проточно-застойные,
  - проточно-застойные с грунтовым питанием,
  - застойные зоны.
- Литологическое строение и параметры почво-грунтов.
- Ландшафтно-мерзлотные проявления с оценками глубин сезонно-талого слоя.

Ландшафтно-геоботанические исследования полуострова, проведённые ИПОС СО РАН в последнее двадцатилетие прошлого столетия [11, 12] и сформированная на их основе таблица признаков произрастания для каждой формации полуострова, дополненная ландшафтно-флористическими доминантами легенды карты [13], позволили дать вариант решения поставленной задачи с выделением восьми ландшафтно-подобных групп (ЛПГ). Полученный вариант группировки с разделением на четыре температурные зоны сведён в таблице 1 и представлен на рисунке 1 [14, 15].

Таблица 1. Группировка	формаций полуострова	Ямал
------------------------	----------------------	------

Наименование	<b>B</b> <sub>1</sub>	<b>B</b> <sub>2</sub>	BC	С	СН	Н	ДP	Б
Арктические	1	5–6	2–3	I	4	7	9	
Северные субарктические	10	-	11	12-13	14	-	16	8,
Центральные субарктические	17	15	1	18-20		19,21	30	31
Южные субарктические	22	28	23,25	24	26	32	29	



Рис. 1 Картографические образы выделенных групп формаций полуострова Ямал.

По результатам построения отметим следующее.

1. Из 27 формаций, представленных на полуострове, 25 допускают разделение по широтным температурным зонам, которые в таблице поименованы как:

- арктическая зона,
- северная субарктическая,

• центральная субарктическая,

• южная субарктическая.

2. В идентификаторах выделенных групп условно отражается ландшафтно-рельефная доминанта:

• B<sub>1</sub> и B<sub>2</sub> – верховые локально водораздельные плакоры с атмосферно-проточным увлажнением, различимые по составу почво-грунтов,

• Н – низины, застойно-болотные комплексы,

• С – формации с дифференциально переходной структурой проточных и застойных зон (средний уровень),

• ВС и СН – формации переходного типа между верхним и средним уровнями и между средним и застойными низинами с соответствующими условиями увлажнения,

• ДР – отдельно выделяются формации, приуроченные к долинам крупных для полуострова рек,

• Б – формации береговых полос морей, для которых температурный фактор не выявлен как доминирующий. Такие формации в масштабе полуострова являются интразональными и в вычислительный анализ не включены.

3. Согласно принятым предположениям, возможные флористические образы формаций, вызванные температурными возмущениями, ограничены видовым составом растений выбранной группы. Поэтому, расчётную схему анализа динамики растительности с априорным выделением границ, количества видов – n(j) (j - номер)группы) и среднезонального значения невозмущённого температурного фактора - $\Theta(j,i), i \in I(j) = \{1,...,n(j)\}$  (*i* – номер широтной зоны) вдоль градиента его снижения к Северу, следует строить индивидуально для каждой *j*-й группы, ориентируясь на однократное присутствие формации В назначаемых широтно-температурных интервалах.

4. Приведенный в таблице 1 результат с выделением четырёх температурных зон общих для всех групп формаций Ямала с единым шагом фактора  $\Delta\Theta$  (рис. 2), даёт упрощенное решение поставленной задачи, оставляя некоторые неопределённости выбора образов флористических вариации для тех групп, которые содержат более одной формации в границах одной температурной зоны. Снятие неопределённости возможно двумя способами. Первый, за счёт огрубления модели путём объединения флористики формаций одной широтной зоны. Второй, более предпочтительный, связан с индивидуальным разделением формаций группы на широтные зоны с индивидуальной шкалой температур. Следует признать, что качество анализа в рамках принятых предположений напрямую зависит от исходной ландшафтной систематики растений, положенной в основу геоботанической карты.



**Рис. 2.** Широтное деление формаций полуострова Ямал (А– арктические тундры, ССА – северные субарктические, ЦСА – центральные субарктические, ЮСА– южные субарктические тундры).

Без ограничения общности рассмотрим модель ЛПГ по типу В<sub>1</sub> или ДР (табл. 1), где в каждой температурной зоне позиционируется одна формация. В этом случае номер широтной зоны  $i \in I = \{1, ..., n\}$ , где i = 1 соответствует верхней позиции со стороны Севера, одновременно является идентификатором формации.

Пусть  $\Theta(i,k)$  – значение температурного фактора *i* -й зоны в *k* -м году, а  $\Theta(i)$  – его среднее значение за длительные многолетние наблюдения, тогда в равенстве

$$\Theta(i,k) = \Theta(i) + \delta(k), \ i \in I$$
(1)

 $\Theta(i)$  – это опорное значение для *i*-й зоны, а  $\delta(k)$  – уровень возмущения температуры в k-м году для всех зон и групп одновременно.

Пусть N — учетное количество видов растений всех формаций группы. Тогда вектор состояния растительного покрова *i* -й формации группы в *k* -м году вводится следующей записью:

$$v(i,k) = \begin{bmatrix} v(1,i,k) & v(2,i,k) & \dots & v(N,i,k) \end{bmatrix}^{T},$$
(2)

где v(l,i,k) – мера присутствия популяции *l*-го вида в *i*-й формации, оцениваемая в балах ( $v(l,i,k) \in [0,5]$  для  $\forall l,i,k$ ).

Наряду с вышеопределенным вектором, отражающим количественный и качественный состав растительного покрова формаций в текущем k-м году и зависящим от графика изменения температурного фактора  $\Theta(i, s)$  до текущего года s < k, введем вектор опорных состояний, соответствующий значению  $\Theta(i)$ :

$$\mathbf{w}(i) = \begin{vmatrix} w(1,i) & w(2,i) & \dots & w(N,i) \end{vmatrix}^{t} .$$
(3)

Последующее конструирование динамической модели связано с актуализацией двух закономерностей, лежащих в основе вычислений переходных режимов.

Первая закономерность призвана ответить на вопрос: К какому флористическому образу стремятся формации группы, если новое состояние температурного фактора (1) обусловленное возмущением  $\delta(k)$  сохраняется неизменным произвольно долго? Такие состояния, рассчитанные для любых температурных возмущений,  $\delta = \delta(k)$  будем именовать равновесными и, по аналогии с (3), обозначать  $\mathbf{w}(i,k)$ . Иными словами,  $\mathbf{w}(i,k)$  – это векторный график состояний растительности *i*-й формации  $\mathbf{v}(i,k)$  при мгновенной отработке биотой температурного возмущения  $\delta(k)$ . Реальная скорость стремления  $\mathbf{v}(i,k)$  к  $\mathbf{w}(i,k)$  определяется жизненными стадиями произрастания каждого вида [16] и не может быть мгновенной. Изменчивость популяции каждого вида определяется не только его предельными состояниями, но и собственным временем самовосстановления –  $\Delta T(l)$ , где l – номер вида в списочном составе растений группы.

Вторая закономерность призвана установить количественную модель перехода каждого вида растений из одного равновесного состояния к другому, обусловленному температурными возмущениями.

**Предположение 3.** Динамика перехода каждой популяции l-го вида из состояния v(l,i,k-1) в новое v(l,i,k), обусловленное обновлённым равновесным состояние текущего года — w(l,i,k), аппроксимируется моделью динамики первого порядка:

$$v(l, i, k) = \lambda(l)v(l, i, k-1) + (1 - \lambda(l))w(l, i, k),$$
(4)

где параметр скорости сходимости  $\lambda(l)$  оценивается по времени самовосстановления популяции согласно выражению:  $\lambda(l)^{\Delta T(l)} = 0.02$ .

В рамках ранее введённых предположений 1 и 2, флористический образ равновесного состояния *i*-й формации, соответствующий опорному значению w(i,k) = w(i) приобретает новое равновесное значение w(i+1,k) = w(i+1), если уровень температурного возмущения (потепления) соответствует целому шагу  $\delta(k) = \Theta(i+1) - \Theta(i)$ .

Следует определиться с тем, какое равновесное состояние приобретает формация, если шаг температурного фактора произволен и не равен целому  $\delta(k) \neq \Theta(i+1) - \Theta(i)$ . Среди множества вариантов решения данной задачи рассмотрим два характерных случая. Первый – с немедленным реагированием равновесного состояния на любые температурные возмущения. В этом случае будем говорить, что популяция не обладает заметными признаками устойчивости. Во втором случае вводится механизм гистерезисной [13] устойчивости популяции к прямым и возвратным вариациям температур.

Пусть индексное множество видовых популяций группы  $IN = \{1, 2, ..., N\}$  разделено на два подмножества. Первое  $IN_1$  включает номера видов, не обладающих признаками устойчивости и  $IN_2 = IN \setminus IN_1$  – номера видов устойчивых к вариациям температурного фактора. Новое предположение, устанавливающее вид связи опорных состояний при расчете равновесных значений, формулируется следующим образом.

**Предположение 4.** В условиях (1) и (3) равновесное состояние *l*-й популяции *i*-й формации при дробной вариации температуры будем рассчитывать следующим образом:

$$w(l,i,k) = \mu(l,1,\Theta(i,k)) \cdot w(l,1) + \dots + \mu(l,m,\Theta(i,k)) \cdot w(l,m) + \mu(l,n,\Theta(i,k)) \cdot w(l,n), l \in LN,$$
(5)

где  $\mu(l,m,\Theta)$  — долевая функция (m=1,n) сопряжения опорного состояния m-й широтной зоны при температурном факторе  $\Theta$ , оцениваемая выражением:

$$\mu(l,m,\Theta) = \begin{cases} \mu_1(m,\Theta) \ ecnu \ l \in IN_1 \\ \mu_2(m,\Theta) \ ecnu \ l \in IN_2, \end{cases}$$
(6)

где функция  $\mu_1(m, \Theta)$  изображена на рисунке 3 и представлена равенством

$$\mu_{1}(m,\Theta) = \frac{1}{\Theta(m) - \Theta(m-1)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m-1)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m)\big)_{+} \Big] - \frac{1}{\Theta(m+1) - \Theta(m)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m+1)\big)_{+} \Big].$$



Рис. 3. Долевые функции сопряжения опорных векторов для видов, не обладающих заметными признаками устойчивости.



**Рис. 4.** Долевые функции сопряжения опорных векторов для видов, обладающих механизмами гистерезисной устойчивости.

261

Долевые функции  $\mu_2(l, m, \Theta(i, k))$  различаются шириной интервала нечувствительности  $\Delta(l)$  гистерезисной петли (см. рис. 4) и имеют следующее аналитическое описание:

$$\mu_{2}(l,m,\Theta(i,k)) = \begin{cases} \mu_{2}(l,m,\Theta(i,k-1)), & ecnu \ \Theta(i,k) \in \left[ \ \Theta_{L}(l,m,k-1)); \Theta_{R}(l,m,k-1)) \right], \\ \mu_{R}(l,m,\Theta(i,k)), & ecnu \ \Theta(i,k) > \Theta_{R}(l,m,k-1)), \\ \mu_{L}(l,m,\Theta(i,k)), & ecnu \ \Theta(i,k) < \Theta_{L}(l,m,k-1)). \end{cases}$$
(7)

где  $\mu_R(l, m, \Theta)$  – правая и  $\mu_L(l, m, \Theta)$  – левая части графика:

$$\mu_{R}(l,m,\Theta) = \frac{1}{\Theta(m) - \Theta(m-1) - \Delta(l)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m-1) - \Delta(l)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m)\big)_{+} \Big] - \frac{1}{\Theta(m+1) - \Theta(m) - \Delta(l)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m) - \Delta(l)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m+1)\big)_{+} \Big]$$

$$\mu_{L}(l,m,\Theta) = \frac{1}{\Theta(m) - \Theta(m-1) - \Delta(l)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m-1)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m) - \Delta(l)\big)_{+} \Big] - \frac{1}{\Theta(m+1) - \Theta(m) - \Delta(l)} \Big[ \big(\Theta - \Theta(m)\big)_{+} - \big(\Theta - \Theta(m+1) - \Delta(l)\big)_{+} \Big]$$

Координаты интервалов нечувствительности  $[\Theta_L(l,m,k-1)), \Theta_R(l,m,k-1))]$  для любого значения  $\mu_2(l,m,\Theta(i,k-1))$  легко рассчитываются по представленным на рисунке 4 графикам. Приведенные графики свидетельствуют, что при итоговом расчете равновесного состояния сумма (5) для любого  $\Theta(i,k) \in [\Theta(1),\Theta(n)]$  сокращается до двух ненулевых слагаемых. Если  $\Theta(i,k) \in [\Theta(m),\Theta(m+1)]$ , то имеем

$$w(l,i,k) = \mu(l,m,\Theta(i,k)) \cdot w(l,m) + \mu(l,m+1,\Theta(i,k)) \cdot w(l,m+1)$$

Для остальных слагаемых, согласно графика на рисунке 4 и определений (6), (7), выполнено:

$$\mu(l, s, \Theta(i, k)) = 0, \ s \in I \setminus \{m, m+1\},\$$

причем

$$\mu(l,m,\Theta(i,k)) + \mu(l,m+1,\Theta(i,k)) = 1.$$

Для последующего анализа динамических свойств растительности формаций, представим уравнение (4) в операторной форме

$$v(l,i,k) = \frac{1 - \lambda(l)}{1 - \lambda(l)z^{-1}} w(l,i,k),$$
(8)

где  $z^{-1}$  – операция временного запаздывания на один шаг, и применим данный оператор к сумме (5) равновесных значений. Результат преобразования можно записать в виде.

$$v(l,i,k) = \eta(l,1,i,k) \cdot w(l,1) + \dots + \eta(l,m,i,k) \cdot w(l,m) + \eta(l,n,i,k) \cdot w(l,n),$$
(9)

где, согласно (8), долевые функции связи опорных состояний приобретут инерционные свойства *l*-й популяции

$$\eta(l,m,i,k) = \frac{1-\lambda(l)}{1-\lambda(l)z^{-1}}\mu(l,m,\Theta(i,k))$$

или

$$\eta(l,m,i,k) = \lambda(l)\eta(l,m,i,k-1) + (1-\lambda(l))\mu(l,m,\Theta(i,k)).$$
(10)

Именно по динамике состояния  $\eta(l, m, i, k)$  фактического присутствия *l*-го вида популяции в границах *i*-й формации при температурном состоянии  $\Theta(i, k)$  *m*-й зоны удобно судить об искомых свойствах динамики растительного покрова.

Построенная на основе предположений 1 и 2 динамическая модель реакции растительности на изменения температурного фактора позволяет увидеть одновременное действие двух закономерностей:

 индивидуальная «инерционность» реакции каждой популяции на температурные возмущения, связанные с периодом самовосстановления вида – ΔT(l) (предположение 3),

• механизмы связи равновесных (установившихся) флористических образов формации при произвольных зафиксированных температурах (предположение 4).

На рисунке 5 приведены модельные графики изменения долей присутствия  $\eta(s,k) = \eta(s,m,i,k)$  четырех популяций  $l_s$ ,  $s \in \{1,2,3,4\}$  с различными динамическими параметрами из таблицы 2, при гармоническом изменений температурного фактора  $\Theta(i,k)$ :

$$\Theta(i,k) = \Theta(i) + \delta(r) \sin \frac{2\pi k}{T}, \ r \in \{1,2\}$$

с полным периодом Т цикла в 11 лет и двумя уровнями амплитудных возмущений.

Номер вида	Условное описание вида	Доля времени самовосст-ия	Зона нечувств-ти	
S		$\Delta T/T$	$\Delta(s)$	
1	Вид с малым периодом самовосстановления не обладающий устойчивостью к температурным возмущениям	2/11	0	
2	Вид с малым периодом самовосстановления обладающий устойчивостью к температурным возмущениям	2/11	0.3	
3	Вид с большим периодом самовосстановления не обладающий устойчивостью к температурным возмущениям	8/11	0	
4	Вид с большим периодом самовосстановления обладающий устойчивостью к температурным возмущениям	8/11	0.3	

Таблица 2. Параметры моделей динамики присутствия выделенных видов



**Рис. 5.** Результаты моделирования динамики присутствия выделенных видов при полношаговой вариации температуры.

Реакции на вариацию температуры в целый шаг  $\delta(1) = 1$  представлены на рисунке 5,В и 5,С; на дробный шаг  $\delta(2) = 0.4$  при зоне нечувствительности  $\Delta(2) = \Delta(4) = 0.3$  – на рисунке 6,D.

Так, на рисунке 5,В приведены графики реакции долевого присутствия вида  $l_1$  (кривая 2) с периодом самовосстановления  $\Delta T$  в два года и вида  $l_3$  (кривая 3) с периодом  $\Delta T = 8$  лет, при графике температурного цикла (рис. 5,А) с амплитудой  $\delta(1) = 1$ . Доля равновесных состояний (кривая 1) не наделена механизмом устойчивости. На рисунке 5,С приведены графики долевых состояний вида  $l_2$  с  $\Delta T = 2$  года (кривая 5) и вида  $l_4$  с  $\Delta T = 8$  лет (кривая 6) при равновесной кривой 4 наделенной механизмом гистерезисной устойчивости с зоной нечувствительности  $\Delta(2) = \Delta(4) = 0.3$  при целой амплитуде возмущений  $\delta(1) = 1$ .

На рисунке 5,D приведены графики равновесных состояний (кривые 7, 9) и их реакции (кривые 8, 10) для видов с малыми периодами самовосстановления  $\Delta T = 2$  при малой амплитуде возмущений  $\delta(2) = 0.4$ .

По результатам вычислений можно сказать о следующем. В условиях циклического изменения температурного фактора каждая *i*-я формация группы наряду с опорным  $\mathbf{w}(i)$  видовым составом популяций сохраняет долевое присутствие опорных видов сопрягаемых формаций. Уровень корреляции долей присутствия вида между ожидаемым равновесным состоянием  $\mu(s,k)$  (кривые 1, 4) и реальным  $\eta(s,k)$  снижается с увеличением относительного времени  $\Delta T/T$  самовосстановления (кривые 3, 6). Растения с малым  $\Delta T/T$  имеют более высокую динамику изменчивости, успевая близко подходить к опорным значениям. Мера присутствия долголетних видов снижается с увеличением вариабельности температурного фактора. Но даже в неблагоприятных условиях, когда равновесное состояние обнуляется  $\mu(s,k) \rightarrow 0$  для

 $s \in \{1,2,3,4\}$  при  $k \in \{3,8\}$  инерционные виды  $s \in \{2,4\}$  сохраняют своё присутствие ( $\eta(2,3) = 0.3, \eta(4,3) = 0.33$ ).

Отмечая сложный характер поведения популяций при вариации температурного фактора, можно заключить, что:

• методы временной интерполяции и экстраполяции при анализе динамики растительного покрова применимы, но на небольших временных периодах;

• наблюдаемое при полевых исследованиях *i*-й формации флористическое разнообразие характеризует «смесь» видового состава опорных векторов не только *i*-й формации, но и сопрягаемых формаций группы, а при значительных вариациях температур – видовой состав растений всей группы;

• рост частоты вариаций температурного фактора увеличивает флористическое многообразие формаций, но снижает среднюю плотность растительного покрова и наоборот, стабилизация климатического фактора сокращает видовой состав, сохраняя виды и уровни опорных состояний попарно сопрягаемых формаций, что в целом согласуется с выводами [14, 15].

Полезные приложения модельных технологий анализа рассмотрим на примере динамики растительного покрова тундр полуостровов Ямал и Гыдан. По сути исследуются возможные формы реакции доминирующих видов растений формаций группы В<sub>1</sub> на вариации температурного фона в условиях действия предположений 1÷4. Состав группы по формациям, распределенным по четырем широтным зонам, представлен на рисунке 6. Заметим, что ранее отмеченной неопределенности выбора (см. табл. 1) нет, так как для данной группы (В1) в каждой широтной зоне присутствует только одна формация.



**Рис. 6.** Широтно-зональное деление формаций полуостровов Ямал и Гыдан (1) и разделение по широтным зонам формаций группы B<sub>1</sub> (2).

Данные о качественном и количественном составе популяций группы и их динамических свойствах в виде опорных векторов формаций сведены в таблицу 4. Полное множество растений обследуемой территории включает 454 наименований из которых выделены доминирующие популяции с уровнем присутствия w(l) - 3 и более балов (из 5) группы формаций B<sub>1</sub>. Учетное множество выделенных доминант составляет 31 наименование (см. табл. 4).

Nº	Наименование вида	Время само- восстановления вила (лет)	Присутствие вида в формации			
			1	10	17	22
1	Deschampsia sukatschewii (Popl.) Roshev.	10	0	3	3	0
2	Senecio atropurpureus (Ledeb.) B. Fedtsch.	8	2	3	2	0
3	Betula nana L.	5.5	0	3	5	4
4	Parria nudicaulis (L.) Regel.	8	0	4	0	0
5	Carex arctisibirica (Jurtz.) Czerep.	10	5	5	4	5
6	Carex globularis L.	10	0	3	3	3
7	Eriophorum scheuchzeri Hoppe	10	0	3	0	0
8	Eriophorum vaginatum L.	8	0	4	3	3
9	Empetrum subholarcticum V. Vassil.	5.5	0	5	3	3
10	Equisetum boreale Bong.	10	0	3	0	0
11	Ledum decumbens (Ait.) Lodd. ex Steud.	5.5	0	4	5	4
12	Vaccinium minus (Lodd.) Worosch.	5.5	0	3	3	4
13	Vaccinium vitis-idaea L.	5.5	0	3	0	5
14	Luzula nivalis Laest.	8	2	5	2	0
15	Lloydia serotina (L.) Reichenb.	5.5	0	5	5	5
16	Arctagrostis latifolia (R. Br.) Griseb.	10	2	5	2	3
17	Calamagrostis groenlandica (Schrank) Kunth	10	5	4	0	2
18	Calamagrostis neglecta (Ehrh.) Gaertn., Mey. & Schreb.	10	0	3	2	0
19	Calamagrostis holmii Lange	10	0	5	4	4
20	Festuca ovina L.	8	0	5	5	5
21	Hierochloë alpina (Sw.) Roem. et Schult.	10	2	4	4	3
22	Poa alpigena (Blitt.) Lindm.	10	0	4	4	4
23	Poa arctica R. Br.	10	5	4	0	0
24	Dryas octopetala L. subsp. subincisa Jurtz.	5.5	0	5	3	0
25	Rubus chamaemorus L.	8	0	3	4	4
26	Salix glauca L.	3.5	0	3	3	2
27	Salix lanata L.	3.5	0	3	5	3
28	Salix nummularia Anderss.	5.5	3	5	3	0
29	Salix polaris Wahlenb.	5.5	3	5	0	4
30	Saxifraga nelsoniana D. Don.	8	0	5	0	0
31	Valeriana capitata Pall. ex Link.	8	0	5	0	0

Таблица 4. Данные о динамических характеристиках и численности доминирующих видов

Анализировались модельные реакции выделенных популяций растений для трёх случаев возмущений температурного фона.

**Случай 1.** Одношаговый скачок потепления температурного фона от опорных среднезональных состояний:  $\Theta(i,k) = \Theta(i) + \delta(k) = \Theta(i+1)$  с длительностью  $T = 1.2 \cdot \max \Delta T(l) = 12$  лет, где  $\max \Delta T(l) = 10$  лет. Гистограммы состояний видов из таблицы 4 для северной субарктической зоны (формация  $\mathbb{N}$  10, i = 2) через каждые два года представлены на рисунке 7. Очевидно, что при полношаговом потеплении распределение видов в рассматриваемой формации будет принимать образ формации южной зоны (формация  $\mathbb{N}$  17, i = 3), при этом длительность перехода для отдельных видов будет различна в зависимости от их времени самовосстановления – сравн., например, виды l = 3 и l = 13 с одинаковой равновесной степенью присутствия, но различным  $\Delta T(l)$ .



Рис. 7. Гистограммы состояний доминирующих популяций для северной субарктической зоны.

Случай 2. Гармонические хождения температурного фона с  $\delta = 1$  и периодом полного цикла T = 12 лет. Гистограммы состояний для доминант северной субарктической зоны приведены на рисунке 8. В данном случае динамика присутствия видов анализируемой формации зависит от равновесных состояний в формациях как южной, так и северной зон:

• Вид l = 10 присутствует только в анализируемой формации (w(1, l) = w(3, l) = 0) и при полношаговых вариациях имеет тенденцию к исчезновению. Тем не менее, с учетом длительного времени самовосстановления  $\Delta T(l) = 10$ , данный вид будет иметь стабильное хотя и малое присутствие в формации –  $v(10, k) \in [1 \ 2]$ .

• Вид l = 27 с малым временем самовосстановления  $\Delta T(l) = 3.5$  будет демонстрировать значительные вариации в степени присутствия – от относительного «изобилия» при потеплении (реакция от южной формации, где он широко представлен – w(3,l) = 5) до почти полного исчезновения при предельном похолодании (w(1,l) = 0 в более северной формации).

АРЕФЬЕВ и др.



Рис. 8. Гистограммы состояний при периодическом температурном возмущении.

Случай 3. Соответствует ретроспективному анализу динамики доминант на периоде хождения температурного фона с 1935 по 2010 г в летнее время. График температурного фона относительно среднего состояния (11.4 °C) для указанного периода составлен на основе среднегодовых данных для города Салехард. Соответствующий уровень приведенных возмущений  $\delta(k)$  и график динамики степени присутствия видов на формации № 10 представлены на рисунке 9. График динамики представляет собой сетчатую поверхность, где цвет каждой клетки соответствует степени присутствия конкретного вида v(l,k) в заданный момент времени k. Горизонтальный срез данного графика по любому виду отражает временную динамику его присутствия, а вертикальный – гистограмму присутствия видов на формации в выделенный момент времени.



**Рис. 9.** Динамика присутствия вида в формации при измеренном температурном фоне на периоде с 1935 по 2010 г.

По данному графику можно наглядно проследить картину видового состава формации в характерные моменты времени:

• Период стабильно низкой средней температуры (1963–1968 гг.) характеризуется обеднением флористического наполнения формации, при котором почти все исходно доминирующие виды присутствуют в малой степени. Стабильно состояние восстанавливается только после периода последующего потепления до нормального температурного фона (1970–1975 гг.)

• Наоборот, период со скачками температуры в сторону потепления (1990–2000 гг.) приводит к увеличению совокупного присутствия видов на формации, причем данная реакция наблюдается после завершения рассматриваемого периода (т.е. в интервале 2000–2003 гг.)

Кроме того, анализ графика (рис. 10) позволяет выделить виды с характерными трендами степени присутствия.

• Вид № 1 (*Deschampsia sukatschewii* (Popl.) Roshev.) с длительным периодом самовосстановления (10 лет) и относительно малой степенью присутствия (3);

• Вид № 26 (*Salix glauca* L.) с коротким периодом самовосстановления (3.5 года) и относительно малой степенью присутствия (3);

• Вид № 5 (*Carex arctisibirica* (Jurtz.) Сzerep.) с длительным периодом самовосстановления (10 лет) и максимальной степенью присутствия (5);

• Вид № 9 (*Empetrum subholarcticum* V. Vassil.) со относительно средним периодом самовосстановления (5.5 года) и максимальной степенью присутствия (5);

Динамика состояния выделенных видов для заданного периода хождения температурного фона с 1935 по 2010 г представлена на рисунке 10.

Представленные графики подтверждают разнородный характер поведения видов с большим периодом самовосстановления, сохраняющих стабильное присутствие при вариациях температур, и видов с малым  $\Delta T(l)$ , демонстрирующих большую вариативность в условиях значимых температурных возмущений.



Рис. 10. Динамика состояний выделенных видов при моделировании на периоде с 1935 по 2010 г.

В заключении отметим, что предложенная схема моделирования удобна для практических приложений, т.к. базируется на фактографических данных реально наблюдаемого флористического состава обследуемых территорий, в том числе и по результатам полевых исследований. Получаемые результаты не отвечают на вопрос о генетических причинах сосуществования исходных флористических образов и о возможностях появления новых видов растений, как в [15]. Всё моделируемое многообразие ограничено списочным составом видов внесённых в исходную базу данных.

Принятые предположения и расчётные схемы не объясняют того, почему некоторые виды растений получают конкурентное преимущество при смене температурного фактора, а другие теряют. Модель отражает базовые закономерности смены флористических образов наблюдаемой территории. Точность анализа напрямую зависит от точности настройки параметров модели [17–20] по данным регулярных наблюдений за флористикой формаций. Разработка алгоритмов оценивания параметров опорных векторов по данным контроля за долями присутствия доминирующих видов растений формаций группы – одна из главных задач дальнейшего развития метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Викулов В.Е., Гурман В.И., Данилина Б.В., Алексеев М.Л., Атутов А.А., Балданов Б-М.Б., Батурин В.А., Батурина Е.Ю., Башалханов И.А., Буинов А.И. и др. Эколого-экономические стратегии развития региона: Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона. Новосибирск: Наука, 1990. 184 с.
- 2. Крупник И.И. Арктическая этноэкология. М.: Наука, 1989. 270 с.
- 3. Карта "Растительность Западно-Сибирской равнины". Под общ. ред. ак. В.Б. Сочавы. М.: ГУГК, 1976.
- 4. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 328 с.
- 5. Моисеев Н.Н. *Математические задачи системного анализа*. М.: Наука, 1981. 488 с.
- 6. Caswell H. *Matrix Population Models. Construction, analysis and interpolation.* Sinaunet Associates, 1989. 328 p.
- 7. Хомяков П.М., Конищев В.Н., Пегов С.А., Смолина С.Г., Хомяков Д.Н. Моделирование динамики геоэкосистем регионального уровня. М.: Изд-во МГУ, 2000. 382 с.
- 8. Свирежев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
- 9. Коновалов А.А., Московченко Д.В., Глазунов В.А., Тигеев А.А., Гашев С.Н. Аппроксимации климатической зависимости биоты на севере Тюменской области. *НТЖ Вестник кибернетики*. 2015. № 2 (18). С. 11–23.
- Мельцер Л.И. Фитоценотические аспекты устойчивости ландшафтов Ямала. В: Западная Сибирь – проблемы развития. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1994. С. 128–141.
- 11. Цибульский В.Р., Валеева Э.И., Арефьев С.П., Мельцер Л.И., Московченко Д.В., Гашев С.Н., Брусынина И.Н., Шарапова Т.А. *Природная среда Ямала*. В 2-х томах, т. 2. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1995. 104 с.
- 12. Московченко Д.В. Особенности многолетней динамики растительности Бованенковского месторождения (полуостров Ямал). Вестник ТюмГУ. 2013. № 12. С. 57–66.
- 13. Ильина И.С., Лапишна Е.И., Лавренко Н.Н., Мельцер Л.И., Романова Е.А., Богоявленский Б.А., Махно В.Д. *Растительный покров Западно-Сибирской равнины*. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
- 14. Калайджан В.М., Соловьев И.Г., Цибульский В.Р. Динамика трансформации растительного покрова при вариации среднегодовой температуры. Тюмень: ИПОС СО РАН, 2014. № 1 (13). С. 37–42.
- Говорков Д.А., Соловьев И.Г. Геоинформационные инструменты анализа и моделирования трансформации видового и количественного состава растительного покрова полуострова Ямал. НТЖ Вестник кибернетики. 2015. № 1 (17). С. 24–28.
- 16. Логофет Д.О. К теории матричных моделей динамики популяций с возрастной и дополнительной структурами. *Журн. общ. биологии.* 1991. Т. 52. № 6. С. 793–804.
- 17. Ильичев В.Г. Эволюционная устойчивость биологических сообществ. *Журнал* Общей биологии. 2010. № 1. С. 63–74.
- 18. Букварева Е.Н., Алещенко Г.М. Принципы оптимального разнообразия биосистем. *Успехи современной биологии*. 2005. Т. 125. № 4. С. 337–348.
- 19. Алещенко Г.М., Букварева Е.Н. Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия. Известия РАН. Сер. биол. 2010. № 2. С. 5–15.

20. Ильичёв В.Г. Адаптация параметров в моделях популяций. *Журн. общ. Биологии*. 2005. Т. 66. № 2. С. 171–179.

Рукопись поступила в редакцию 31.05.2017, переработанный вариант поступил 03.07.2017. Дата опубликования 11.08.2017.