

УДК 582.475.2(571.1)+630\*1(571.1)

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОПУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСОВ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В. Р. Цибульский<sup>1</sup>, И. Г. Соловьев<sup>1</sup>, Д. А. Говорков<sup>1,2</sup>, С. П. Арефьев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,  
v-tsib@yandex.ru, solovyev@ikz.ru

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, dagovorkov@mail.ru

<sup>3</sup>Тюменский государственный университет, sp\_arefyev@mail.ru

Механизмы оценки и прогнозирования ресурсного потенциала лесного фонда северных нефтедобывающих территорий Западной Сибири имеют первостепенное значение в задачах оценки воздействий на окружающую среду. В представленных исследованиях предложено оценивать устойчивость биоразнообразия северных лесных территорий при помощи прогнозных моделей популяций деревьев-эдификаторов, в частности лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb). Впервые разработана и доведена до численных значений проекционная матрица и показана возможность ее идентификации на основе динамических кривых плотности древостоя и урожайности шишек. За основу принят вариант онтогенетических состояний: ювенильного, ауксофазы, генеративного. Дано краткое описание этих состояний: возрастные границы, длительность и их возможные значения для лиственницы сибирской. Поскольку длительность состояний различна, применяется модифицированная модель Л. П. Лефковича с показателями дожития, задержек и рождаемости. Первые два показателя идентифицированы по динамической кривой численности нормального древостоя по материалам, предоставленным Н. В. Выводцевым в справочнике В. В. Загребеева, третий – по кривой урожайности шишек по возрастам из работ Е. П. Верховцева применительно к условиям рассматриваемой территории. В результате получены численные значения параметров матрицы, определены максимальное собственное число и индикатор потенциала роста, указывающий на возрастание или сокращение популяции. В рассматриваемом варианте их значения близки к единице, что говорит о равновесности популяции. Кроме того, определена структура древостоя через 20 лет. Полученные результаты могут быть положены в основу мониторинга устойчивости биоразнообразия выделенного участка леса в северных районах с усиленной техногенной нагрузкой, для реализации которого необходимы данные кривых роста численности и урожайности популяции деревьев-эдификаторов, в том числе лиственницы сибирской.

*Ключевые слова:* биоразнообразие, север, мониторинг, модель, популяция, лиственница.

## APPLICATION OF POPULATION MODEL OF SIBERIAN LARCH FOR FOREST BIODIVERSITY CONTROL IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

V. R. Tsibulsky<sup>1</sup>, I. G. Solovyev<sup>1</sup>, D. A. Govorkov<sup>1,2</sup>, S. P. Arefyev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Tyumen Scientific Centre SB RAS, v-tsib@yandex.ru, solovyev@ikz.ru

<sup>2</sup>Industrial University of Tyumen, dagovorkov@mail.ru

<sup>3</sup>Tyumen State University, sp\_arefyev@mail.ru

Mechanisms for assessing and predicting the forest resource potential of the northern oil-producing territories of Western Siberia are of great importance in the tasks of environmental impact assessment. The assessment of the biodiversity sustainability of the northern forest areas using predictive population models of tree-edificators (trees as ecosystem engineers), in particular, Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb) is proposed. A projection matrix was first developed and adjusted to numerical values, and the possibility of its identification is shown based on dynamic curves of the tree stand and cones yield. The variant of ontogenetic stages (juvenile, auxophase, generative) is taken as a basis. A brief description of these stages is given including age limits, duration, and their

possible indicators for Siberian larch. Since the duration of the stages is different, the modified Lefkovitch model and indicators of survival, delay and fertility are applied. The first two indicators are identified using the dynamic curve of the normal trees stand (N. V. Vyvodtsev), the third – using the curve of the yield of cones by age as applied to the territory conditions (E. P. Verkhovtsev). As a result, numerical values of parameters of the matrix are obtained, the maximum eigenvalue and an indicator of potential growth are determined, indicating the growth or decline of the population. In the considered variant, their values are close to one, which indicates the stability of the population. Furthermore, the structure of the tree stand in 20 years is determined. The results can be used as a basis for monitoring the sustainability of biodiversity of a designated forest area in the northern regions with increased man-made stress, which requires data on growth curves for the population and yield of edificators, including Siberian larch.

*Keywords:* biodiversity, north, monitoring, model, population, larch.

**Введение.** Север Западной Сибири является основным нефтегазодобывающим регионом России уже более 50 лет. С одной стороны – интенсивное освоение нефтегазовых ресурсов практически по всей территории, с другой – недостаточный уровень изученности динамики лесов и средств контроля устойчивости состояния фонда делают задачу экологической безопасности и сохранения биоразнообразия растительных формаций Западной Сибири наиболее актуальной.

Например, до сих пор в атласах флоры России (и СССР) нет специальных карт лесов Западной Сибири, есть лишь неполные описания лесов регионов. В международной программе ICP Forests по сохранению лесов и управлению ими пункты постоянного наблюдения указаны в Мурманске, Санкт-Петербурге, Калининграде, и их нет ни в Западной, ни в Восточной Сибири, ни на Дальнем Востоке.

Это дает основание говорить о необходимости и актуальности мониторинга влияния климатических и техногенных факторов на биоразнообразие лесов в регионах с усиленной антропогенной нагрузкой [1–2]. Устойчивое состояние лесов связано не только с приспособленностью к внешним условиям, но и с вовлеченностью их в систему биотических связей. Логично считать, что уменьшение или исчезновение любой видовой популяции так или иначе отразится на состоянии всего биома и может повлечь за собой цепную реакцию изменения биоразнообразия и трансформации природного комплекса на данной территории [3–4]. Вместе с тем в сложных биологических системах при утрате отдельных компонентов оставшиеся способны компенсировать их функции, что обеспечивает сохранение или восстановление устойчивого функционирования видоизмененной системы в целом. Однако возможность такой компенсации ограничивается спецификой вида (например, в случае утраты видов-эдификаторов), особенно в бедных сообществах. На северном пределе лесной зоны региона лиственница является практически единственным видом, способным образовывать древесный (главный) ярус фитоценоза, ее состояние в наибольшей степени характеризует состояние биологических сообществ с ее участием [5]. Дать оценку устойчивости биоразнообразия и ассоциированного с ним ландшафта позволяет матричная модель популяции вида-эдификатора. Кроме того, она может выступать одним из системообразующих элементов мониторинга состояния растительного покрова в районах нефтегазодобычи при организации постоянных пунктов наблюдений подобно программе ICP Forests [6].

Цель работы: получить простой и достаточный инструментарий для оценки устойчивости биоразнообразия биома основных видов-эдификаторов на северном пределе лесной зоны, максимально приближенной к практике мониторинга состояния окружающей среды в нефтедобывающих регионах Западной Сибири.

В настоящее время многие исследователи строят модели динамики древостоев с целью уточнения влияния изреживания и возрастного умирания на воспроизводимость популяции видов. Для мониторинга биоразнообразия видов, учета стадий произрастания и выживаемости важное значение имеют работы Ю. М. Свиричева, Н. Кейфица, Х. Казуэлла, Д. О. Логофета,

И. Н. Ключковой и др. по построению и использованию моделей в виде популяционных проекционных матриц (ППМ) [7–10].

В литературе известны лишь отдельные попытки разработать такие модели для лесных сообществ и древостоев. Для них обычно при моделировании граф жизненного цикла включают ювенильное, виргинильное и генеративные состояния и не включают суперсенильные и сенильные. Хотя последние могут длиться 100 и более лет, они не влияют на воспроизводимость популяции.

Базовой моделью чаще всего является ППМ с дискретной возрастной структурой. Для лесной популяции это дискретно-временные шаги 10, 20 лет и соответствующие классы роста (плотность на ед. площади) (по В. В. Загребеву их 10). При средней продолжительности жизни хвойных пород 250–350 лет возрастных шагов может быть 12–17. Для «рождаемости» количество шагов ограничено только генеративной стадией, но и в таком случае это 150–200 лет, т. е. 8–10 шагов и пять классов «рождаемости». Например, по Верховцеву, это количество шишек на единицу площади (га) или на одно дерево в среднем для одного класса развития [11].

Таким образом, все методы, критерии, рекомендации имеют возрастную классификацию, но ориентированную на стадии. Исходя из вышесказанного, проще и понятнее с биофизической точки зрения ППМ со стадийной структурой.

**Материалы и методика исследований.** Одним из вариантов является модель Л. П. Лефковича [7, 12–14], имеющая следующие стадиоспецифические параметры для лесной популяции:  $b_j$  – рождаемость, обозначает долю среднего числа шишек на одно дерево в каждой подфазе;  $s_j$  – коэффициент дожития, обозначающий долю стволов, перешедших из одной фазы в другую;  $r_j$  – доля числа стволов, не перешедших из одной фазы в другую за 1 шаг.

Большое значение с точки зрения технической возможности использования имеет ее порядок, определяемый числом онтогенетических состояний и возрастных классов. В литературе имеется достаточно много описаний отдельных онтогенетических состояний лиственницы сибирской [15–18]. Перечислим их в порядке возрастания: проростки, всходы, ювенильное, имматурное, виргинильное, генеративное, субсениальное и сениальное состояния.

Большинство авторов для сокращения порядка матрицы и упрощения расчетов применяют сокращенный перечень онтогенетических состояний: ювенильное, виргинильное, генеративное [15, 19] или эмбриональное, молодняк (ювенильное), состояния роста (ауксофаза), спелости (зрелости), старости [20]. С точки зрения целей сохранения биоразнообразия важно оценивать баланс роста и генеративных функций, поэтому остановимся на варианте, не учитывающем эмбриональную фазу и фазу старости как не влияющие на баланс матрицы. Получаем следующий набор фаз: ювенильная, ауксофаза, генеративная (зрелости) фаза, причем генеративную разобьем на 3 подфазы (состояния), как это принято в работе [15]. Данные онтогенетические состояния далее будем называть фазами роста, так как некоторые включают в себя несколько традиционно принятых состояний.

На рис. 1 приведена выбранная схема и соответствующий граф жизненного цикла популяции лиственницы сибирской. Приведем краткое описание принятых фаз лиственницы сибирской по следующей схеме: наименование, обозначение, основной процесс роста, признаки конца фазы, усредненная длительность.

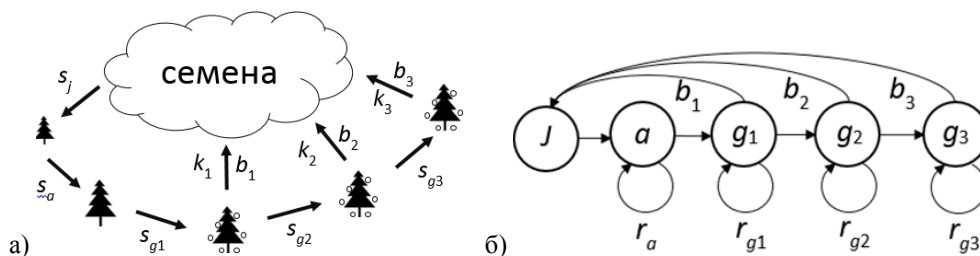


Рис. 1. Схема (а) и граф (б) жизненного цикла (ГЖЦ) лиственницы сибирской (*Larix sibirica*):  
 $b_1, b_2, b_3$  – показатели рождаемости;  $s_j, s_a, s_{g1}, s_{g2}, s_{g3}$  – показатели дожития;  
 $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты учета возрастной урожайности шишек

1. Ювенильная фаза ( $J$ ). В нашем случае она включает в себя проростки, всходы, собственно ювенильное состояние и часть имматурного. С одной стороны, эта фаза укоренения и формирования молодого ствола начиная от первой верхушечной почки до высоты 5–10 м при диаметре до 10 см [20]. Длительность этой фазы складывается из времени прорастания проростков через подстилающий покров (1–2 года), ювенильной фазы (2–3 года) и начальной и промежуточной частей имматурной фазы до усиленного роста (2–9 лет). Сюда же может входить время проникновения семян через подстилающий покров (6–7 лет) [17]. По Б. Н. Норину и справочнику по таксации леса [16, 21], эта стадия молодняка в среднем для лиственницы длится 18–20 лет.

2. Ауксофаза ( $a$ ). Это фаза роста, включающая часть имматурного онтогенетического состояния, начало усиленного роста (2–8 лет). Характеризуется сформировавшейся удлиненной кроной с отсутствием сухих боковых ветвей на большей части высоты ствола (до 60 %). При этом иногда ускоряется рост не только центрального, но и боковых побегов. Наблюдается формирование значительного количества мощных боковых корней, размещающихся на глубине 30–50 см в зависимости от близости залегания вечномерзлых грунтов. В конце фазы растения переходят в древесный ярус, появляются мужские и женские стробилы и после опыления – первые шишки. Для популяции сомкнутой кроны это возраст 30–40 лет [17]. Принято считать, что появление первых шишек II класса урожайности является пограничным показателем виргинильной и генеративной фаз, а значит, в нашем случае, ауксо- и генеративной фаз. Показателем состояния этой фазы обычно является скорость роста численности популяции (плотность на 1 га за один шаг времени).

3. Генеративная фаза ( $g$ ). Характерными процессами являются цветение, образование шишек и семян и их распространение на фоне замедления процессов относительного роста. У Б. Н. Норина [16] приведены классы урожайности шишек с I по V, самый высокий – V класс. Максимум смещается в зависимости от подстилающего покрова. Если учитывать, что II класс, имеющий незначительное число шишек на каждом дереве, отнесен нами к ауксофазе, то генеративная фаза длится с III по V класс. При этом каждому классу соответствуют подфазы:  $g_1, g_2, g_3$ . По публикациям многих авторов, генеративная фаза начинается в 60–100 лет и длится около 200 лет. Для лиственницы сибирской генеративные фазы длятся от 60 до 240–300 лет [11, 21]. Все три подфазы являются основой второй части баланса популяционной модели – рождаемости. Показателем рождаемости чаще всего служит количество семян на 1 га, зависящее от урожайности шишек, вылета семян с учетом наличия пустых [19]. Также у Б. Н. Норина [16] приведены данные по лиственнице, позволяющие оценить этот показатель в целом для всей генеративной фазы. На практике такой показатель проще оценивать по количеству шишек для разных по возрасту групп деревьев. Эти данные можно получить, привязав классы урожайности к разбивке по ступеням возраста и полноте древостоя [11, 19, 21]. Для упрощения идентификации модели нами принято, что влияние климата, подстилающего покрова, почвы на прорастание семян одинаково для всех генеративных подфаз на выделенном участке и обозначено  $k_1 = k_2 = k_3$  (рис. 1). Зависимость урожайности от возраста древостоя, по данным многих авторов [16–17], максимальна в первой подфазе и затем снижается с возрастом. Поэтому с такой же целью принято, что классы развития урожайности III, IV, V соответствуют подфазам 1, 2, 3.

Перейдем непосредственно к разработке проекционной матрицы, базируясь на работах Д. О. Логофета, И. Н. Клочковой и других авторов [7–8, 12–14, 22–25]. Выбранные онтогенетические состояния  $S\{J, a, g_1, g_2, g_3\}$  имеют разные длительности по времени, поэтому за основу примем модель Лефковича [7, 12, 14, 24]. Исходя из вышеприведенных описаний, будем считать, что длительность фаз и подфаз кратна одному шагу по времени ( $\Delta t = 20$  лет) и равна соответственно: 20, 40, 60, 60, 60 лет.

Пусть  $S(t)$  – множество, состоящее из показателей, обозначающих численность популяции на 1 га  $\{J(t), a(t), g_1(t), g_2(t), g_3(t)\}$  в момент времени  $t$  и  $\{J(t + \Delta t), a(t + \Delta t), g_1(t + \Delta t), g_2(t + \Delta t), g_3(t + \Delta t)\}$  через 1 шаг (20 лет), тогда для лиственницы запишем:

$$\begin{Bmatrix} J(t+\Delta t) \\ a(t+\Delta t) \\ g_1(t+\Delta t) \\ g_2(t+\Delta t) \\ g_3(t+\Delta t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & b_1 & b_2 & b_3 \\ s_j & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_a & r_{g1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{g1} & r_{g2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{g2} & r_{g3} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} J(t) \\ a(t) \\ g_1(t) \\ g_2(t) \\ g_3(t) \end{Bmatrix},$$

где  $b_i$  – параметр рождаемости ( $b_i \geq 0$ ), обозначающий долю среднего количества потомства, например, шишек для лиственницы на одно дерево в каждой подфазе  $g_i$ ;

$s_j$  – параметр дожития  $0 < s_j \leq 1$ , обозначающий долю численности особей, перешедших из данной фазы или подфазы в другую за 1 шаг;

$r_j$  – задержка в стадии развития, обозначающая долю особей, не перешедших из данной фазы или подфазы в другую за 1 шаг, причем  $0 < (s_j + r_j) \leq 1$ .

Запишем уравнение для каждой фазы (строки). Для ювенильной фазы

$$J(t+\Delta t) = b_1 \cdot g_1(t) + b_2 \cdot g_2(t) + b_3 \cdot g_3(t), \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, b_3$  – доля шишек на одну особь в каждой подфазе. Перепишем уравнение (1) с учетом коэффициента влияния вылета и всхожести семян, климата и пересчета на подрост ювенилов (постоянного для каждой подфазы) –  $k_i$ :  $J(t+\Delta t) = \bar{b}_1 \cdot g_1(t) + \bar{b}_2 \cdot g_2(t) + \bar{b}_3 \cdot g_3(t)$ , где введено обозначение  $\bar{b}_i = b_i \cdot k_i$ .

Для получения параметров этой строки необходимо по материалам лесоустройства построить динамическую кривую урожайности. Наблюдать в природе такую зависимость можно на посадках.

Ауксофаза у лиственницы включает усиленный рост около 40 лет без генеративных функций, поэтому ее динамика за один шаг определяется по формуле

$$a(t+\Delta t) = s_j \cdot J(t) + r_a \cdot a(t), \quad (2)$$

где  $r_a$  – доля особей, оставшихся в ауксофазе и не перешедших в следующую  $g_1$  за 1 шаг  $\Delta t = 20$  лет. Генеративные фазы разбиты на три подфазы, причем каждая имеет длительность  $3\Delta t$ .

$$g_1(t+\Delta t) = s_a \cdot a(t) + r_{g1} \cdot g_1(t), \quad (3)$$

где  $s_a$  – доля особей, перешедших из ауксофазы в стадию генеративную  $g_1$  за 20 лет;  $r_{g1}$  – доля особей, оставшихся в генеративной фазе. Далее по аналогии

$$g_2(t+\Delta t) = s_{g1} \cdot g_1(t) + r_{g2} \cdot g_2(t), \quad (4)$$

$$g_3(t+\Delta t) = s_{g2} \cdot g_2(t) + r_{g3} \cdot g_3(t). \quad (5)$$

Если полученную на основании уравнений (1)–(5) матрицу перенумеровать, а систему обозначить следующим образом:  $X(t+\Delta t) = C \cdot X(t)$ , то можно записать

$$C = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & \bar{b}_1 & \bar{b}_2 & \bar{b}_3 \\ s_j & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_a & r_{g1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{g1} & r_{g2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{g2} & r_{g3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

В работах Д. О. Логофета и И. Н. Клочковой [7, 12, 13] показано, что матрица Лефковича данного вида неразложима, и это позволяет при оценке роста популяции ограничиться вычислением репродуктивного потенциала  $R(c)$  через «стадиеспецифические» параметры.

Для матрицы Лефковича (6) там же предложено выражение для нахождения  $R(c)$  через параметры популяции:

$$R(c) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - r_j) + \sum_{i=1}^n l_i b_i \prod_{j=i+1}^n (1 - r_j), \quad (7)$$

где  $l_1 = 1$ ,  $l_i = s_1, s_2, \dots, s_{i-1}$ .

Используя реальные данные, можно получить собственное число матрицы  $\lambda_{\max}$  и репродуктивный потенциал  $R(c)$ , устанавливая попарно следующие отношения:

Если  $R(c) > 1$ ,  $\lambda_{\max} > 1$  – популяция укрупняется;

при  $R(c) = 1$ ,  $\lambda_{\max} = 1$  – находится в равновесном состоянии;

и при  $R(c) < 1$ ,  $\lambda_{\max} < 1$  – популяция сокращается.

Этого достаточно, чтобы оценить состояние развития данной популяции.

**Результаты исследования и обсуждение.** Для идентификации построенной модели популяции необходимо уточнить значения границ фаз роста: переход от ювенильной к ауксофазе и от ауксофазы к генеративной, получить динамические функции (кривые) плотности популяции и урожайности по возрастам с шагом 20 лет.

Выше нами выбраны длительности фаз: 20, 40, 180 лет. Взята кривая плотности для нормального древостоя лиственницы сибирской V бонитета, приведенная в справочнике [21] для Красноярского края, что достаточно близко к лесотундре (рис. 2). Для уточнения выбранных границ длительностей фаз между ювенильной, ауксо- и генеративной фазами применительно к условиям лесотундры были взяты модельные деревья в районе г. Надым [26–27] и по их древесно-кольцевым хронологиям определены их значения по условию равенства нулю второй и третьей производных кривой прироста лиственницы [26, 27]. Начальные фазы роста  $J$  от нуля до первого перегиба  $\Delta R(t)$  имеют длительность около 22 лет; следующая фаза ( $a$ ) усиленного роста до второго перегиба  $\Delta R(t)$  соответствует точке 68 лет, что довольно близко к выбранным значениям.

На рис. 2 приведена кривая плотности нормальной популяции лиственницы сибирской, взятая в качестве примера из справочника В. В. Загребеева [21], на которой отмечены выбранные границы фаз с шагом  $\Delta t = 20$  лет. По этой кривой определяются параметры дожития  $s_j$  и  $r_{gj}$  как доля стволов, перешедших и не перешедших в следующую фазу за один шаг. На рис. 3 представлена динамическая кривая урожайности шишек по Е. П. Верховцеву [11] для Хабаровского края древостоя лиственницы сибирской при полноте 0,8, что практически соответствует нормальному (полнота 1,0). По ней определен показатель рождаемости  $\bar{b}_l$  как доля среднего числа шишек в каждой генеративной подзоне, приведенная к единичному (нормированному) значению подроста в ювенильной фазе.

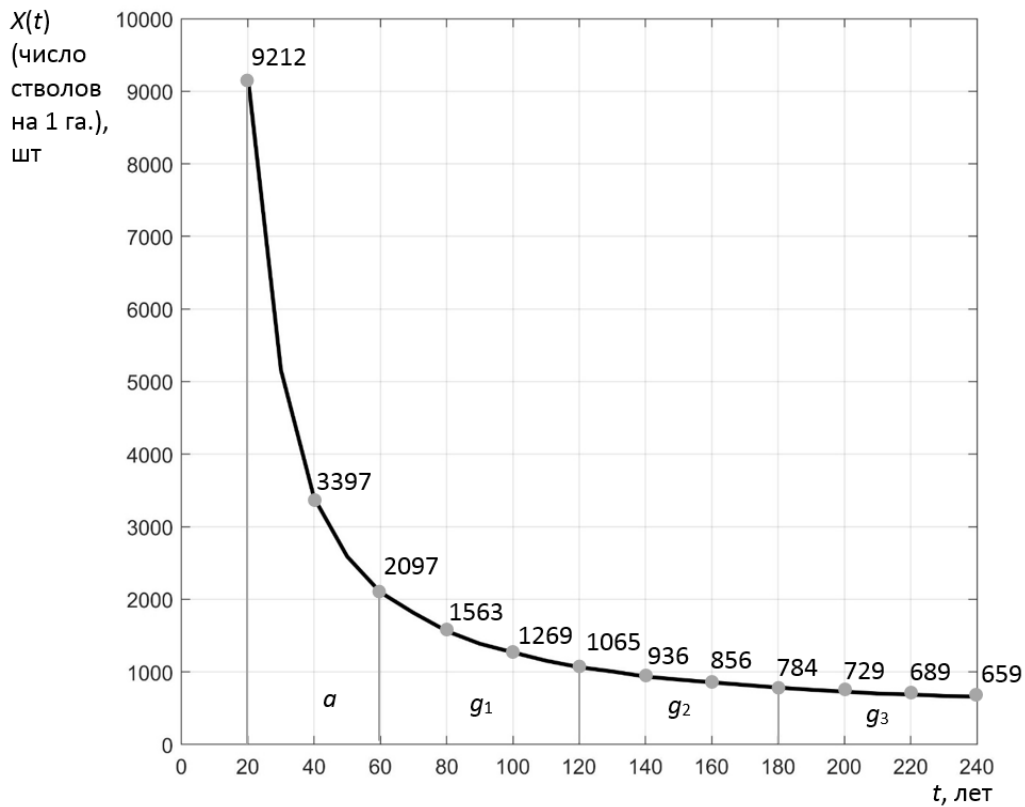


Рис. 2. Кривая плотности популяции для лиственницы (V бонитет) по материалам Н. В. Выводцева, приведенным в справочнике В. В. Загребва [21]

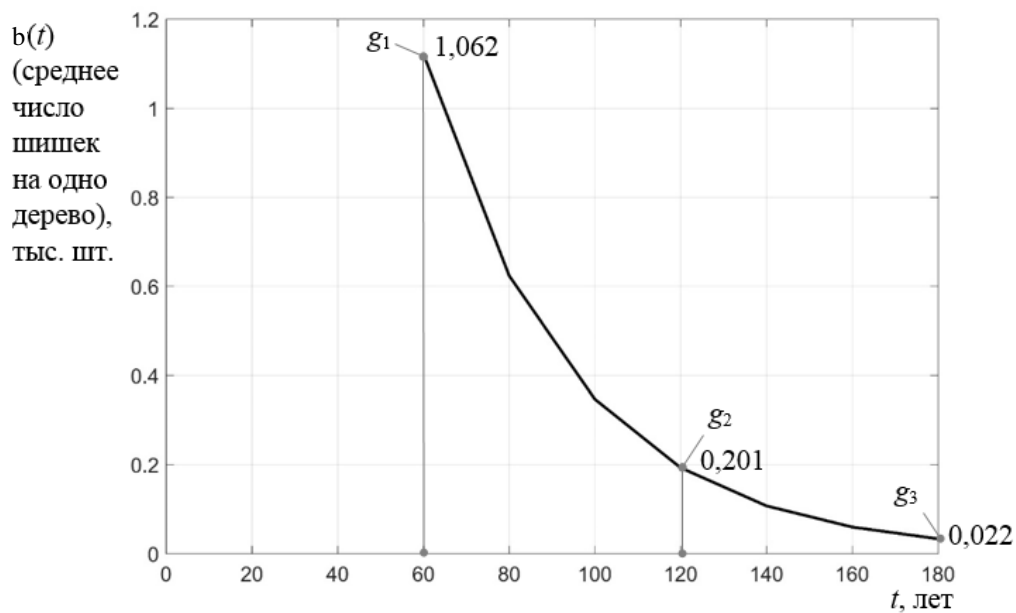


Рис. 3. Снижение урожайности шишек в зависимости от возраста лиственницы сибирской при полноте древостоя 0,8:  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  – моменты начала генеративных подфаз; цифрами обозначены значения урожайности шишек

Руководствуясь графиком (рис. 2) и соответствующей таблицей [20, табл. 132], формулами (1)–(6), получим параметры с учетом  $k_i$ :  $s_j = 0,37$ ,  $s_a = 0,28$ ,  $s_{g1} = 0,24$ ,  $s_{g2} = 0,28$ ,  $r_a = 0,38$ ,  $r_{g1} = 0,6$ ,  $r_{g2} = 0,63$ ,  $r_{g3} = 0,65$ ,  $\bar{b}_1 = 2,16$ ,  $\bar{b}_2 = 0,2$ ,  $\bar{b}_3 = 0,04$ .

Исходная численность фаз древостоя  $S(t) = \{9212, 5494, 3897, 2556, 2077\}$ .

В результате получаем:

$$\begin{Bmatrix} J(t + \Delta t) \\ a(t + \Delta t) \\ g_1(t + \Delta t) \\ g_2(t + \Delta t) \\ g_3(t + \Delta t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 2,16 & 0,2 & 0,04 \\ 0,37 & 0,38 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,28 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,24 & 0,63 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,28 & 0,65 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 9212 \\ 5494 \\ 3897 \\ 2556 \\ 2077 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 9012 \\ 5496 \\ 3877 \\ 2546 \\ 2126 \end{Bmatrix}.$$

Максимальное собственное число для полученной матрицы равно 0,99. Индикатор потенциального роста (7) для этих же данных  $R(c) = 0,92$ . Эти результаты говорят о равновесности состояния популяции для выбранного примера нормального древостоя и урожайности по Е. П. Верховцеву [11] для сибирской лиственницы V бонитета.

#### Выводы:

1. Рассмотренная методика построения популяционной модели древостоя и её анализ на примере лиственницы сибирской – одного из базовых эдификатора растительного покрова северотаежного редколесья могут служить основой для оценки устойчивости биоразнообразия лесных территорий в Северных регионах с интенсивной эксплуатацией нефтегазопромысловых систем.

2. Конструкция популяционно-проекционной матрицы модели фиксирует базовые свойства популяции контролируемого вида древостоя, устанавливая количественные соотношения стадий произрастания и текущие тенденции роста или сокращения зональной популяции вида вследствие природно-климатических или антропогенных факторов.

3. Даны расчетные схемы параметрического конструирования популяционно-проекционной матрицы модели на основе применения и использования данных традиционной таксации лесов, а именно:

- выделение контрольных участков с последующим подсчетом плотности стволов с 10 или 20-летними периодам произрастания;
- визуальная оценка среднего количества шишек для подгрупп деревьев выделенных генеративных фаз;
- получение керна модельных деревьев для определения границ онтогенетических состояний выделенных фаз.

#### Литература

1. Кирсанова Н. В. Применение методов фитоиндикации при экологическом мониторинге объектов добычи нефти и газа (на примере ЯНАО) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 2. С. 37–43.
2. Петрова Г. И., Терновская И. А., Фатхуллин Р. Р. Научно-методические аспекты совершенствования системы мониторинга окружающей среды при разработке нефтяных месторождений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 3. С. 31–34.
3. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Кракснер Ф., Онучин А. А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 3–25.
4. Whittaker R. H. Communities and Ecosystems. 2<sup>nd</sup> Rev. Ed. MacMillan Publishing Co. New York, 1975. p. 385.
5. Сысуев В. В., Бондарь Ю. Н., Чумаченко С. И. Моделирование структуры ландшафтов и динамики древостоев для планирования устойчивого лесопользования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 39–48.

6. Соловьянов А. А. Наблюдательные сети экологического мониторинга США // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 6. С. 19–28.
7. Логофет Д. О., Ключкова И. Н. Математические модели Лефковича: репродуктивный потенциал и асимптотические циклы // Математическое моделирование. 2002. Т. 14, № 10. С. 116–126.
8. Caswell H., Fujiwara M. Beyond Survival Estimation: Mark–Recapture, Matrix Population Models, and Population Dynamics // Animal Biodiversity and Conservation. 2004. No. 27.1. P. 471–488.
9. Keyfitz N., Caswell H. Applied Mathematical Demography. Springer, 2005. P. 558.
10. Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М. : Наука, 1978. 352 с.
11. Верховцев Е. П. Плодоношение лиственницы сибирской в Восточных Саянах // Лиственница : сб. ст. Красноярск, 1962. Т. XXIX. С. 82–93.
12. Логофет Д. О. Еще раз о проекционных матрицах: индикатор потенциального роста и польза индикации // Фундаментальная и прикладная математика. 2011/2012. Т. 17, № 6. С. 41–63.
13. Логофет Д. О. Свирижевский принцип замещения и матричные модели динамики популяций со сложной структурой // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71, № 1. С. 30–40.
14. Lefkovitch L. P. The Study of Population Growth in Organisms Grouped by Stages // Biometrika. 1965. No. 35. P. 183–212.
15. Авдеева Е. В., Кузмичев В. В. Специфика онтогенеза и индикаторная роль лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb) в условиях городской среды // Хвойные и бореальные зоны XXIV. 2007. № 4–5. С. 362–367.
16. Норин Б. Н. К познанию семенного и вегетативного возобновления древесных пород в лесотундре // Растительность Крайнего Севера СССР и ее освоение : сб. БИН им. В. Л. Комарова. М. ; Л. : АН СССР. 1958. Вып. 3. С. 154–244.
17. Дылис Н. В. Лиственница. М. : Лесная промышленность. 1981. 96 с.
18. Evstigneev O. I., Korotkov V. N. Ontogenetic Stages of Trees: an Overview // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2016. Vol. 1, No. 2. P. 1–31.
19. Зеленьяк А. К., Иозус А. П. Особенности семеношения лиственницы сибирской на клоновой плантации // Успехи современного естествознания. 2013. № 12. С. 18–22.
20. Lyr H., Polster H., Fiedler H.-J. Geholzhphysiologie. Jena : VEB Gustav Fisher Verlag, 1967. 422 S.
21. Загребев В. В., Сухих В. И., Шведенко А. З., Гусев Н. Н., Мошкалев А. Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов : справ. М. : Колос. 1992. 495 с.
22. Akçakaya H. R., Burgman M. A., Ginzburg L. R. Applied Population Ecology. Applied Biomathematics. Setauket, New York, 1999. P. 272.
23. Caswell H. Sunderland M. A. Matrix Population Model. Construction, analysis and interpolation. Sinauer Associates, 1989. 328 p.
24. Harary F., Norman R., Cartwright D. Structural Models: An Introduction to the Theory of Directed Graphs. Wiley, New York, 1965.
25. Jose J. M. Matrix Population Model // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и технич. науки. 2005. Т. 10, № 2. С. 164–170.
26. Цибульский В. Р., Арефьев С. П., Коновалов А. А., Говорков Д. А. Идентификация фаз роста деревьев хвойных пород на основе временных рядов древесно-кольцевых хронологий // Вестник кибернетики. 2016. № 4. С. 18–23.
27. Цибульский В. Р., Соловьев И. Г., Говорков Д. А. Особенности определения границ онтогенетических состояний хвойных пород на примере северной тайги Западной Сибири // Человек и Север : материалы всерос. конф., г. Тюмень, 2–6 апреля 2018 г. Тюмень : ФИЦ ТюмНЦ СО РАН. Вып. 4. С. 596–601.