

## ЛЕСНЫЕ СТРУКТУРЫ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Плетнёв Михаил Кузьмич, к.э.н., доцент<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Место работы: Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, mkletnev68@yandex.ru

### **Аннотация.**

*Лес, лесные массивы – отражение отношения людей друг к другу, отражение степени адаптации человека, общества к природе, а не только степени вмешательства в имя сиюминутных благ для себя, для промышленности и транспорта, как это часто наблюдается, особенно в российской действительности.*

*Лесное сообщество – сложная экосистема. В отличие от агроэкосистемы – пространственно неоднородное сообщество, ярусно-мозаичная. «Элемент» сообщества – не отдельное дерево, а целая группа (типогруппа) деревьев. Лесной биоценоз состоит из относительно независимых элементов, структур. Возобновление леса – цикличное, поэтапное:*

- *образование прогалин в результате гибели дерева (группы деревьев);*
- *прирост молодой поросли;*
- *зрелость, образованная взрослыми деревьями.*

*Устойчивое существование такого биогеоценоза обеспечивает оптимальная ярусно-мозаичная структура леса, представленное тремя факторами: видовой состав, густота, пространственные размеры, которые определяют развития локусов (ячеек леса).*

*Актуальны новые методы и модели анализа, прогноза эколого-экономических ситуаций, связанных с лесными массивами. Ситуационное моделирование может дать достаточно обоснованные сценарии развития, особенно кризисного, описывающего нелинейные системы. В условиях отсутствия релевантных моделей и соответствующего решаемым проблемам эффективного мониторинга, полезны адекватные простые модели. Они позволяют отработать подходы, начальные приближения к итерационному циклу исследований [1-5].*

**Ключевые слова:** *лес, популяция, биоценоз, развитие, модель, моделирование, прогноз, биомасса, геоинформационная система, программная система, базы данных, мониторинг.*

## FOREST STRUCTURES AND THEIR SIMULATION

Pletnev Mikhail Kuzmich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Place of work: Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky, mkletnev68@yandex.ru

### **Abstract.**

*The wood – a difficult, non-uniform ecosystem. Steady existence of such biogeocenosis requires new methods and models of the analysis, forecast of situations. The situation-dependent simulation using adequate simple models is necessary. In operation such models are offered.*

**Keywords:** *wood, population, biocenosis, development, model, simulation, forecast, biomass, geographic information system, program system, databases, monitoring*

### **Особенности моделей лесных структур**

Потепление климата вызывает удлинение вегетационного периода у древесных растений, увеличение продуктивности биомассы, изменение углеродного цикла в таких сообществах, интенсивность фотосинтеза, процессов разложения биомассы, потоков углерода, фотосинтетического дыхания и омертвения (деструкции) получающейся органики.

По поглощению углерода (около 50%), леса признаются надежной защитой от распространения парникового режима атмосферы.

Как прогнозировать биомассу лесных массивов и управлять ими – задача актуальная и важная не только для прогноза глобального климата. Необходимы математические модели биомассы леса с учётом климатических условий, необходимо поддерживающее моделей и процедуры моделирования полноценное компьютерное моделирование, имитационное

моделирование биогеоценоза. Необходимо большее внимание к проблеме охраны окружающей среды и, в частности, лесных ресурсов, прогнозу их роста и объема.

Построение модели - процедура, сильно зависящая от опыта исследователя, опытного материала, степени детализации, формы представления (описания). Преимущества моделей - в их точности, инфологической однозначности. Модели позволяют сравнивать с реальными данными, проводя необходимые исследования и наблюдения.

При математическом моделировании леса выделяют много факторов, влияющих на биомассу леса (температура, количество осадков, солнечная радиация, пространственные структуры и др.). Растения чувствуют даже собственные размеры, подобие, иерархическое соподчинение.

Распространено прогнозирование динамики конкретных экосистем на небольших (до 1000 га) нишах, так называемые гэп-модели (gap), основа которых – модель отдельного гэпа, описывающая динамику деревьев на участке, например, 10x10 (м). Каждое дерево типа (породы) в текущий момент характеризуется определенным набором переменных.

Уравнения роста определяются с помощью баланса и динамики светового, температурного, водного режима и других внешних параметров среды, учитывая конкуренцию за ресурсы. Возобновление-гибель деревьев задают часто случайным процессом, а влияние соседних гэпов не учитывают.

Первая модель JABOVA (1972) строилась на имитационных принципах: с роста дерева в оптимальных условиях, учета влияния снижения количества света, питательных веществ из-за конкуренции.

Гэп-моделирование рассматривают как интегрированное компьютерное моделирование с целью проверки механизма и динамики развития экосообществ.

Для больших экосообществ используют структурные модели метапопуляций из субпопуляций на основе простых структур, объектов.

Сложно описать нелинейное взаимодействие между деревьями, прогнозировать устойчивое состояние «динамического равновесия», представляющего единство и различие разнотипных, разновозрастных гэпов, образующих мелкоячеистую мозаичную структуру в процессе смены поколений.

Поэтому динамику леса моделируют в крупных пространственно-временных масштабах, получая оценки характеристик пространственно-временной структуры сообщества в стационарном состоянии.

Рост растений, как и животных, зависит от размеров, здесь возможны различные соотношения биомассы различных представителей лесных массивов [1].

Для моделирования необходима релевантная система мониторинга, пространственного представления лесного массива.

Полученную информацию можно использовать для определения начальных и граничных условий моделей эволюции лесного массива, оценки комплексных характеристик состояния условий природной среды (бонитета, потенциального запаса древесины, загрязнения крон и т.д.).

Модели необходимо идентифицировать, вычислять соответствующие коэффициенты, составлять информационную и логическую основу последующего прогнозирования.

В [1] приведён пример инфологической карты с БД учета лесного фонда (рис.1).

## Средний запас древесины в спелых и перестойных лесах, кубм/га

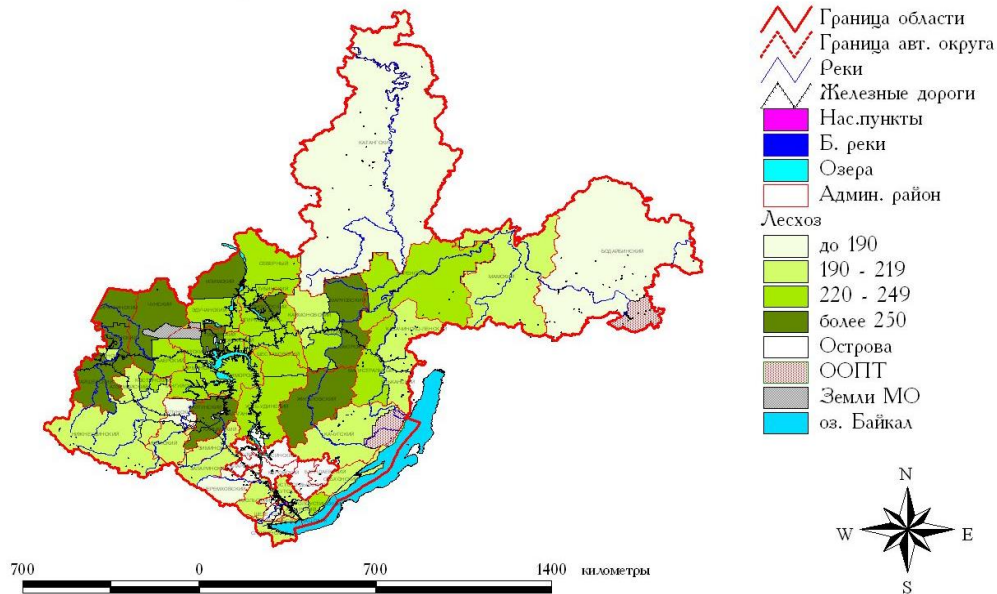


Рис.1. Пример инфологической карты с БД учета лесного фонда [1]

При рассмотрении моделирования динамики развития лесных структур необходим качественный план исследований, мониторинг. Необходимо выбрать «почти» естественную систему координат, с помощью которой можно все лесохозяйственные и эколого-экономические мероприятия привязывались бы к местности, позволяя управлять лесопользованием. Определение геоидифференциации лесных ресурсов – основа планирования и размещения лесосек, картографирования лесных массивов по различным показателям. Это основа прогнозирования лесного богатства.

Расчеты по имеющейся БД должны обновлять (актуализировать новые отношения) базы, визуализировать их в привычном, дружественном, режиме, последовательно подключая данные разных этапов проектирования системы моделей и результаты осуществления текущих прогнозов и мониторинга.

Устойчивый урожай может быть лишь от устойчиво функционирующего, развивающегося и управляемого леса. Управляемость возможна лишь при наличии достаточной информации.

Современная экология, особенно, эволюционная, популяционная включает практические методы: мониторинг, анализ воздействий на экосистемы, эколого-экономико-социальные аспекты [2]. Фундамент математической экологии - теория динамики популяций, растений, их взаимодействий.

### Проблема информационного обеспечения лесных биоценозов

Как обеспечить информационную поддержку такого сложного биосообщества, как лесной массив? – Необходимо иметь большие возможности обработки и хранения

информации в структурированном виде. Помогают технологии: БД, БЗ, Data Mining и другие. Теперь можно подключать и возможности Big Data.

Технология Big Data возникла сравнительно недавно, используется для растущих по объёму и разнообразию обрабатываемых данных в различных технологических, например, геоинформационных системах («от количества к качеству»). Изначально Big Data использовался в академической среде, но затем его взяли на вооружение в деловой прессе, в программных продуктах для решения проблем обработки данных больших объемов. В 2011 году IBM, Oracle и другие компании начали его использовать и в деловых стратегиях.

Big Data – набор инструментов, методов для обработки объемных (структурированных или неструктурированных) данных для получения «человеческого» результата, т.е. результата, воспринимаемого человеком, его органами и сознанием. Визуализация важна в условиях непрерывного прироста обрабатываемой (актуализируемой) информации.

Для Big Data есть принцип «3Volume»: объём, скорость прироста (обработки, актуализации), возможность параллельной (одновременной) обработки разнотипных данных. Система Big Data должна быть расширяемой, отказоустойчивой.

Основные методы и технологии Big Data, которые способны помочь эффективно решать проблему инфологической поддержки задач прогноза динамики и устойчивости лесных структур – следующие:

1. методы Data Mining (поиска скрытых, не «поверхностных» связей, закономерностей в данных);
2. классификация, категоризация, шкалирование;
3. ситуационное (имитационное) моделирование;
4. нейросетевой анализ;
5. распознавание образов;
6. 3D-визуализация и виртуализация;
7. когнитивный анализ (сети) и др.

Примером использования (необходимости привлечения) методов, технологии Big Data может служить противопожарное зондирование лесных массивов.

Есть и аппаратно-программные комплексы: Aster Map Reduce Appliance, Oracle Big Data Appliance, Hana и другие, представляющие собой телекоммуникационные шкафы с серверами, пригодные к установке в ЦОД.

Для эффективного анализа ситуации и управления ею следует организовать релевантно и оперативно не только сбор самой информации, но и ее анализ, последующее применение в управлении. Основной принцип Big Data: максимально эффективно и оперативно (в реальном режиме) использовать данные для управления трафиком данных, осуществления соответствующих прогнозов.

Без развития информационных систем (ГИС) прогнозирование невозможно. Необходим стандартизированный набор функций ГИС. Начинать следует с четкой регламентации деятельности по сбору и актуализации информации. Сейчас пока «изобретают велосипед», хотя имеется ПО, поддерживающее стандарты.

При выборе (разработке) ГИС необходим:

1. анализ по ключевым параметрам рассматриваемой системы;
2. уточнять, насколько и как ГИС адаптируема к качеству предоставления и оперативности информации.

Современные технологии помогают идентифицировать системы. Когда результаты попадают оперативно (через сети) в ГИС, система находится «на уровне», а ее аналитический блок и блок визуализации динамики эффективны, позволяют оценивать достоверность результатов, применяя эффективную тактику и стратегию.

Основная задача – стандартизация протоколов (форматов) обмена терминами и данных между ГИС и остальными ИС (например, АРМ эколога).

Способы придания данным формы, необходимой для компьютерной обработки, зависят от технологии компьютеризации ввода данных в систему. Необходимо, в частности, применять язык XML-стандарт делопроизводства, читаемый на всех браузерах, с возможностью вставки аудио и видеоизображений в другие объекты.

Необходимо отметить интерес к социальным сетям, использованию краудсорсинга. Это оправдано, это обеспечивает активную платформу мультимедиа-исследований, прогнозирования.

Необходимо, естественно, решать проблемы информационной открытости, безопасности.

Полезны онтологии (отологические модели) при разработке управляющих мероприятий в лесных сообществах. Онтологическая модель – модель инфологическая, компьютерная форма представления знаний, например, о лесе в форме семантических сетевых взаимосвязей процессов, в которых главными элементами являются понятия, свойства, отношения между ними и процессами. Онтология обеспечит интеграцию понятий, платформ решения задач [10].

Схема построение онтологии состоит из этапов:

1. изучение системы;
2. классификация объектов по атрибутам-свойствам классов;
3. идентификация связей;
4. идентификация «классовых» связей, способностей.

Идентификация систем в онтологиях – на базе экспертных знаний, знаний ЛПР, семантических инфологических моделей.

Задачи управления большими лесными массивами (например, массовой вырубкой) потребуют интегрированных систем, с подсистемой преобразования накапливаемых данных, подсистемой верификации устойчивого поведения, с учетом предыстории функционирования леса.

Предметные объектные модели разрабатывают двумя основными подходами, технологиями: по первой, разработчик формирует сам базу знаний, «встраивает» задачи в нее с помощью базы правил, а метод решения частично сформирован уже в базе знаний; по второй технологии формируются онтологии для классов, с общей метаструктурой обрабатываемой информации.

«Золотое правило» состоит в комбинации технологий: онтология определяет иерархию классов объектов, множество слотов, описывающих их свойства и отношения, множество экземпляров классов. Вначале формируются верхнего уровня метапонятия, затем – нижнего уровня и т.д.

Например, система ForCAS («Лесной Дозор», <http://lesdozor.ru/ru/sistemalesnoidozor/modelirovanie-i-proektirovanie>) имеет способности обнаружения, использования высотных сооружений и пр., построения и оценки характеристик на основе входных параметров:

1. о лесных территориях (природной опасности);
2. о высотах местности;
3. об высотных сооружениях;
4. о метеорологических данных;
5. из справочников и по требованиям заказчика.

Система способна:

1. развернуться с минимальной стоимостью обслуживания;
2. покрыть территорию;
3. обеспечить максимум средней обнаружительной способности;
4. произвести ситуационное моделирование и выявить «узкие места»;
5. оценить изменения параметров, характеристик системы при изменении инфраструктуры (люди, каналы, ресурсы).

### Применение временных рядов для прогноза

Если модель ориентируется на временной ряд, то следует осуществить предварительный анализ ряда.

Как выделить периодическую составляющую заданного ряда? – Необходимо выполнить сглаживание исходного ряда (выделить новую информацию – трендовую), затем представить, например, аддитивно.

Можно и мультипликативно: сведение мультипликативного представления к линейной системе, как и в случае аддитивной формы представления, осуществляется предварительным логарифмированием.

Если задан временной ряд  $y_n^k$  наблюдений за приростом биомассы леса с целыми периодами (k), то сезонный цикл  $s_n^k$  можно выделить на этих периодах, а для остального ряда – экстраполировать методом наименьших квадратов (по периодам). Тогда тренд  $x_n^k$  будет определяться выражением

$$x_n^k = y_n^k - s_n^k.$$

Следует, аналогично [6], рассмотреть функционал

$$F^k(x_n) = \sum_{n=1}^{T-1} \sum_{l=1}^K [a_{k-l}(y_{T(l-1)+n+1} - y_{T(l-1)+n}) - (s_{n+1}^k - s_n^k)]^2$$

и задачу минимизации:

$$F^k(x_n) \Rightarrow \min_s$$

Для этой задачи выписываем нормальную систему уравнений – линейное матричное уравнение вида

$$A^k s^k = f^k.$$

Его решение – вектор

$$s^k = (A^k)^{-1} f^k.$$

Затем идентифицируем оптимальное значение  $a=(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{k-1})$ .

Можно воспользоваться также методами спуска или, например, методом Хука-Дживса.

## **Применение специального программного инструментария**

Используемый аппарат, инструментарий должен быть релевантен гипотезам, методам, ресурсам и ожидаемым результатам моделирования плохо формализуемых и стохастических систем.

Инструмент для моделирования лесных структур, особенно, при моделировании загрязнения среды, лесных пожаров – технологичным, простым (не требующим значительных интеллектуально-вычислительных ресурсов), эффективным и устойчивым.

Например, существуют средства моделирования и прогноза распространения лесных пожаров, как FARSITE, FlamMap, BehavePlus и др.

Этот инструментарий, основанный на классическом аппарате (дифференциальные уравнения, методы оптимизации, теория горения и т.д.) потребуют проведения специального мониторинга, большого объема различного рода исходных данных (многие – специализированных ГИС), вычислений и времени.

Но они эффективны для прогноза.

Например, универсальная система BehavePlus, включенная в систему идентификации пожарной опасности США, позволяет достаточно точно оценивать такие параметры лесного пожара, как общая площадь (поверхность) распространения огня, его продолжительность и направление распространения.

У каждой системы – свои недостатки. Например, система FlamMap не учитывает динамику изменения среды при пожаре, а FARSITE необходима ГИС-поддержка.

Таких моделей много – балансовые модели низового пожара типа Ротермела (использованной в вышеуказанных системах), учитывают характеристики горения, влажность воздуха, направление и скоростью ветра, порог возгораемости, горючесть, время горения в ячейке, предельное время моделирования, начальную вероятность распространения пожара.

Успех инструментального подхода обеспечивается гибкими функциональными структурами и системами.

Несмотря на развитость университетских и научных структур, отечественной науки, нет эффективного связывания научных разработок, эффективного оценивания стратегий и тактик внутри системы, использования современных технологий математического, компьютерного моделирования, систем виртуальной реальности, 3D-моделирования и др.

## **Регрессионная модель**

Моделирование требует знания функций роста растения, дерева (сообщества растений, леса).

Обычно в виде эмпирических, полуэмпирических зависимостей, выражающих закономерности развития данного вида.

Сложное обстоятельство при идентификации (задании) функций роста – как учесть адаптивные способности растений.

Функции роста разных видов отличаются существенно, учет адаптации сообществ видов – сложен, достаточно подробные математические модели фитоценозов есть лишь только у одновидовых сообществ.

Модель строится следующим образом.

По экспериментальным данным, в результате обработки по методу наименьших квадратов, найдена регрессионная модель вида:

$$P(T, Q, R) = 1.84 + 0.276T + 0.0064Q + 0.028R, \quad (1)$$

где  $P$  – годовая продукция леса [тонн/га год],  $T$  - среднегодовая температура воздуха [град.],  $Q$  - годовая сумма осадков [мм/год],  $R$  - суммарная солнечная радиация за год [ккал/кв. см год].

Это – статическая модель роста биомассы леса.

Подставив данные по среднегодовой температуре воздуха, годовой сумме осадков, суммарной солнечной радиации по интересующему региону, получим годовую продукцию леса (тонн/га).

Следующий этап эксперимента – отслеживание зависимости биомассы леса:

- а) от среднегодовой температуры воздуха при неизменных  $Q$  и  $R$ ;
- б) от годовой суммы осадков при неизменных значениях параметров  $R$  и  $T$ ;
- в) от суммарной солнечной радиации при неизменных значениях  $Q$  и  $T$ .

Если считать, что  $T$ ,  $Q$ ,  $R$  меняются со временем:  $T=T(t)$ ,  $Q=Q(t)$ ,  $R=R(t)$ , то получаем динамическую модель:

$$P(t) = 1.84 + 0.276T(t) + 0.0064Q(t) + 0.028R(t). \quad (2)$$

Таблица 1. Данные (среднесрочные) по региону

Месяцы	Температура, град.	Осадки, мм	Радиация, ккал/см <sup>2</sup>
Январь	-2.1	14.8	3
Февраль	-1.2	23.9	4
Март	-1.4	12.3	10
Апрель	7.2	93.7	12
Май	16.2	135.9	13
Июнь	18.4	106.9	15
Июль	22.3	125.9	18
Август	19.8	67.9	19
Сентябрь	15.9	59.9	7
Октябрь	10.3	27.9	5
Ноябрь	3.7	27.4	4
Декабрь	-1.8	17.0	3

По экспериментальным точкам из табл. 1, методом наименьших квадратов можно получить следующие зависимости:

$$T(t) = -0.025944t^2 + 0.58512t + 0.087768, \quad (3)$$

$$Q(t) = -0.009492t^2 + 0.12376t - 0.005964, \quad (4)$$

$$R(t) = -0.0143168t^2 + 0.1764032t + 0.0021568. \quad (5)$$

Подставив соотношения (3) – (5) в модель (2), получим следующую модель:

$$P(t) = -0.0497524t^2 + 0.8852832t + 1.9239608. \quad (6)$$

Для идентификации более полной и релевантной картины необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на биомассу лесного массива. Например, если ведётся вырубка



леса с интенсивностью рубки  $k$  (это относительный коэффициент), т.е. вырубается масса деревьев равная  $kP(t)$ , то к моменту времени  $t=T$  останется продукции леса в количестве, равном

$$P(T) = P(T) - kP(T) = (1-k)P(T). \quad (7)$$

Единичная площадь леса приносит в эколого-экономических единицах (рублях, рентабельности, экологической целесообразности и т.д.) прибыль, измеряемую в простейшей (но достаточной для начального моделирования) форме:

$$\frac{dY(P(t))}{dt} = H(t)P(t),$$

где  $H(t)$  – функция оценки эколого-экономической целесообразности роста лесных массивов. Необходимо эту функцию максимизировать, т.е. решить уравнение вида:

$$H'(t) \int_0^t P(z) dz + H(t)P(t) = 0,$$

Интеграл заменим квадратурной суммой. Учитывая поведение соотношения (6), достаточно, например, формула трапеции:

$$\int_0^t P(t) dt = \frac{t}{2} [P(0) + 2P(h) + 2P(2h) + \dots + 2P((n-1)h) + P(t)],$$

Получаем соотношение:

$$\frac{h}{2} H'(t) [P(0) + 2P(h) + 2P(h) + \dots + 2P((n-1)h) + P(nh)] + H(t)P(t) = 0,$$

Подставляем  $P(H)$  и решая полученное дифференциальное уравнение относительно неизвестной величины  $H(t)$ :

$$H(t) = H(0) \exp(-Qt),$$

где

$$Q = \frac{P(t)H(t)}{\int_0^t P(z) dz}.$$

Например, подставляя ранее полученные экспериментальные зависимости по региону, получаем зависимость:

$$Q(t) = \frac{(1-k)(-0.0497524t^2 + 0.885283t + 1.9239608)}{55.8}.$$

Итак,

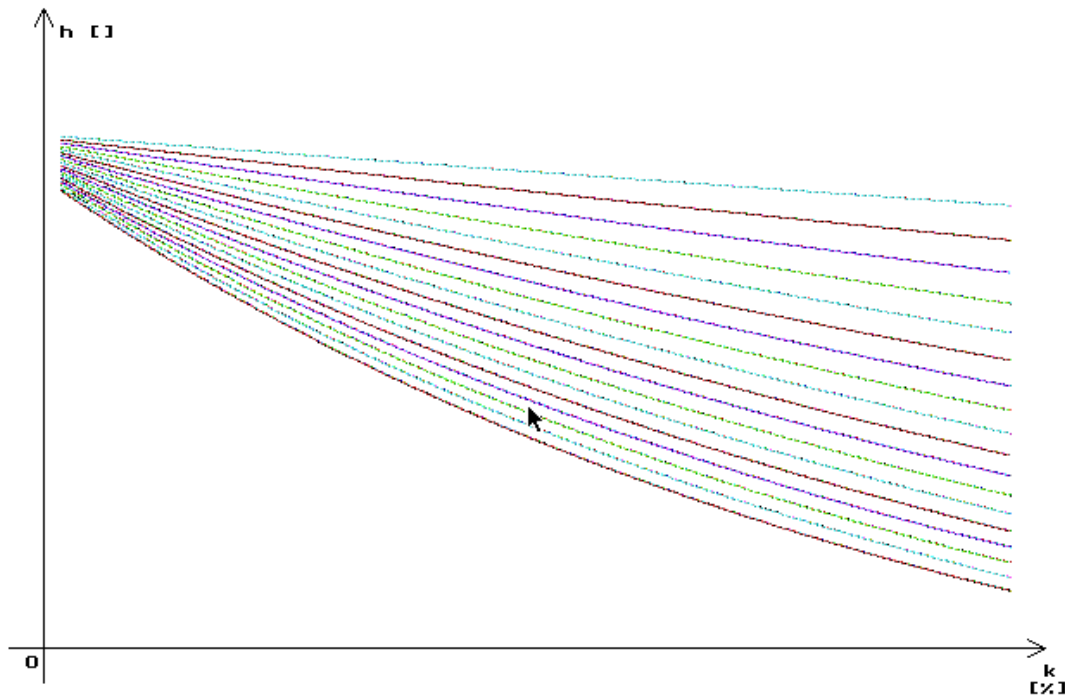
$$Q(t) = (1-k)(-0.0008916t^2 + 0.0158653t + 0.0344796).$$

Функцию полезности можно определить:

$$H(t) = 20e^{-Qt}.$$

Графики зависимости эколого-экономической целесообразности от времени при изменяющемся параметре интенсивности рубки  $k$  представлены на рис. 2.

Рис. 2. Кривые, соответствующие различным значениям  $k$



Опишем алгоритм моделирования с использованием приведенной выше полуксperimentalной (смешанной) модели.

Ввод исходных данных (региональных и «стартовых»):  $T, Q, R, N, h$ .

Определение шагов имитационных вычислительных экспериментов:  $\Delta T, \Delta Q, \Delta R$ .  
Чтобы получить более точные графики зависимостей, шаги имитационных вычислительных экспериментов следует брать маленькими.

Итерационно, меняя  $T, Q, R$  каждый раз, соответственно, на  $\Delta T, \Delta Q, \Delta R$  по формулам

$$T := T + \Delta T,$$

$$Q := Q + \Delta Q,$$

$$R := R + \Delta R$$

и затем, подставляя в (2) (или (1)) получаем экспериментальные точки, по которым и построены графики на рис. 2.

### **Более сложная структурная модель с распределенными параметрами**

Приведенная регрессионная модель подходит для этапа «стартового накопления информации». Есть и более сложные модели, например, с распределенными параметрами, модели структурные.

Структурными называется модели, в которых каждая особь популяции характеризуется (в каждый момент времени) возрастом и определенным набором динамических переменных  $X = (X_1, \dots, X_n)$  (размер, биомасса и т.д.)

Структурная модель популяции включает в себя модель динамики отдельной частицы, имеющий вид:

$$X = F(a, x), \quad (8)$$

где  $F = (F_1, \dots, F_n)$  - вектор-функция скоростей изменения переменных  $X$ ,  $F_i = F_i(a, x)$  который может в общем случае зависеть от типа и характера взаимодействий частиц между собой.

Динамика структурной модели задается функцией  $L(t, a, x)$  - плотностью числа частиц, имеющих в момент времени  $t$  возраст  $a$  и набор значений переменных  $X$ , называемый состоянием частицы.

Математически структурная модель популяции описывается уравнением:

$$\frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial a} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = \mu l, \quad (9)$$

$$l(t, a, X) = l_0(a, X), \quad (10)$$

$$l(t, 0, X) \equiv \beta(t, X). \quad (11)$$

где  $\mu$  - интенсивность смертности,  $\beta$  - интенсивность рождаемости частиц в состоянии  $\chi$  от частиц возраста  $l(a, X)$  - начальная плотность популяции;  $E$  - пространство значений вектора состояний  $X$ . Уравнение (9) - уравнение неразрывности, соотношение (11) определяет скорость появления проростков. Система (9)-(11) не учитывает конкуренции.

Перейдем к построению модели древесной популяции с учетом сообщества древесных растений, характеризующихся единством смены поколений и занимаемой территории. Будем считать древесную популяцию состоящей из большого числа квазичастиц, обладающих следующими свойствами:

1. совокупность «тождественных» деревьев занимают фиксированную, постоянную площадь;
2. динамика развития отдельного дерева определяется взаимодействием его с другими деревьями, входящими в сообщество данного типа;
3. в каждой типогруппе в каждый момент времени определено количество входящих в него деревьев, а также их возраст, высота и другие характеристики;
4. рождение новой группы на данной территории происходит лишь после гибели (изъятия) предыдущей.

Группа характеризуется минимальным набором переменных: количеством деревьев  $n$  и высотой деревьев  $H$ . Динамика роста определяется интенсивностью фотосинтеза, которая в свою очередь зависит от скорости поступления световой энергии  $E$ . Уравнения, описывающие динамику числа деревьев и их высоты, имеют вид:

$$\begin{aligned} H &= a\phi - bH^2, \\ n &= -(1 - c\Phi^d)n, \end{aligned}$$

где  $a, b, c, d$  - экспериментальные постоянные, функция  $\Phi$  описывает относительную интенсивность фотосинтеза с учетом конкуренции деревьев за свет следующим образом:

$$\Phi = \Phi_1 \equiv \frac{1 - e^{-knH^2}}{RH^2}$$

или

$$\Phi = \Phi_2 \equiv \frac{P_{max} + LI_0}{LI_0} \frac{1}{RnH^2} \ell^n \frac{P_{max} + LI_0}{P_{max} + LI_0 \exp(-knH^2)},$$

где  $\lambda, k$  – постоянные,  $I_0$  – плотность светового потока над растительным пологом,  $P_{max}$  – насыщенность (определяется по кривой фотосинтеза).

Интенсивность дыхания также можно учесть:

$$T(p) = (\tau_1 + \tau_2)P,$$

где  $\tau_1$  – коэффициент, а  $\tau_2(T)$  – возрастающая при росте температуры воздуха  $T$  функция.

Итак, модель вида (8), описывающая динамику отдельного сообщества определена. Предполагается выполнимость всех условий, обеспечивающих существование и единственность решение модели (8)-(11).

Уточним вид интенсивности рождения и интенсивности смертности. Согласно (11), функция  $\mu$  и  $\beta$  зависят только от состояния и возраста. Будем считать (для простоты), что

$$\beta(X, a, Y) = \gamma(x) \beta(a, Y), \quad (12)$$

где

$$\int_E \gamma(x) dX = 1.$$

Количество частиц возраста  $a$  и состояния  $Y$ , погибших в момент  $t$ , равно

$$\mathcal{M}(a, Y), \ell(t, a, Y) = \int_E \beta(X, a, Y) \ell(t, a, X) dX.$$

Количество проростков  $B(t, X) = \ell(t, 0, X)$  удовлетворяет уравнению восстановления:

$$\beta(t, X) = \gamma(X) \varphi(t) + \int_0^t \int_E K(X, Y, s) \beta(t - s, Y) ds dY,$$

Функция  $\varphi(t)$  определяет общую численность поколения потомков от начального распределения  $\ell_0$ ; задается и репродуктивная способность начального распределения,  $m$  – возраст появления новых проростков.

Предельное распределение является стабильным: при любом начальном распределении  $\ell_0$  плотность древесной популяции сходится.

## Заключение

Экосистема леса – нелинейная, но упорядочиваемая и иерархическая. Постоянно возникают свойства, которых нет у составляющих компонентов (эмерджентные экологические свойства). Следствие – невозможность исследования динамики сложных лесных экосистем с помощью иерархического их расчленения (декомпозиции на подсистемы) с последующим изолированным изучением этих подсистем. Всегда утрачивается ряд свойств, определяемых целостностью (эмерджентностью) лесной системы. Компьютерные модели требуют оперативной информации, мониторинга, системы сбора и анализа информации, многокритериального подхода.

При моделировании лесных экосистем обычно выделяют два функциональных блока:

- продукционный процесс растений;

- процессы, происходящие в почве.

Главная задача - рассмотрение обмена ресурсами на различных уровнях. Наибольшие успехи достигнуты в моделировании популяционной динамики. Меньше работ посвящено моделированию динамики экосистем леса, тундры, пустыни. Данная работа – относится к этой небольшой группе работ и может быть развита.

## Литература

- [1]. Владимиров И.Н., Мяззлец А.В., Мясникова С.И., Солодянкина С.В., Трофимова И.Е., Фролов А.А. Гомология и гомотопия географических систем. – ГЕО, 2009.
- [2]. Гуц А.К. Глобальная этносоциология. Омск, ОМГУ, 1997, -212 с.
- [3]. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. ФАЗИС, ВЦ РАН, 2000, - 400 с.
- [4]. Фролов А.А., Черкашин А.К. Эволюционное моделирование и картографирование, Геодезия и картография. – 2009, №6, с.40-45.
- [5]. Черкашин А.К. Система математических моделей леса. Планирование и прогнозирование природно-экономических систем. - Новосибирск: Наука, 1984. с.46-57.
- [6]. Губанов В.А. Выделение нестационарной циклической составляющей из временных рядов. Экономика и математические методы, 2003, т.39, №1, с. 76-89.
- [7]. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Пер. с англ.-М.: Наука. -1978.
- [8]. Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические модели биологических продукционных процессов. -М., 1993.
- [9]. Математическое моделирование популяций растений и фитоценозов. Сборник научных статей. -М.: Наука, -1992.
- [10]. Ситников П. В. Построение систем поддержки принятия решений на основе онтологий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2003.
- [11]. Евдокимова Е.Н. Эволюция процессного подхода в управлении и перспективы его развития // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. - 2011. - № 28. - с. 117-124.
- [12]. Василькова В.В. Порядок и хаос в развитии социальных систем. Синергетика и теория социальной организации. – СПб.: Лань, 2002.
- [13]. Кузнецов В., Козлов Н., Хомяков П. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством. – М.: Ленанд, 2005, - 232 с.
- [14]. Куц А.К., Хлызов Е.О. Модель ярусно-мозаичного леса и моделирование сукцессии. Математические структуры и моделирование, вып. 2(23), 2011.
- [15]. Редькин А.К., Якимович С.Б. Математическое моделирование и оптимизация технологий лесозаготовок. Изд-во МГУ. - М.: МГУЛ, 2005. - 504 с.
- [16]. Алпатов Ю.Н., Ащеулова Д.В. // МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОГО МАССИВА В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3 (15). С. 81-84.
- [17]. Барановский Н.В., Андреева К.Н. // МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА СТЕВЛ ХВОЙНОГО ДЕРЕВА // Cloud of Science. 2015. Т. 2. № 4. С. 591-598.
- [18]. Барановский Н.В., Ни А.Э. // ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОЧВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНОГО ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 6. С. 1380-1386.
- [19]. Бочков В.С. // ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ // В сборнике: VI Международные научные чтения (памяти Ф.А. Блинова) Сборник статей Международной научно-практической конференции. Европейский фонд инновационного развития. 2017. С. 9-15.
- [20]. Гаврилов К.А., Morvan D., Assagu G., Любимов Д.В., Meradji S., Бессонов О.А. // ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД ЛЕСНЫМ ПОЛОГОМ // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 2. С. 34-45.
- [21]. Доррер Г.А., Иванилова Т.Н. // КОМПЬЮТЕРНЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ОХРАНЕ ЛЕСА // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV. № 1-2. С. 128-135.
- [22]. Каевницер В.И., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. // ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ОЦЕНКИ ИХ РОЛИ В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА // Экономика природопользования. 2015. № 4. С. 57-160.
- [23]. Каракчиева И.В. // ИНФОРМАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ

- ПРОЕКТА ОСВОЕНИЯ ЛЕСНОГО УЧАСТКА // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2012. № 7 (83). С. 63-68.
- [24]. Колбовский Е.Ю. // ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ МЕСТОПОЛОЖЕНИЙ // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 5. С. 20-24.
- [25]. Колобов А.Н., Фрисман Е.Я. // МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМООРГАНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ // Региональные проблемы. 2010. Т. 13. № 2. С. 32-36.
- [26]. Коморовский В.С., Доррер Г.А., Осавелюк П.А., Шаталов П.С. // РАЗРАБОТКА ГИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ТУШЕНИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ ВБЛИЗИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ (ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ - ОБЪЕКТ) // отчет о НИР
- [27]. Миронов В.И., Гусева Е.В. // ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ // В книге: Тверской государственный технический университет - опорный региональный ВУЗ в подготовке инженерных кадров Сборник тезисов докладов внутривузовской научно-практической конференции преподавателей и сотрудников Тверского государственного технического университета. 2015. С. 26-28.
- [28]. Моисеев Н.Н. // МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПЛАНЕТАРНОЙ ЭКОЛОГИИ // отчет о НИР № 96-01-00193 (Российский фонд фундаментальных исследований)
- [29]. Немчинова А.В. // ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ И ИХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА С ПОМОЩЬЮ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ СУКЦЕССИИ // Вестник Костромского государственного университета. 2014. Т. 20. № 7. С. 70-75.
- [30]. Немчинова А.В. // ПРИЗНАКИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННОСТИ АВТОГЕННОЙ СУКЦЕССИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В МАРКОВСКИХ МОДЕЛЯХ // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 2. С. 255-265.
- [31]. Никифоров А.А. // АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ, ДИНАМИКИ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ, МАТЕМАТИЧЕСКОГО И 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург, 2005
- [32]. Рылкова О.И., Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Романова Н.А., Рылков И.В., Лошилов А.А. // ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ЛЕСАХ ВЫСОКОБОРСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА БОРСКОГО РАЙОНА НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 898.
- [33]. Секретенко О.П., Грабарник П.Я. // АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЕВ МЕТОДАМИ СЛУЧАЙНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ПОЛЕЙ // Сибирский лесной журнал. 2015. № 3. С. 32-44.
- [34]. Ситник В.В. // МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕСНОГО МАССИВА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, ВЫЗВАННОЙ ПАДЕНИЕМ КРУПНОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 45-55.
- [35]. Суховольский В.Г., Захаров Ю.В., Ковалев А.В. // МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 34. № 3-4. С. 174-179.
- [36]. Ткачева А.А. // ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА SPACE COLONIZATION ПРИ ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 1 (53). С. 85-91
- [37]. Lukashovich, V., Schegoleva, L., & Kornilov, K. (2017). STATEMENT OF THE PROBLEM OF THE OPTIMAL PLACEMENT OF LESOSEK AND THE ALGORITHM OF ITS SOLUTIONS. Internet Science, 0 (6). Obtained from <https://internetnauka.ru/index.php/journal/article/view/183>
- [38]. Mahmudov, H. (2017). FIGHTING WITH FOREST FIRE. History. Economy. Geopolitics, 0 (1). Obtained from <https://internetnauka.net/index.php/geopolitika/article/view/8>
- [39]. Naurazova, E. (2017). IS THE CLIMATIC DISASTER EXPECTED TO EUROPE ?. History. Economy. Geopolitics, 0 (5). Obtained from <https://internetnauka.net/index.php/geopolitika/article/view/115>
- [40]. Petrosyants, A. (2017). PROGRAM OF RESEARCH OF GLOBAL ATMOSPHERIC PROCESSES. Economy. Business. Informatics, 0 (3). Obtained from <https://internetnauka.com/index.php/journal/article/view/111>
- [41]. Sokolova, T. (2017). SYSTEM ANALYSIS OF ECOLOGICAL-ECONOMIC AND INFORMATION HIERARCHICAL STRUCTURES. Internet Science, 0 (5). Obtained from <https://internetnauka.ru/index.php/journal/article/view/158>

## References

- [1]. Vladimirov IN, Myadzelets AV, Myasnikova SI, Solodyankina SV, Trofimova IE, Frolov AA Homology and homotopy of geographical systems. - GEO, 2009.
- [2]. Guts A.K. Global ethnosociology. Omsk, OMGU, 1997, -212 pp.
- [3]. Krasnoshchekov PS, Petrov AA Principles of constructing models. PHASIS, Computing Center of RAS, 2000, - 400 p.
- [4]. Frolov AA, Cherkashin AK Evolutionary modeling and mapping, Geodesy and cartography. - 2009, №6, p.40-45.
- [5]. Cherkashin A.K. System of mathematical models of forest. Planning and forecasting of natural-economic systems. - Novosibirsk: Science, 1984. p.46-57.
- [6]. Gubanov V.A. Isolation of the non-stationary cyclic component from time series. Economics and Mathematical Methods, 2003, vol. 39, No. 1, p. 76-89.
- [7]. Shannon R. Simulation of systems - art and science. Trans. With English-M.: Science. -1978.
- [8]. Riznichenko G.Yu., Rubin A.B. Mathematical models of biological production processes. -M., 1993.
- [9]. Mathematical modeling of plant populations and phytocenoses. Collection of scientific articles. -M.: Science, - 1992.
- [10]. Sitnikov P. V. Construction of decision support systems based on ontologies: Author's abstract. Dis. ... cand. Tech. Sciences. Samara, 2003.
- [11]. Evdokimova E.N. Evolution of the process approach in management and prospects for its development // Management of economic systems: electronic scientific journal. - 2011. - No. 28. - p. 117-124.
- [12]. Vasilkova V.V. Order and chaos in the development of social systems. Synergetics and theory of social organization. - St. Petersburg: Lan, 2002.
- [13]. Kuznetsov V., Kozlov N., Khomyakov P. Mathematical modeling of forest evolution for the purposes of forest management. - Moscow: Lenand, 2005, - 232 p.
- [14]. Kuts A.K., Khlyzov E.O. Model of a tiered-mosaic forest and modeling of succession. Mathematical structures and modeling, no. 2 (23), 2011.
- [15]. Redkin AK, Yakimovich SB Mathematical modeling and optimization of logging technologies. Publishing house of Moscow State University. - Moscow: MGUL, 2005. - 504 p.
- [16]. Alpatov Yu.N., Ascheulova DV // MATHEMATICAL MODEL OF FOREST MASSIF IN STATIONARY MODE // Systems. Methods. Technologies. 2012. No. 3 (15). Pp. 81-84.
- [17]. Baranovsky N.V., Andreeva K.N. // MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL EFFECTS FROM THE FRONT OF THE FOREST FIRE ON THE BAR OF THE CONVEY WOOD // Cloud of Science. 2015. T. 2. № 4. S. 591-598.
- [18]. Baranovsky NV, Neither A.E. // NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN THE SOIL WITH THE INFLUENCE OF THE LOCAL FLARE FIRE IN THE TWO-DIMENSIONAL INSTALLATION // Engineering and Physics Journal. 2014. 87. No. 6. P. 1380-1386.
- [19]. Bochkov VS // USE OF COMPUTER VISION ALGORITHMS IN FIRE-FIRE-FIGHTING PROBLEMS // In the collection: VI International scientific readings (in memory of FA Blinov) Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. European Foundation for Innovative Development. 2017. pp. 9-15.
- [20]. Gavrilov KA, Morvan D., Accary G., Lyubimov DV, Meradji S., Bessonov OA // NUMERICAL MODELING OF COHERENT STRUCTURES UNDER THE DISTRIBUTION OF THE IMPURITY IN THE ATMOSPHERIC BORDER LAYER OVER FOREST FORM // Computational Mechanics of Continuous Media. 2010. T. 3. No. 2. P. 34-45.
- [21]. Dorrer GA, Ivanilova TN // COMPUTER TRAINING FACILITIES FOR PREPARATION OF SPECIALISTS FOR FOREST PROTECTION // Coniferous boreal zone. 2008. T. XXV. № 1-2. Pp. 128-135.
- [22]. Kaevitser VI, Krapivin VF, Potapov II // ECONOMICALLY EFFECTIVE INFORMATION AND MODELING TECHNOLOGY OF FOREST ECOSYSTEM MONITORING AND EVALUATION OF THEIR ROLE IN CLIMATE CHANGE // Economics of Nature Management. 2015. № 4. P. 57-160.
- [23]. Karakchieva I.V. // INFORMATION AND ECONOMIC MODELING OF FOREST USE AS AN EFFECTIVE MECHANISM OF ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE PROJECT OF FOREST SECTOR DEVELOPMENT // Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2012. No. 7 (83). Pp. 63-68.
- [24]. Kolbovsky E.Yu. // GEOINFORMATION MODELING AND CARTOGRAPHY OF LANDSCAPE LOCATIONS // News of Higher Educational Institutions. Geodesy and aerial photography. 2016. № 5. P. 20-24.
- [25]. Kolobov AN, Frisman E.Ya. // MATHEMATICAL MODELING OF THE SELF-ORGANIZATION PROCESS OF THE SPATIAL-AGE STRUCTURE OF THE TREE WOOD COMMUNITY // Regional problems. 2010. T. 13. № 2. P. 32-36.
- [26]. Komorovsky VS, Dorrer GA, Osavelyuk PA, Shatalov PS // DEVELOPMENT OF THE GIS-ORIENTED SYSTEM OF SUPPORT OF DECISION-MAKING FOR NATURAL FIRE EXTINGUISHING NEAR BUILT-IN SETTLEMENTS AND OBJECTS OF PROTECTION (FOREST FIRE-OBJECT) // report on R & D
- [27]. Mironov VI, Guseva EV // DEFINITION OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE DATABASE FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF COMBUSTION OF FOREST FUEL MATERIALS // In the book: Tver State Technical University - the basic regional university in the preparation of

- engineering personnel. Collection of abstracts of the reports of the university scientific and practical conference of teachers and employees of the Tver State Technical University. 2015. pp. 26-28.
- [28]. Moiseyev N.N. // MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF PLANETARY ECOLOGY // report on R & D No. 96-01-00193 (Russian Foundation for Basic Research)
- [29]. Nemchinova A.V. // ESTIMATION OF STRUCTURAL DEGRADATION OF FOREST ECOSYSTEMS AND THEIR RESTORATION POTENTIAL WITH THE MARKOVSKI MODEL OF SUKCESSION // Bulletin of the Kostroma State University. 2014. T. 20. № 7. P. 70-75.
- [30]. Nemchinova A.V. // FEATURES OF STOCHASTIC DETERMINATION OF AUTOGENOUS SUSSESSES OF FOREST ECOSYSTEMS IN MARKOV MODELS // Computer Studies and Modeling. 2016. T. 8. No. 2. S. 255-265.
- [31]. Nikiforov A.A. // ANALYSIS OF THE STRUCTURE, DYNAMICS AND PRODUCTIVITY OF THE FOREST VEGETATION COVER WITH THE APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES, MATHEMATICAL AND 3D MODELING // the dissertation author's abstract on the competition of a scientific degree of the candidate of agricultural sciences / Saint-Petersburg State Forest Technical Academy. CM. Kirov. Saint-Petersburg, 2005
- [32]. Rylkova OI, Kataeva L.Yu., Maslennikov DA, Romanova NA, Rylkov IV, Loshilov AA // NUMERICAL MODELING OF FOREST FIRE IN FORESTS OF HIGH-BORROW FORESTRY OF BORSKIY DISTRICT OF NIZHNY NOVGOROD REGION // Modern problems of science and education. 2013. No. 6. P. 898.
- [33]. Secretarenko OP, Grabarnik P.Ya. // ANALYSIS OF THE HORIZONTAL STRUCTURE OF THE ARCTIC STATES BY METHODS OF RANDOM POINT FIELDS // Siberian Forest Journal. 2015. № 3. P. 32-44.
- [34]. Sitnik V.V. // MODELING THE DESTRUCTION OF THE FOREST MASSIVE BY A SHOCK WAVE CAUSED BY THE FALLING OF A LARGE SPACE BODY // Chemical Physics. 2009. T. 28. № 5. S. 45-55.
- [35]. Sukhovolsky VG, Zakharov Yu.V., Kovalev A.V. // MODELING OF DEFECTS IN THE HORIZONTAL STRUCTURE OF FORESTRY PLANTS // Coniferous boreal zone. 2016. T. 34. № 3-4. Pp. 174-179.
- [36]. Tkacheva A.A. // APPLICATION OF SPACE COLONIZATION ALGORITHM IN THREE-DIMENSIONAL MODELING OF COMPLEX NATURAL OBJECTS // Bulletin of the Siberian State Aerospace University. Academician M.F. Reshetnev. 2014. No. 1 (53). Pp. 85-91
- [37]. Lukashovich, V., Schegoleva, L., & Kornilov, K. (2017). STATEMENT OF THE PROBLEM OF THE OPTIMAL PLACEMENT OF LESOSEK AND THE ALGORITHM OF ITS SOLUTIONS. Internet Science, 0 (6). Obtained from <https://internetnauka.ru/index.php/journal/article/view/183>
- [38]. Mahmudov, H. (2017). FIGHTING WITH FOREST FIRE. History. Economy. Geopolitics, 0 (1). Obtained from <https://internetnauka.net/index.php/geopolitika/article/view/8>
- [39]. Naurazova, E. (2017). IS THE CLIMATIC DISASTER EXPECTED TO EUROPE?. History. Economy. Geopolitics, 0 (5). Obtained from <https://internetnauka.net/index.php/geopolitika/article/view/115>
- [40]. Petrosyants, A. (2017). PROGRAM OF RESEARCH OF GLOBAL ATMOSPHERIC PROCESSES. Economy. Business. Informatics, 0 (3). Obtained from <https://internetnauka.com/index.php/journal/article/view/111>
- [41]. Sokolova, T. (2017). SYSTEM ANALYSIS OF ECOLOGICAL-ECONOMIC AND INFORMATION HIERARCHICAL STRUCTURES. Internet Science, 0 (5). Obtained from <https://internetnauka.ru/index.php/journal/article/view/158>