

Н.И. Гурин, доцент; В.П. Григорьев, доцент; М.С. Скачков, ассистент;  
В.С. Микуцкий, вед. науч. сотрудник ИПИПРЭ НАНБ

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДРЕВОСТОЕВ

It is developed a computer system for gap model to simulate forest structure, dynamic and succession in climatic conditions of Belarus

Разработана компьютерная система «Моделирование динамики древостоев» для имитационного моделирования динамики роста одновидовых древостоев основных лесохозяйственных пород для почвенно-климатических условий Беларуси. За основу функционирования компьютерной системы принята модель динамики роста древостоев FORSKA [1,2], первоначально разработанная и апробированная для лесов Скандинавии. Модель FORSKA относится к классу т. н. гар-моделей, которые базируются на рассмотрении развития отдельно взятого дерева в структуре древостоя на площадке с размерами, достаточными для учета конкурентных отношений данного дерева с окружающими его соседями в лесном сообществе, а затем расчете по совокупности характеристик отдельных деревьев интегральных характеристик всего древостоя. При этом размеры гар-площадки зависят от типа древостоя и его породного состава и могут колебаться в пределах 0,04–0,1 га. В моделируемой пространственной структуре древостоя учитывается конкуренция за световую энергию, корневое питание и другие влияющие на рост дерева параметры. Однако в отличие от других известных гар-моделей (FORET, JABOWA, SILVA и др.), модель FORSKA учитывает био-гео-химико-физиологические процессы роста дерева и является их дальнейшим развитием.

Используемая в компьютерной системе модель содержит более 30 параметров, часть из которых изменяется в процессе роста дерева и вычисляется на основе решений системы уравнений, другая же часть (около 20 параметров) задается как начальные условия произрастания и породные характеристики дерева. В процессе имитационного моделирования динамики роста древостоя с шагом в 1 год на экран дисплея выводится (см. рис. 1) текущее пространственное распределение моделируемого древостоя на гар-площадке с учетом конкурентных взаимоотношений деревьев и модельным представлением каждого отдельного дерева с визуализацией очертаний крон и стволов деревьев (вид сверху), а также может быть представлена визуализация каждого дерева на площадке вместе с его ближайшим окружением (вид сбоку в изометрии). При этом рассчитываемые системой значения всех изменяемых параметров каждого дерева на моделируемой гар-площадке (по умолчанию в системе размер гар-площадки – контрольный участок 20х20 м) выводятся в виде усредненных значений в пересчете на 1 га на соответствующие графики для основных статистических параметров моделируемого древостоя – плотность (количество деревьев на га), средняя высота и диаметр на высоте груди, базальная площадь и запас. На тех же графиках приведены контрольные значения параметров моделируемого древостоя, взятые из соответствующих таблиц хода роста для заданных условий произрастания, что позволяет анализировать результаты моделирования.

При проведении имитационного моделирования роста древостоя в компьютерной системе «Моделирование динамики древостоев» фактически проводится деловая игра на компьютерном тренажере, в ходе которой необходимо «оптимизировать» задаваемые значения параметров, описывающих используемую модель. В модели значительная часть параметров, определяющих поведение древостоя, задается «вручную» как константы, характеризующие породный состав моделируемого древостоя и почвенно-климатические условия его произрастания, и в соответствующей таблице на экране перед началом процесса моделирования можно изменять их начальные значения, предлагаемые в таблице «по

умолчанию». Естественно, при этом будет изменяться поведение всего моделируемого древостоя. В этом контексте под «оптимизацией» используемых начальных значений параметров модели будет подразумеваться наилучшее сближение на соответствующих графиках (по запасу, средним высотам, базальной площади и т. п.), получаемых (рассчитываемых) на каждый год характеристик моделируемого древостоя с соответствующими статистическими значениями, взятыми из таблиц хода роста для данного типа древостоя.

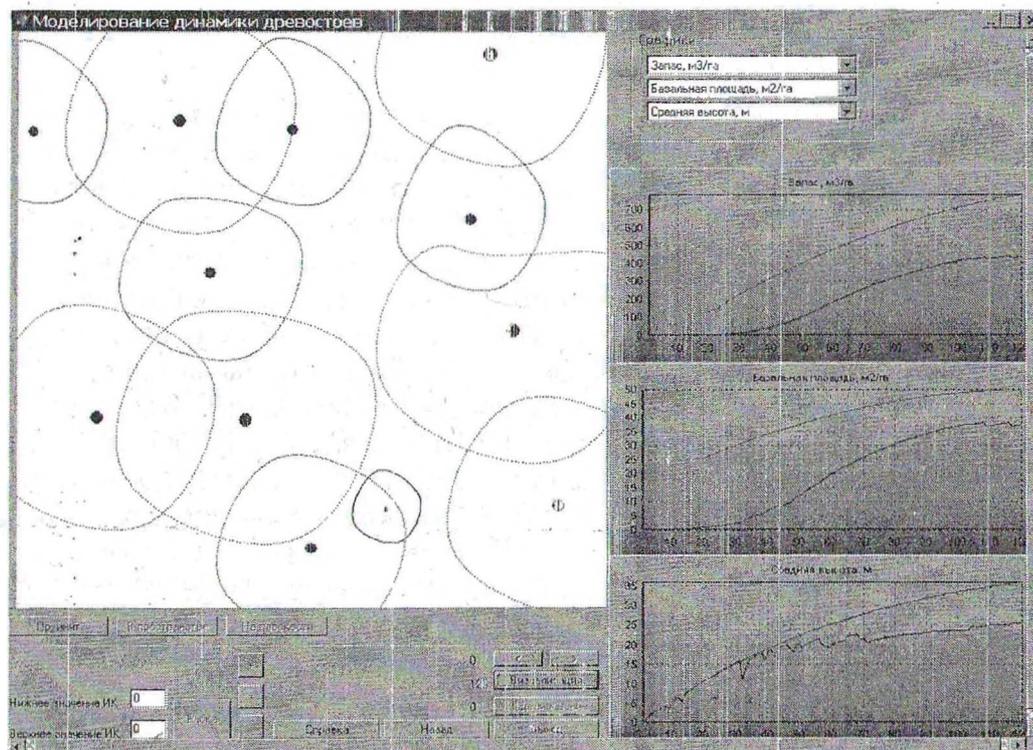


Рис. 1. Визуализация моделируемого древостоя на контрольной площадке

Используемая в компьютерной системе модель роста древостоев описывается дискретно-непрерывной системой интегродифференциальных уравнений и учитывает рождение, рост и гибель каждого дерева на гар-площадке, которая ограничивается размерами, где могут происходить конкурентные взаимоотношения между данным деревом и его окружением за световые и питательные ресурсы. Модель имитирует динамику древостоя на основе вычисления ежегодных значений основных характеристик каждого дерева на моделируемой площадке. При этом процессы гибели деревьев и укоренения молодых семян в модели рассматриваются как случайные.

При описании различных процессов для имитации роста дерева модель сочетает в себе детерминированный и вероятностный подходы. Модель имеет блочную структуру и состоит из подмоделей – укоренения молодых семян и гибели деревьев, где используются вероятностные механизмы вычислений, а также имитации динамики роста древостоя, которая рассчитывается на основе дискретно-непрерывной системы уравнений. При этом дискретную часть системы составляют вероятностные механизмы укоренения и гибели деревьев, что динамически отражается на количестве уравнений системы, а также механизмы изменения высоты ствола дерева от земли до начала его кроны, рост которой зависит от достижения некоторого порогового значения световой энергии, от недостатка последней происходит усыхание нижних ветвей дерева и, таким образом, подъем высоты кроны.

Непрерывная часть модели описывает динамику изменения параметров  $i$ -го дерева на моделируемой площадке и выражается системой  $2n$  ( $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  – заданное число деревьев на площадке в начальный момент времени) нелинейных интегродифференциальных уравнений:

$$\frac{dL_i}{dt} = C \frac{dD_i^2}{dt} - \psi L_i$$

$$\frac{d(D_i^2 H_i)}{dt} = \left(1 - \frac{W_{tot}}{W_{max}}\right) \int_{H_{max}-H_i}^{H_{max}-B_i} [\gamma P(z) - \delta(H_{max} - z)] S_i dz.$$

В данной системе независимыми являются два параметра:  $L_i$  – площадь листовой поверхности дерева и  $D_i$  – диаметр ствола на высоте груди, переменная дифференцирования  $t$  – время, переменная интегрирования  $z$  – глубина проникновения в крону дерева от ее вершины (см. рис. 2).

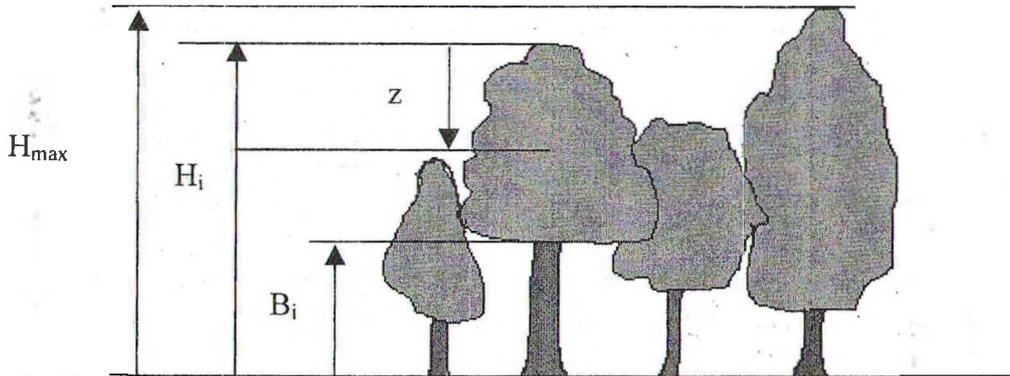


Рис. 2. Определение пространственных параметров дерева, используемых в модели

Первое уравнение определяет скорость роста площади листовой поверхности дерева  $L$ , которая принимается прямо пропорциональной скорости роста площади его поперечного сечения ствола дерева  $D^2$  с коэффициентом пропорциональности  $C$  за вычетом той ее части, которая затормаживает скорость роста листовой поверхности из-за необходимости поддержания процессов в заболони при «дыхании» дерева и принимается в модели пропорциональной самой  $L$  с видовым коэффициентом пропорциональности  $\psi$ . Такие соотношения основываются на экспериментальных наблюдениях наличия связи между заболонью, отвечающей за «дыхание» дерева, и листвой – площадь поперечного сечения заболони пропорциональна биомассе листвы, которая, в свою очередь, пропорциональна площади листвы. Первой теоретически оформленной гипотезой, объясняющей такое соотношение, была т. н. теория pipe-модели [3]. Суть ее состоит в том, что каждая единица листвы требует единичного «трубопровода» (pipe), чтобы проводить пасоку (в основном воду) от корней. Поскольку основным держателем сокопроводящих путей служит заболонь, то становится понятным существование описанного выше соотношения.

Второе уравнение определяет скорость роста дерева в целом, выражаемую в терминах т. н. индекса объема дерева  $D^2 H$ , который пропорционален объему ствола дерева (здесь  $H$  – высота ствола дерева). Правая часть этого уравнения отражает три основных процесса, влияющих в модели на рост дерева. Интеграл в правой части уравнения определяет разность суммарного вклада всех слоев листовой поверхности  $S_i dz$  дерева (здесь  $S$  – площадь листовой поверхности дерева, приходящаяся на единицу глубины погружения в его крону  $z$ ) в скорость роста индекса объема дерева от процесса фотосинтеза  $\gamma P(z)$  (здесь  $\gamma$  – весовой параметр роста, коэффициент пропорциональности, отвечающий за продуктивность листвы данной породы при образовании древесины в ходе фотосинтеза),  $P(z)$  – функция т. н. световой кривой фотосинтеза, см. далее) и суммарных затрат на «дыхание» дерева  $\delta(H_{max} - z)$  (здесь  $\delta$  – коэффициент пропорциональности, отвечающий за потерю продуктивности образования древесины данной породы в ходе «дыхания» заболони,  $(H_{max} - z)$  – расстояние от корней дерева до листового слоя на глубине  $z$  погружения в по-

лог древостоя).

Наконец, в скобках перед интегралом определяется влияние на оба этих процесса почвенно-питательных ресурсов дерева на гар-площадке, определяемое значением выражения в скобках, которое меняется от величины, равной 1, когда все ресурсы свободны, т.е. когда площадка свободна от деревьев и  $W_{tot} = 0$  (здесь  $W_{tot}$  – общая биомасса древостоя площадки на данный момент, см. далее), до величины, равной 0, когда все питательные ресурсы площадки исчерпаны и  $W_{tot} = W_{max}$  (здесь  $W_{max}$  – максимально возможная для данной площадки биомасса древостоя, напрямую связанная с бонитетом площадки).

Остальные параметры, входящие в вышеприведенную систему уравнений, определяются в модели следующим образом. Высота дерева  $H_i$  находится из принимаемого в модели асимптотического уравнения связи высоты с диаметром дерева на высоте груди  $D_i$ :

$$H_i = 1,3 + (H_{max} - 1,3) [1 - \exp(-sD_i / (H_{max} - 1,3))],$$

где  $H_{max}$  – максимальная высота дерева данной породы в определенных условиях произрастания, а  $s$  – тангенс угла наклона функции  $H(D)$  при  $D = 0$ , зависящий, в свою очередь, от плотности древостоя [4], в частности, в древостоях с большей полнотой он должен быть выше.

$W_{tot}$  – общая биомасса деревьев из окрестности  $i$ -го дерева на гар-площадке, включая и биомассу самого дерева, вычисляется по формуле

$$W_{tot} = b \sum_{i=1}^n D_i^2 \cdot H_i,$$

где  $b$  – коэффициент пересчета индекса дерева в биомассу, зависящий для каждой породы дерева от плотности его древесины и формы ствола, определяемой видовым числом дерева.

$S_i$  – площадь листовой поверхности  $i$ -го дерева на единицу высоты его кроны, которая в модели рассчитывается как средняя величина по формуле

$$S_i = L_i / (H_i - V_i),$$

где  $V_i$  – длина ствола  $i$ -го дерева от земли до начала его кроны.

$P(z)$  – световая кривая фотосинтеза (коэффициент убывания скорости чистой ассимиляции в слое листьев на глубине  $z$  от вершины полога древостоя), рассчитывается по формуле

$$P(z) = (k I(z) - c) / (k I(z) - c + a).$$

Здесь  $c$  – точка компенсации световой кривой, когда фотосинтез прекращается;  $a$  – точка полунасыщения световой кривой фотосинтеза, определяемой как значение  $(kI(z) - c)$ , при котором происходит полунасыщение световой кривой, т.е. когда  $P(z) = 1/2$ .

Точка компенсации световой кривой  $c$  используется в качестве критерия при определении высоты ствола до начала кроны дерева  $V_i$  – усыхание нижних ветвей начинается при прекращении фотосинтеза  $P(z) = 0$  из-за недостатка света, проникающего под полог древостоя на глубину  $z$ , т.е. когда  $kI(z) = c$ .

$I(z)$  – количество света на глубине  $z$  от вершины полога древостоя, рассчитываемое по формуле (фактически она выражает закон Бугера – Бэра – Ламберта о прохождении света в мутной среде):

$$I(z) = I_0 \exp(-k F(z)),$$

где  $I_0$  – среднегодовая интенсивность света на границе полога древостоя;  $k$  – видовой коэффициент затухания света;  $F(z)$  – кумулянт листового индекса на глубине  $z$ ; определяе-

мый как отношение общей площади листовой поверхности полого древостоя от его верха до глубины  $z$  к общей площади моделируемой площадки  $S_{пл}$ :

$$F(z) = S_z / S_{пл}.$$

Гибель целых деревьев в модели может происходить от затенения, нехватки влаги и расходов на поддержание листвы. Эти причины учитываются в т. н. индексе энергии  $E_{rel}$ , который вычисляется по формуле

$$E_{rel} = \Delta V / (\gamma P(0)L),$$

где  $\Delta V$  – прирост объема дерева за год;  $P(0)$  – значение световой кривой на вершине полога;  $L$  – общая листовая поверхность дерева. В этой формуле, таким образом, учитываются затенение и самозатенение дерева, конкуренция за водные ресурсы и расходы на питание. Вероятность гибели деревьев данной породы рассчитывается одинаково и зависит от видового значения индекса энергии  $E_{rel}$ . Поэтому количество погибших деревьев вычисляется как значение случайной величины, имеющей биномиальное распределение. Вероятность гибели дерева принимается равной

$$P_{гиб} = 1 - e^{-X \Delta t},$$

где  $\Delta t$  – временной шаг (принимаемый в модели равным 1 году);  $X$  – ступенчатая функция:

$$X = \begin{cases} U_0 + U_1, & \text{при } E_{rel} < \theta, \\ U_0, & \text{при } E_{rel} \geq \theta. \end{cases}$$

Здесь  $U_0$  и  $U_1$  – соответственно скорости гибели деревьев от естественных условий и от угнетения в результате конкуренции;  $\theta$  – пороговое значение индекса энергии, ниже которого вероятность их гибели увеличивается скачком многократно, поскольку  $U_1 \gg U_0$ .

Естественное возобновление предполагается зависящим лишь от световых условий в нижнем слое древостоя на площадке (на поверхности земли). Количество  $n$  выживших (укоренившихся) молодых деревьев на каждом временном шаге для каждого вида рассчитывается как случайная величина, распределенная по закону Пуассона:

$$P_{рожд} = E' \frac{e^{-E'}}{n!}$$

с математическим ожиданием, равным  $E' P_{ниж} / P(0)$ , где  $E'$  – параметр интенсивности укоренения, а  $P_{ниж} = P(H_{max})$  – значение световой кривой, связанное с количеством света, приходящего в нижний слой древостоя.

Отпад и выживание молодых деревьев при моделировании роста древостоя происходят на основе рассчитанных значений индексов конкуренции  $K_i$  для каждого дерева на площадке для отпада и для достаточно большого набора случайно сгенерированных посадочных гнезд на площадке при его рождении и выживании (укоренении). При этом отпад в моделируемом древостое происходит среди деревьев, имеющих наибольшее значение  $K_i$ , а выживание – среди случайно сгенерированных гнезд рождения на площадке с наименьшим значением  $K_i$ . Для устранения граничных эффектов и обеспечения сохранения структуры распределения деревьев в окрестности анализируемого дерева при расчете  $K_i$  используется свертка площадки в тор.

Индекс конкуренции  $K_i$  при моделировании рассчитывается по формуле Хайги, которая имеет следующий вид:

$$K_i = \sum_{j=1}^n (D_j / D_i) / R_{ij}$$

где  $D_i$  – диаметр дерева  $i$ , для которого рассчитывается индекс конкуренции;  $D_j$  – диаметр дерева  $j$ , влияющего на индекс конкуренции;  $R_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м деревьями;  $n$  – число конкурентов.

Среди параметров в используемой модели параметр  $I_0$  зависит только от широты местности и фактически для всей территории Беларуси может быть задан как постоянная среднегодовая величина (в обозначениях используемой модели равная  $530 \text{ ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), параметры  $b, k, C, \gamma, \psi, \delta, \alpha, s, E', U_0, U_1, \theta$  зависят только от свойств породы древостоя на выбранной площадке, а параметры  $W_{\max}, H_{\max}$  – как от свойств породы древостоя, так и свойств самой площадки (рекомендуемые значения параметров приведены в табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемые значения параметров для модели

Название параметра (ед. измерения)	Параметр	Сосна	Ель	Дуб	Береза	Осина	Ольха ч.
Коэффициент затухания света (безразм.)	$k$	0,4	0,4	0,3	0,25	0,25	0,3
Точка компенсации света ( $\text{ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ )	$c$	59	22	30	50	45	40
Масштабный коэффициент роста ( $\text{см}^2 \text{ м}^{-1} \text{ год}^{-1}$ )	$\gamma$	78	11	30	70	70	70
Весовой коэффициент под- держки заболони ( $\text{см}^2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ )	$\delta$	0,2	0,05	0,3	0,02	0,01	0,1
Весовой коэффициент оборота заболони ( $\text{год}^{-1}$ )	$\psi$	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Точка полунасыщения свето- вой кривой ( $\text{ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ )	$\alpha$	330	100	250	400	300	300
Коэффициент пересчета древе- сины в биомассу ( $\text{кг см}^{-2} \text{ м}^{-1}$ )	$b$	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03
Начальный тангенс угла на- клона функции $H(D)$ ( $\text{м см}^{-1}$ )	$s$	1,12	1,23	1,29	1,14	1,02	1,92
Начальное отношение площа- ди листы к $D^2$ ( $\text{м}^2 \text{ см}^{-2}$ )	$C$	0,08	0,16	0,2	0,27	0,18	0,2
Максимальная высота дерева (м)	$H_{\max}$	37	36	33	32	34	31
Максимальная плотность биомассы ( $\text{т га}^{-1}$ )	$W_{\max}$	600	600	600	400	400	400
Скорость собственной смерт- ности ( $\text{год}^{-1}$ )	$U_0$	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
Скорость смертности от угне- тения ( $\text{год}^{-1}$ )	$U_1$	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Интенсивность укоренения сеянцев ( $\text{год}^{-1} \text{ га}^{-1}$ )	$E'$	10	10	5	15	15	15
Пороговое значение для ин- декса энергии (безразм.)	$\theta$	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

На основе статистических, экспериментальных и научных данных по динамике развития древостоев для регионов, находящихся на стыке зоны хвойных и смешанных лесов умеренного пояса, согласно классификации ФАО ООН, куда по условиям лесопроизрастания входит Беларусь [5–8], в табл. 1 приведены рекомендуемые начальные значения видовых параметров имитационной модели, которые в таблице задания начальных установок режима моделирования для выбранной породы древостоя в программном модуле «Моделирование динамики древостоев» приводятся как значения, заданные «по умолчанию».

При изменении начальных значений видовых параметров древостоя в компьютерном тренажере «Моделирование динамики древостоев» в ходе проведения деловой игры для

достижения оптимальных результатов, естественно, необходимо учитывать чувствительность используемой модели (см. табл. 2) от изменения параметров в допустимом для них диапазоне.

Таблица 2

**Чувствительность модели от изменений параметров**

Параметр	k	c	$\gamma$	$\delta$	$\psi$	$\alpha$	b	s	C	$H_{\max}$	$W_{\max}$	$U_0$	$U_1$	$E'$	$\theta$
Чувствительность	H	H	H	S	I	H	S	S	M	S	S	I	I	I	I

В табл. 2 использованы следующие обозначения чувствительности параметров: H – сильно, M – средне, S – слабо, I – не чувствительна.

В заключение отметим, что компьютерная система имитационного моделирования «Моделирование роста древостоев» может использоваться как для обучения специалистов лесного хозяйства, так и непосредственно в лесном хозяйстве для поддержки принятия решений при проведении лесохозяйственных мероприятий.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Leemans R. Description and Simulation of Stand Structure and Dynamics in Some Swedish Forests. – Uppsala: Acta Univ. Ups., 1989. № 221. P. 44.
2. Prentice I.C., Leemans R. Pattern and process and the dynamics of forest structure: a simulation approach // J. Ecology. 1990. № 78. P. 340–355.
3. Mäkelä A. Implication if the Piper Model Theory on Dry Matter Partitioning and Height Growth in Trees // J. of theoretical Biology. 1986. V. 123. № 1. P. 103–120.
4. Lindner M. et al. Improving the simulation of stand structure in a forest gap model // Forest Ecology and Management. 1997. № 95. P. 183–195.
5. В.В. Смирнов. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М., Наука, 1971. 360 с.
6. А.И. Бузыкин, Л.С. Пшеничникова. Формирование сосново-лиственных молодняков. – Новосибирск: Наука, 1980. 176 с.
7. Ю.Л. Цельникер. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. – М.: Наука, 1978. 215 с.
8. А.И. Бузыкин. Моделирование элементов лесных биогеоценозов. – Красноярск: СО АН СССР, 1985. 166 с.