

## БИОЛОГИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 51-76:630.434

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛИСТВЕННИЧНИКОВ НА ПИРОГЕННОМ УЧАСТКЕ ЗАПОВЕДНИКА «БАСТАК»

А.Н. Колобов<sup>1</sup>, Е.С. Лонкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,  
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,  
e-mail: alex\_0201@mail.ru

<sup>2</sup> Государственный заповедник «Бастак»  
ул. Шолом-Алейхема 69а, г. Биробиджан, 679016,  
e-mail: lonkina83@mail.ru

*В работе приводятся модельные сценарии восстановления запаса, численности и структуры лиственничников на пирогенном участке заповедника «Бастак». Основным инструментом исследования служила разработанная ранее индивидуально-ориентированная модель пространственно-временной динамики древостоя. Показано, что при таких начальных условиях моделирования древостой достигает возраста естественной спелости, который характеризуется максимальным значением запаса, через 230 лет. Далее начинается процесс формирования разновозрастной структуры древостоя, который завершается переходом в постсукцессионную (климаксную) стадию развития (через 600 лет от начала моделирования).*

**Ключевые слова:** лиственничный древостой, пирогенный участок, имитационная модель.

#### Введение

К одному из важнейших факторов, влияющих на состав, строение и развитие лесных сообществ Дальнего Востока, относятся пожары. Природное разнообразие лесов складывается в основном из различных стадий послепожарных сукцессий. В результате участвовавших пожаров резко сократились лесные площади, включая наиболее ценные хвойные породы. В связи с этим первостепенное значение приобретают вопросы восстановления лесов, улучшения их состава и повышения продуктивности [2, 3].

Решение проблемы сохранения биоразнообразия и восстановления растительных сообществ после пожара требует детального анализа их динамики. Основные трудности, с которыми сталкиваются исследователи при изучении лесных экосистем, связаны со значительной продолжительностью процессов их развития, а также длительностью реакции лесных насаждений на управляющие воздействия. Решить эту проблему невозможно без создания математических моделей и специальных программных средств, учитывающих естественную динамику лесных насаждений и их изменение под воздействием внешних и внутренних факторов. Метод математического

моделирования представляет собой инструмент для углубленного исследования структуры и функционирования лесных экосистем, средство построения сценариев их развития и разработки эффективных стратегий по использованию и восстановлению леса.

В настоящей работе приводятся результаты моделирования процессов восстановления лиственничников на пирогенном участке заповедника «Бастак». Основным инструментарием исследования служила разработанная ранее имитационная модель пространственно-временной динамики древесных сообществ TEMFORM [1, 7].

#### Материалы и методы

Для изучения послепожарных лесовосстановительных сукцессий в древесных сообществах дальневосточного региона была заложена постоянная пробная площадь размером 50×50 м в горельнике лиственничника заповедника «Бастак». На момент сбора данных после пожара прошло семь лет. При описании пробной площади собирали следующий эмпирический материал: координаты, вид, диаметр ствола на уровне груди, диаметр кроны и высота каждого дерева. Координаты деревьев измеряли с помощью рулетки, предварительно разбив площадку на полосы размером

Таблица 1  
Видовой и количественный состав деревьев  
на исследуемой пробной площади  
через семь лет после пожара

Table 1

Larch forest-stand' species and qualitative composition  
seven years after the fire

Вид дерева	Деревья	Подрост
Лиственница Каяндера	131	500
Береза плосколистная	4	84
Ольха	0	31
Осина	0	1
Всего	135	616

10×50 м. Ширину кроны измеряли по 4 направлениям (юг, север, запад, восток) от центра ствола до самой широкой части в данном направлении. Подростом считали деревья, диаметр ствола которых не превышает 6 см, учитывая все особи, включая проростки.

В табл. 1 приведен видовой и количественный состав деревьев на рассматриваемой пробной площади. На рис. 1 показано распределение деревьев с диаметром ствола больше 6 см по ступеням толщины. Из табл. 1 видно, что после пожара сохранилась часть древостоя, который в основном представлен небольшими деревьями

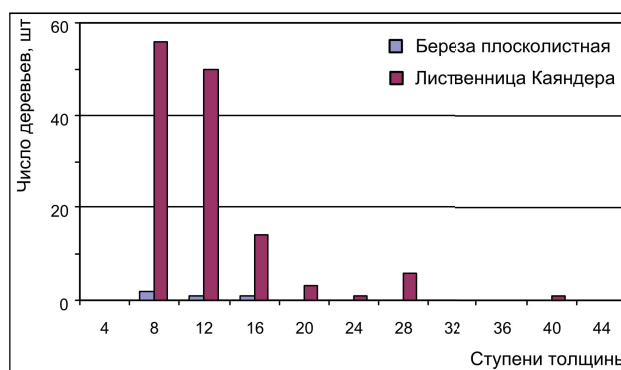


Рис. 1. Распределение деревьев по диаметру  
ствола на пробной площади

Fig. 1. Distribution of trees according  
to the trunk diameter

лиственницы Каяндера [*Larix sibirica*] с диаметром до 16 см (рис. 1). Также на участке присутствуют несколько деревьев березы плосколистной [*Betula platyphylla*]. Возобновление лиственницы за семилетний период составило порядка 500 саженцев, что существенно больше по сравнению с подростом ольхи и березы, последняя является пионерным видом (табл. 1). Это может быть связано с более благоприятными условиями для возобновления лиственницы.

На рис. 2 показано пространственное расположение деревьев и подроста лиственницы на рассматриваемой пробной площади. Плотность

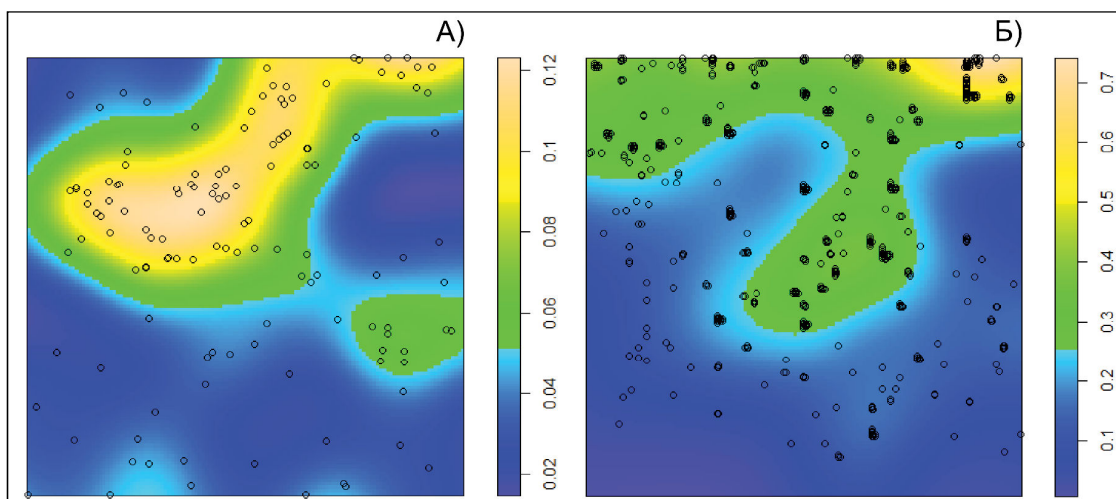


Рис. 2. Пространственное расположение деревьев (А) и подроста (Б) лиственницы Каяндера на пробной площади (50×50 м). Цветом обозначена разная степень плотности древостоя (шт/м²)

Fig. 2. Location of trees (A) and larch undergrowth (B) on the sample plot.  
The color indicates different density of the stand

распределения подроста на участке относительно равномерная (рис. 2Б), что свидетельствует об одинаковых условиях произрастания.

### Результаты моделирования

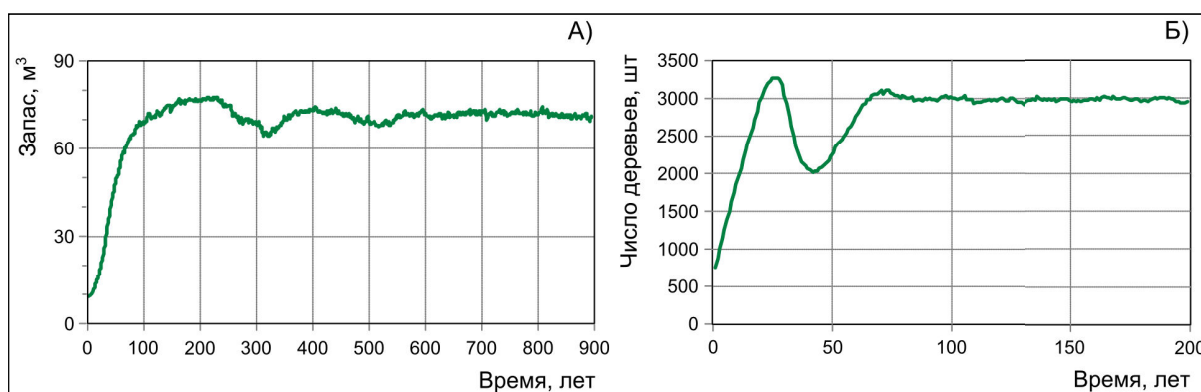
Для моделирования процессов восстановления лиственничного древостоя на рассмотренном пирогенном участке заповедника «Бастак» использовали имитационную модель TEMFORM. В основе построения модели лежит индивидуально-ориентированный подход, согласно которому моделирование динамики древостоя складывается из описания роста каждого дерева с учетом его видовых характеристик и локально доступных ресурсов. Деревья размещены на площадке с заданными пространственными координатами и оказывают взаимное влияние друг на друга через конкуренцию за свет. Таким образом, можно рассматривать различные комбинации возрастной и видовой структуры древостоя, а также формировать начальное пространственное расположение деревьев на участке.

В качестве исходных данных для моделирования использовали пространственные координаты подроста и деревьев лиственницы на исследуемой пробной площадке (рис. 2). Диаметр ствола каждого дерева также определяли в соответствии с данными измерений (рис. 1). При моделировании, на этом этапе исследования, рассматривали только лиственницу, не учитывая другие виды, произрастающие на площадке. Оценка параметров модели для лиственничного древостоя производилась на основе фактических данных таблиц хода роста [5], результаты которой приведены в работе [6].

На рис. 3 показан модельный сценарий динамики запаса и численности лиственничного древостоя на исследуемой пробной площадке. Запас древостоя увеличивается, достигая максимума через 230 лет, после чего снижается, за счет отмирания старых деревьев. Далее возникают затухающие колебания и, начиная с 600 лет, устанавливается стационарный режим. При этом запас древостоя в одновозрастной стадии развития (230 лет) выше, чем в стационарном состоянии (рис. 3А). Численность деревьев также увеличивается, достигая максимального значения через 25 лет, затем на интервале 25–40 лет падает. Далее она снова возрастает и примерно через 100 лет от начала моделирования выходит на стационарный режим (рис. 3Б).

Снижение численности древостоя на интервале 25–40 лет (рис. 3Б) происходит за счет отмирания подроста с диаметром ствола до 4 см (рис. 4). На этом рисунке показаны графики динамики численности деревьев разных ступеней толщины в лиственничном древостое. В результате увеличения плотности древостоя усиливается напряженность конкурентных отношений, что приводит к интенсивному процессу отмирания мелких деревьев как менее конкурентоспособных. Падение численности подроста влечет за собой снижение числа деревьев следующих классов по ступеням толщины со сдвигом по времени порядка 20–30 лет (рис. 4).

Как видно из графиков, число деревьев во всех классах, кроме последнего, имеет тенденцию к возрастанию (рис. 4). Уменьшение численности в последнем классе связано с высокой плотностью



**Рис. 3. Модельный сценарий динамики запаса (А) и численности (Б) лиственничного древостоя на исследуемой пробной площадке**

**Fig. 3. Model scenario for the larch forest stands stock (A) and trees number (B) dynamics on the pyrogenic site of the reserve «Bastak»**

деревьев в верхнем ярусе, которые взаимно подавляют друг друга и не достигают максимальных размеров. Таким образом, деревья остаются в предыдущем классе (20–24 см), часть из них также отмирает в результате высокой конкуренции.

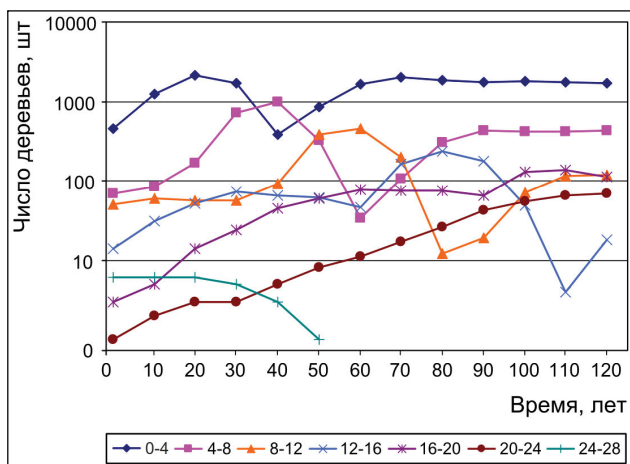
### Заключение

На основе разработанной имитационной модели были построены сценарии восстановления лиственничного древостоя на одном из пирогенных участков заповедника «Бастак». Показано, что при таких начальных условиях моделирования древостой достигает возраста естественной спелости через 230 лет, который характеризуется максимальным значением запаса. Далее начинается процесс формирования разновозрастной структуры древостоя, он завершается переходом в постсукцессионную (климаксную) стадию развития (через 600 лет от начала моделирования) [4]. Численность древостоя увеличивается, достигая

максимального значения через 25 лет, после чего падает за счет отмирания подроста в результате конкуренции за свет. Далее она снова возрастает и выходит на стационарный режим. Такие режимы динамики возможны при условии устойчивого возобновления подроста, порядка 500 саженцев в год на гектар, и отсутствия нарушений, вызванных внешними факторами.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Колобов А.Н. Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // Лесоведение. 2014. № 5. С. 72–82.
2. Комарова Т.А. Послепожарные сукцессии в лесах южного Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 224 с.
3. Комарова Т.А., Сибирина Л.А., Яковлева А.Н. Формирование и развитие послепожарных древостоев в лесах южного Сихотэ-Алиня // Лесоведение. 2007. № 2. С. 12–21.
4. Коровин Г.Н. и др. Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры лесов // Лесоведение. 2011. № 6. С. 94–109.
5. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно справочные материалы). 2-е изд., доп. М.: Международный институт прикладного системного анализа, 2008. 886 с.
6. Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Evaluate the initial spatial structure and heterogeneity of the composition for spruce and larch stands on real data self-thinning of even-aged stands // Ecological Complexity. In press. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2017.09.005> (дата обращения: 11.10.2017).
7. Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Individual-based model of spatio-temporal dynamics of mixed forest stands // Ecological Complexity. 2016. № 27. P. 29–39.



**Рис. 4. Графики динамики численности деревьев разных ступеней толщины (диаметр ствола 0–4, 4–8 см и т.д.) в лиственничном древостое на исследуемой пробной площади**

**Fig. 4. Graphs of trees number dynamics in a larch stand, according to their trunk diameter (0–4, 4–8 sm., etc.)**

## SIMULATION MODELING OF THE LARCH FOREST STANDS RESTORATION ON THE PYROGENIC SITE OF THE RESERVE «BASTAK»

A.N. Kolobov, E.S. Lonkina

*The paper presents model scenarios for the larch forest stand restoration - its stock, number and structure – on the Bastak reserve pyrogenic site. A previously developed individually oriented model for the spatio-temporal dynamics of forest stand was used as the main instrumentation of research. It is shown that under these initial terms of modeling, the stand reaches the age of natural ripeness in 230 years, which is characterized by the maximum value of the stock. And further, the formation of the stand uneven-aged structure begins. This process proceeds to the post-succession (climax) stage of development (600 years after the start of the simulation).*

**Keywords:** larch forest stand, pyrogenic site, simulation model.