

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИЙ ВЫМОКАНИЯ БЕРЁЗОВЫХ ЛЕСОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Л.А. Володченкова, А.К. Гуц

Решается задача математического описания экологической катастрофы вымокания берёзовых лесов.

### Введение

Вымокание берёзово-осиновых колков в Называевском лесничестве вызывает особое беспокойство в Главном управлении лесного хозяйства Омской области. Начиная с 1993 года площадь вымокающих лесов достигла 25 тыс.га. Помимо пожаров, вымокание является основной причиной гибели омских лесов. Необходим инструмент для предсказания состояний леса. В данной статье с этой целью предлагается теоретико-катастрофическая математическая модель леса, которая используется для описания процесса вымокания леса.

### 1. Уровни деградации лесов при вымокании

*Деградированный лес* — это «вторичный лес, который вследствие деятельности человека утратил свою структуру, функцию, состав видов или производительность, обычно ассоциируемые с таким видом природного леса, который предположительно должен существовать в данной местности. Следовательно, деградированный лес поставляет меньше продукции и услуг в данной местности и поддерживает лишь ограниченное биологическое разнообразие как флоры, так и фауны. Биологическое разнообразие деградированных лесов включает множество компонентов, не относящихся к древостою, которые могут доминировать под пологом леса»<sup>1</sup>.

Вымокание зауральских и западно-сибирских берёзовых и осиновых колков характеризуется различными *уровнями деградации леса*.

На *начальном уровне деградации* лесного биоценоза происходит уменьшение биологического разнообразия и продуктивности. Такие леса наиболее

---

Copyright © 2011 Л.А. Володченкова, А.К. Гуц  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского  
E-mail: volodchenkova2007@yandex.ru, guts@omsu.ru

<sup>1</sup>Форум Организации Объединенных Наций по лесам. Восьмая сессия. Нью-Йорк, 20 апреля – 1 мая 2009 года. Пункт 5(b) предварительной повестки дня: Леса в контексте изменений в окружающей среде.

распространены. Степень нарушенности видового состава составляет в таких сообществах 25–40%.

«Периодическое переувлажнение двухлетней давности в берёзовых и осино-вых насаждениях... приводит к *среднему уровню деградации*. При этом уровне деградации отрицательное влияние находится на предельно допустимом уровне устойчивости лесной экосистемы, но отмечается превышение пределов толерантности (выносливости) <...>

Прирост и запас древостоя изменяется существенно, незначительно изменяются полнота и пространственная структура древостоя. <...>

Степень усыхания насаждения значительная, нижний предел диапазона по доле здоровых деревьев составляет 46–52% от запаса древостоя. Усыхание деревьев снижает относительную полноту и степень выполнения насаждением своего функционального назначения. Наряду с увеличением доли ослабленных деревьев значительно возрастает размер отпада<sup>2</sup>. Он превышает в 1,9 раза таковой для нормальных древостоев, идёт за счёт деревьев основного полога и составляет 37–63% от запаса здоровых деревьев. <...>

Периодическое переувлажнение — вымочки<sup>3</sup> четырех и шестилетней давности, как в берёзовых, так и в осиновых насаждениях, приводят к полной деградации.

*Полная деградация леса* характеризуется катастрофической нагрузкой на лесные экосистемы, доза воздействия сублетальная и летальная. Изменения в лесах необратимы, значения всех показателей существенно превышают диапазон их толерантности. Таксационные показатели, пространственная структура древостоя не определяются. Коэффициент, характеризующий этот показатель, равен 0,00–0,10. Здоровые деревья отсутствуют, насаждения полностью погибли и не способны выполнять своё целевое назначение. Основу древостоя составляет отпад, образовавшийся за период гибели насаждения, который более чем в 9,1–10 раз превышает таковой для нормальных насаждений. Отпад заселён ксилофагами» [1].

## 2. Вымокание берёзово-осиновых колков в Называевском лесничестве

Вымокание берёзово-осиновых колков в Называевском лесничестве вызывает особое беспокойство в Главном управлении лесного хозяйства Омской области. Начиная с 1993 года площадь вымокающих лесов достигла 25 тыс.га.

1. В таблице 1 приведено «Таксационное описание»<sup>4</sup> квартала 129, выделы 11–17, составленного в 1997 году и показывающего удовлетворительное состояние леса. Подобная ситуация имела место и для других кварталов.

---

<sup>2</sup>Усыхающая и уже усохшая части древостоя (деревья IV–VI категорий состояния).

<sup>3</sup>*Вымочки* — это ослабленные в разной степени, усыхающие и усохшие участки леса на влажных, сырых и мокрых почвах.

<sup>4</sup>Авторы благодарят начальника Главного управления лесного хозяйства Омской области А.Н. Грибенникова, по распоряжению которого были получены эти документы.

В 2009 году на леса Называевского лесничества были заведены «Карточки лесопатологической таксации», отражающие процесс вымокания берёзовых колков (в карточках указан код 831 (вымокание) причины ослабления насаждений). В таблице 2 представлена одна из таких карточек, из которой видно, что на 100% лес являет собой «старый сухостой»<sup>5</sup>. Иначе говоря, имеет место **полная деградация леса**, поскольку сухостойные деревья (усохшие) – это деревья, полностью утратившие жизненные функции; сухостой – усохшие, стоящие на корню деревья (различают «старый сухостой» и «свежий сухостой»).

Таблица 1. Таксационное описание квартала 129, выделы 11–17, 1997 год

: N	: Пло-	: Состав. Подрост, по:	Я: Вы-	: Эле-	: Воз:	Вы-	: Ди:	Кл:	Гр:	Бо:	Тип	: Полн:	Запас	сырораст.	: Кл:		
: вы-	: шадь,	: длесок покров, поч:	: со-	: мент:	:	: ас:	уп:	:	:	:	:	: ота	: леса,	дес.	МЗ	: ас:	
: де-	:	: ва, рельеф, особенн:	Р: та	:	: ра	: со-	: ам:	с	: па:	ни:	леса	:	:	:	:	: с	
: ла	: га	: ости выдела. Отмет:	: ле-	:	:	:	:	:	:	:	:	: Сумм:	на	: общий:	в т. ч.	:	
:	:	: ка о порослевом	: У: я-	: са	: ст:	: та:	: ет:	во:	во:	те:	:	: а пл:	:	: по	: то:	:	
:	:	: проих. Наимен. кат:	: ру-	:	:	:	: зр:	зр:	ТЛУ	:	: оца-	1	: на	: сос-	: ва:	:	
:	:	: ег. незалес. земель:	С: са-	:	:	: р	: ас:	ас:	т	:	: дей	:	: тав-	: рн:	:		
:	:	: Хар. лесных культур	:	:	:	: та:	: та:	:	:	:	: сеце:	га	: выпел:	ляю-	: ос:		
:	:	: Кадастров. оценка	:	:	:	:	:	:	:	:	: ний	:	: щим	: ти:	:		
: 1	: 2	: 3	: 4	: 5	: 6	: 7	: 8	: 9	10	: 11	: 12	: 13	: 14	: 15	: 16	: 17	: 18:

1 Называевское лесничество

Квартал 129

1	,5 8В20С	1 18 В ОС	50 18 18 17 18	5 2 2	В	0,6	12	6	5 2 1 4
2	,6 9В10С	1 18 В ОС	50 18 18 17 18	5 2 2	В	0,6	12	7	6 2 1 3
3	,6 6В40С	1 21 В ОС	65 21 24 60 20 24	7 3 2	В	0,5	12	7	4 2 3 4
4	5,7 5В50С	1 21 В ОС	65 21 22 21 24	7 3 2	В	0,5	12	68	34 2 34 4
5	2,3 10В	1 20 В	60 20 24	6 2 2	В	0,7	16	37	37 2 срс
9	,8 9В10С	1 20 В ОС	60 20 20 20 22	6 2 2	В	0,7	16	13	12 2 1 3
10	,7 70С3В	1 7 ОС В	15 7 6 7 6	2 1 2	В	0,7	4	3	2 1
11	,4 7В30С	1 20 В ОС	60 20 22 20 24	6 2 2	В	0,6	14	6	4 2 2 4
12	,2 10В	1 10 В	20 10 8	2 1 2	В	0,5	4	1	1
13	1,9 8В20С	1 21 В ОС	60 21 22 21 24	6 2 2	К	0,6	15	29	23 2 6 4
14	,3 7В30С	1 20 В ОС	60 20 20 20 24	6 2 2	В	0,6	14	4	3 2 1 4

Аналогичная картина 100%-го «старого сухостоя», по данным Главного управления лесного хозяйства Омской области, наблюдается в квартале 127

<sup>5</sup>Старый сухостой – живая хвоя (листва) отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; стволовые вредители вылетели; на стволе грибница дереворазрушающих грибов [2, с.31].

(выделы 1–17, 113, 124–126, 132, 148, 149, 151), 129 (выделы 52, 53), в квартале 141 (выделы 16, 43, 44, 66, 67, 81, 91, 129, 134–136, 139, 141), в квартале 142 (выдел 125), в квартале 144 (выдел 2).

2. «Усыхание»<sup>6</sup> – 10%, «старый сухостой» – 90% по кварталу 50 (выделы 34).

3. «Усыхание» – 10%, «свежий сухостой» – 30%, «старый сухостой» – 60% по кварталу 128 (выдел 63).

Таблица 2. Карточка лесопаталогической таксации, квартал 129

Филиал ФГУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Новосибирской области» (организация, проводившая работу)  
Омская область (субъект Российской Федерации)

Карточка лесопаталогической таксации

Лесничество (лесопарк) Называетсякое Дата проведения 20.07.2009

Квартал	129	Выдел	11-17			Площадь выдела, га	0,4+0,2+1,9+0,3+0,2+0,2+0,2=3,4				
Состав	10Б	Возраст	60	Полнота	0,1	Бонитет	4	ТУМ	Ос	Запас на 1 га	15
Причины ослабления насаждений			831								

Состав	коэффициент	порода	Ярус	Класс	Категория	Возраст	Распределение деревьев по категориям состояния, % от запаса										Признаки повреждения насаждения (код)					Рекомендуемые санитарно-оздоровительные мероприятия						
							без признаков ослабления	ослабленные	слабым ослабленные	улыки мошере	свежий сухостой	старый сухостой	свежий стромом	старый стромом	свежий буромом	старый буромом	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	вид	площадь, га
10	Б	1	4	60	100	-	-	-	-	100	-	-	-	-	114	100	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29

Исполнитель Д.С. Лопатин тел. (3812) 27-76-79

4. «Усыхание» – 10%, «свежий сухостой»<sup>7</sup> – 30%, «старый сухостой» – 60% по кварталу 128 (выдел 63).

5. Зафиксирован «свежий сухостой» – 50%, «старый сухостой» – 50% (**уровень полной деградации леса**) по кварталу 128 (выделы 50, 64, 65, 67, 77, 78, 81) (табл. 3), по кварталу 141 (выделы 92, 93, 95-101, 104-106, 108, 111, 112) (табл. 4), по кварталу 144 (выделы 8-11, 13, 21, 31, 39) (табл. 5).

6. Зафиксирован «свежий сухостой» – 60%, «старый сухостой» – 40% по кварталу 8 (выделы 2, 3, 13, 18, 19, 22, 23, 26, 32-35, 39-42, 49, 74, 83, 85, 86), по кварталу 34 (выдел 55).

7. «Усыхание» – 50%, «свежий сухостой» – 10%, «старый сухостой» – 40% по кварталу 1 (выделы 32, 33, 35-39, 44, 53), по кварталу 50 (выделы 32, 33, 35-37, 38-39, 44, 48, 53).

<sup>6</sup> Усыхающие деревья – крона сильно ажурная; листва мелкая, редкая, светло-зелёная или желтоватая; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей [2, с.31].

<sup>7</sup> Свежий сухостой – листва увяла или отсутствует; частичное опадение коры [2, с.31].

Таблица 3. Карточка лесопаталогической таксации, квартал 128

Филиал ФГУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Новосибирской области» (организация, проводившая работу)  
 Омская область (субъект Российской Федерации)

**Карточка лесопаталогической таксации**

Лесничество (лесопарк) Называевское

Дата проведения 20.07.2009

Участковое лесничество Называевское

Квартал 128 Выдел 64,65,67,77,78,81 Площадь выдела, га  $0,8+2,2+0,9+0,2+1,7+0,4=6,4$

Состав 10 Б Возраст 65 Полнота 0,5 Бонитет 3 Тип леса 0с Запас на 1 га 80

Причины ослабления насаждений 831

Состав	коэффициент	порода	Ярус	Класс Крафта	Возраст породы, лет	Распределение деревьев по категориям состояния, % от запаса											Признаки повреждения насаждений (код)						Рекомендуемые санитарно-оздоровительные мероприятия								
						Количество учтенных деревьев, шт.	без признаков ослабления	ослабленные	слабым ослабленные	усыхающие	свежий сухой	старый сухой	свежий ветровал	старый ветровал	свежий бурелом	старый бурелом	признак 1	признак 2	признак 3	признак 4	признак 5	признак 6	вид	площадь, га	запас, м <sup>3</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
10	б	1	3	65	100	-	-	-	-	50	50	-	-	-	-	116	100												80	6,4	512

Исполнитель Д.С. Лопатин Р.В. Ровкин тел. (3812) 37-76-79

Таблица 4. Карточка лесопаталогической таксации, квартал 141

Филиал ФГУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Новосибирской области» (организация, проводившая работу)  
 Омская область (субъект Российской Федерации)

**Карточка лесопаталогической таксации**

Лесничество (лесопарк) Называевское

Дата проведения 21.07.09г. 53° 55' 13"  
91° 23' 19"

Участковое лесничество Называевское САР

Квартал 141 Выдел 92,93,95-101,104-106,108,111,112

Площадь  $0,2+1,0+0,6+0,7+3,0+0,2+8,6+1,0+0,9+1,7+3,5+1,0+2,6+0,2+0,3=25,5$  га  
 Состав 10Б Возраст 55 Полнота 0,3 Бонитет 5 Тип леса 0с Запас на 1 га 30

Причины ослабления насаждений 831

Состав	коэффициент	порода	Ярус	Класс Крафта	Возраст породы, лет	Распределение деревьев по категориям состояния, % от запаса											Признаки повреждения насаждений (код)						Рекомендуемые санитарно-оздоровительные мероприятия								
						Количество учтенных деревьев, шт.	без признаков ослабления	ослабленные	слабым ослабленные	усыхающие	свежий сухой	старый сухой	свежий ветровал	старый ветровал	свежий бурелом	старый бурелом	признак 1	признак 2	признак 3	признак 4	признак 5	признак 6	вид	площадь, га	запас, м <sup>3</sup>						
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
2	б	1	3	55	100	-	-	-	-	50	50	-	-	-	-	114	100												30	25,8	765

Исполнитель Ровкин Н.В. Р.В. Ровкин тел. (3812) 37-76-79

Таблица 5. Карточка лесопаталогической таксации, квартал 144

Филиал ФГУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Новосибирской области» (организация, проводившая работу)  
 Омская область (субъект Российской Федерации)

**Карточка лесопаталогической таксации**

Лесничество (лесопарк) Называевское Дата проведения 21.07.09г.  $55^{\circ}33,488'$   
 $71^{\circ}19,037'$

Участковое лесничество Называевское ГАП

Квартал 144 Выдел 8-11, 13, 21, 31, 39

Площадь  $0,3+0,4+0,5+0,2+1,8+0,5+0,5+0,5=4,7\text{га}$

Состав  Возраст  Полнота  Бонитет  Тип леса  Запас на 1 га

Причины ослабления насаждений

Состав	коэффициент	порода	Ярус	Класс Крафта	Возраст породы, лет	Количество учетных деревьев, шт.	Распределение деревьев по категориям состояния, % от запаса										Признаки повреждения насаждений (код)						Рекомендуемые санитарно-оздоровительные мероприятия							
							без признаков ослабления	ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	свежий сухой	старый сухой	свежий ветровал	старый ветровал	свежий бурелом	старый бурелом	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	вид	площадь, га	запас, м <sup>3</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
10	5	1	3	55	100	-	-	-	-	50	50	-	-	-	-	114	100											48	47	147

Исполнитель Ровкин Н.В. ГАП тел. (3812) 37-76-79

Таблица 6. Карточка лесопаталогической таксации, квартал 1

Филиал ФГУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Новосибирской области» (организация, проводившая работу)  
 Омская область (субъект Российской Федерации)

**Карточка лесопаталогической таксации**

Лесничество (лесопарк) Называевское Дата проведения 22.07.09г.  $55^{\circ}48,815'$   
 $70^{\circ}43,041'$

Участковое лесничество Называевское ГАП

Квартал 1 Выдел 38, 41, 42, 49, 46

Площадь  $2,1+1,0+0,1+0,6+3,1=7,9\text{га}$

Состав  Возраст  Полнота  Бонитет  Тип леса  Запас на 1 га

Причины ослабления насаждений

Состав	коэффициент	порода	Ярус	Класс Крафта	Возраст породы, лет	Количество учетных деревьев, шт.	Распределение деревьев по категориям состояния, % от запаса										Признаки повреждения насаждений (код)						Рекомендуемые санитарно-оздоровительные мероприятия							
							без признаков ослабления	ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	свежий сухой	старый сухой	свежий ветровал	старый ветровал	свежий бурелом	старый бурелом	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	код	% деревьев с наличием признака от числа стволов	вид	площадь, га	запас, м <sup>3</sup>			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
10	5	1	3	60	100	-	-	-	-	40	50	-	-	-	-	114	100											07	7,9	555

Исполнитель Ровкин Н.В. ГАП тел. (3812) 37-76-79



10. «Усыхание» — 20%, «свежий сухостой» — 60%, «старый сухостой» — 20% по кварталу 129 (выделы 3–5, 9, 10), по кварталу 54 (выделы 29, 30, 32),

11. «Сильно ослабленные»<sup>9</sup> — 10%, «усыхание» — 30%, «свежий сухостой» — 40%, «старый сухостой» — 20% по кварталу 88 (выделы 5, 6, 10, 12, 13, 20–23, 33–35, 42, 44, 49), по кварталу 89 (выделы 2, 3, 14–17, 26, 34–36, 38, 30), по кварталу 127 (выделы 103–105, 107, 111, 112, 114–116, 127–138).

12. «Ослабленные»<sup>10</sup> — 20%, «сильно ослабленные» — 20%, «усыхание» — 10%, «свежий сухостой» — 30%, «старый сухостой» — 20% по кварталу 50 (выдел 43).

13. «Усыхание» — 10%, «свежий сухостой» — 80%, «старый сухостой» — 10% по кварталу 129 (выделы 1,2).

14. «Сильно ослабленные» — 30%, «усыхание» — 50%, «свежий сухостой» — 20% (**начальная стадия среднего уровня деградации леса**) по кварталу 129 (выдел 51).

Причина вымокания Называевских лесов не установлена.

### 3. Стадии вымокания мелколиственных лесов

Вымокание леса можно характеризовать не только посредством *трёх уровней деградации*, но и с помощью указания *стадий вымокания*.

В исследованиях А.В. Абросимова и И.В. Шиловой, проведенных в Западной Сибири в 2003–2005 гг., были выделены четыре стадии вымокания мелколиственных лесов [3].

**1-я стадия.** Практически здоровый лес. Леса на этой стадии мало чем отличаются от лесных массивов, не подверженных вымоканию. Древостой не нарушен, лишь в некоторых местах имеются признаки угнетения листвы деревьев и переувлажнения. Почва не имеет внешних признаков засоления. Травяная растительность представлена видами, характерными для берёзовых злаково-разнотравных лесов.

**2-я стадия.** Характеризуется частичным повреждением деревьев берёзы по вислой: около половины из них имеют листву с признаками угнетения и сухие вершины. Некоторые деревья полностью лишены листвы. В почвенном профиле в результате подъема грунтовых вод возникает осолоделый слой, что говорит о начале засоления почв. В травяном покрове появляются виды, характерные для влажных лесов и болотистых мест (например, лабазник вязолистный).

---

<sup>9</sup> *Дерево сильно ослабленное* — дерево со светло-зелёной или сероватой матовой хвоей и с листвой мельче или светлей обычного, его крона ажурная, прирост уменьшен более чем наполовину, по сравнению с нормальным, доля усохших ветвей от 25 до 50%. Возможно появление признаков повреждения ствола, корневых лап, ветвей, кроны, попытки поселения стволовых вредителей. У лиственных деревьев возможны сокочечение и развитие водяных побегов на стволе и ветвях [2].

<sup>10</sup> *Дерево ослабленное* — крона разрежённая; дерево с хвоей и листвой светлее обычного, прирост уменьшен, но не более, чем наполовину, по сравнению с нормальным; усохших ветвей менее 25%, возможны признаки местного повреждения ствола и корневых лап и ветвей. У лиственных деревьев возможно появление водяных побегов на стволе и ветвях [2].



**3-я стадия.** Деревья полностью лишены листвы. Имеются признаки разрушения древесины, о чем свидетельствуют упавшие стволы деревьев. Проявляются признаки заболачивания. В травяном покрове преобладают виды, характерные для влажных лугов и болот (например, осока береговая). Идут процессы засоления почв, в результате чего в почве появляется осолоделый слой (А2) мощностью 15–20 см, имеющий характерную белёсую окраску.

**4-я стадия.** Происходит замена одной экосистемы на другую. Характеризуется полным исчезновением древесной растительности. Травяной покров составляют виды, характерные для болот (осока береговая, рогоз, тростник). Слой солоди в почвенном профиле достигает мощности 30–35 см. На месте леса возникают заболоченные территории.

#### 4. Теоретико-катастрофическая модель вымокания осиново-берёзовых колков

Потенциал четырёхъярусного леса совпадает с так называемой катастрофой Тома, именуемой «бабочка», и имеет вид [4]

$$V(x, k, m, a, w) = \frac{\alpha}{6}(x - x_0)^6 + k(x - x_0)^4 + mx^3 + a(x - x_0)^2 + w(x - x_0),$$

где  $x$  — продуктивность фитомассы,  $k < 0$  — наличие конкуренции,  $m > 0$  — мозаичность леса,  $a < 0$  — антропогенный фактор,  $w < 0$  — недостаток влаги в почве.

Первый член  $\alpha(x - x_0)^6/6$  ( $\alpha > 0$ ) определяется наличием только четырёх ярусов леса. Учёт каждого нового яруса увеличивает показатель степени  $x$  на единицу. Коэффициент  $\alpha = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4$ , где  $\alpha_j$  — доля фитомассы  $j$ -го яруса в фитомассе всего леса.

Берём

$$k = -c_k(CI - CI_0), \quad m = c_m \left( \frac{s^2}{\mu} - 1 \right),$$

$$a = -c_a(\text{УАН} - \text{УАН}_0), \quad w = c_w(W - W_0),$$

где  $CI$  — индекс конкуренции [5];  $s^2/\mu$  — коэффициент дисперсии, являющийся показателем равномерности распределения деревьев в пространстве; если  $s^2/\mu$  близко к нулю, то распределение регулярное, к единице — случайное, а чем больше единицы, тем контагиознее (пятнистее), т.е. мозаичнее;  $\text{УАН}$  — уровень антропогенной нагрузки на район, равный отношению степени антропогенного воздействия к биоклиматическому потенциалу [6];  $W$  — влажность почвы;  $c_k, c_m, c_a, c_w$  — постоянные коэффициенты.

Величины  $CI_0, \text{УАН}_0, W_0$  — это критические значения факторов, обозначающие границы экологической устойчивости фитоценоза (либо, в зависимости от решаемой задачи, их характерные значения). Через  $x_0$  обозначим характерную для изучаемого типа леса продукцию фитомассы.

Называется район относится к лесостепной зоне Омской области. Для него  $14 < \text{УАН} < 21$  [6]. Возьмём  $\text{УАН}_0 = 21$  и предположим, что близко к  $\text{УАН}_0$ , точнее, пусть  $\text{УАН} = \text{УАН}_0 - 0,02$ .

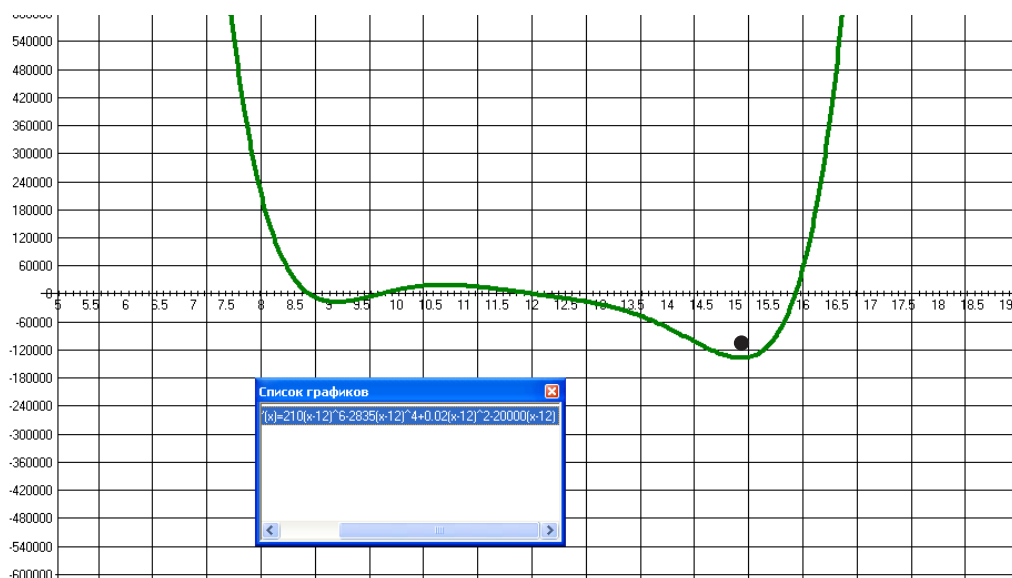


Рис. 1. 1-я стадия вымокания. Практически здоровый лес. Леса на этой стадии мало чем отличаются от лесных массивов, не подверженных вымоканию. Древостой не нарушен, лишь в некоторых местах имеются признаки угнетения листьев деревьев и переувлажнения.

$$W = W_0 - 10\%. \text{ Продукция } x = 15,0 \text{ т/га за год}$$

По данным Управления лесного хозяйства, как правило, в Омской области в Называевском районе леса I, II класса бонитета (квартал 1 (выд. 5, 27 и др.), квартал 10 (выд. 74, 79 и др.) и т.д.). В основном наблюдаются берёзово-осиновые колки.

Согласно [7] для пятидесяти- девятистолетних модальных берёзовых и осиновых насаждений Омской области для I, II класса бонитета  $12 \text{ т/га} < x < 15 \text{ т/га}$  за год. Кроме первого яруса, лесоводы отмечают подрост. Типы лесов: разнотравные, костяничниковые, вейниковые, ивовые, осоковые, костянично-вейниковые, сфагновые, багульниково-сфагновые.

Поэтому берём (для определённости)  $\alpha = 90 \cdot 7 \cdot 1 \cdot 2 = 1260$  и принимаем:  $CI_0 = 0,5$  (слабое давление, [5]), и  $x_0 = 12$ . Далее, берём  $CI = 6,5$  (берёза, [5]),  $s^2/\mu = 1$  (случайное распределение деревьев).

Таким образом, мы зафиксировали все факторы, кроме влажности. Моделируем процесс вымокания леса, меняя влажность  $W$  от значения  $W_0 - 10\%$  до  $W_0 + 60\%$ . Можно принять, что  $W_0 = 35\%$  [8], хотя качественная картина вымокания леса в нашей модели не зависит от конкретного значения величины  $W_0$ .

Компьютерные эксперименты показали, что можно принять следующие значения для коэффициентов:

$$c_k = 472,5; \quad c_m = 1; \quad c_a = 1; \quad c_w = 2 \cdot 10^3$$

(каждый в соответствующих единицах измерения).

В результате имеем потенциал состояния леса «перед вымоканием»:

$$V_0(x) = 210(x - 12)^6 - 2835(x - 12)^4 + 0,02(x - 12)^2 + 2 \cdot 10^3(W - W_0)(x - 12).$$

## 5. Компьютерные эксперименты

Результат компьютерных экспериментов представлен в виде графиков потенциала леса на рис. 1–6.

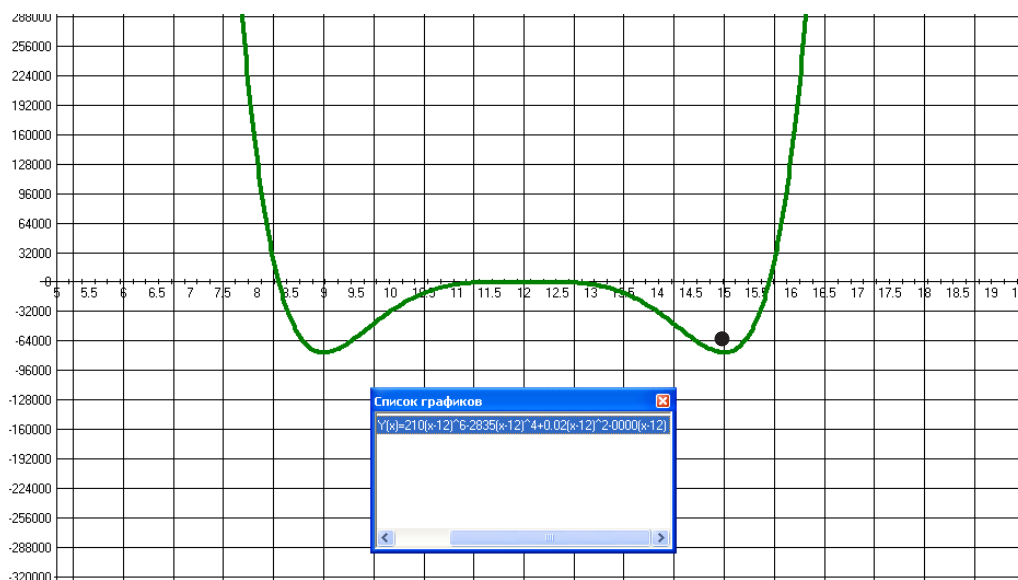


Рис. 2. 2-я стадия вымокания. Кризис. Частичное повреждение деревьев берёзы повислой: около половины из них имеют листву с признаками угнетения и сухие вершины. Некоторые деревья полностью лишены листвы.  $W = W_0$ . Продукция  $x = 15,0$  т/га за год

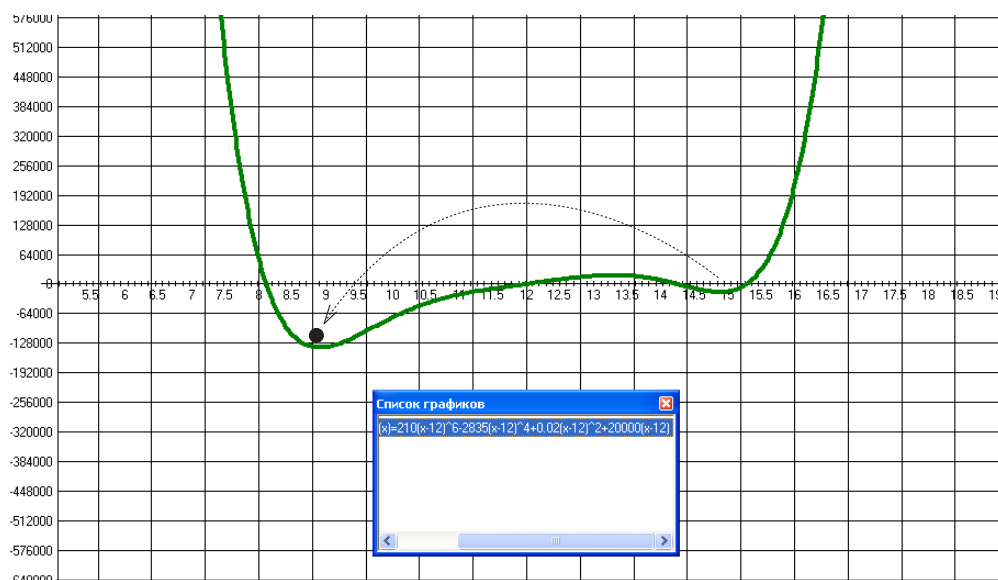


Рис. 3. 3-я стадия вымокания. Деревья полностью лишены листвы. Имеются признаки разрушения древесины. Проявляются признаки заболачивания.  $W = W_0 + 10\%$ . Продукция  $x = 8,9$  т/га за год. Наблюдаем экологическую катастрофу со скачкообразным ухудшением продуктивности леса

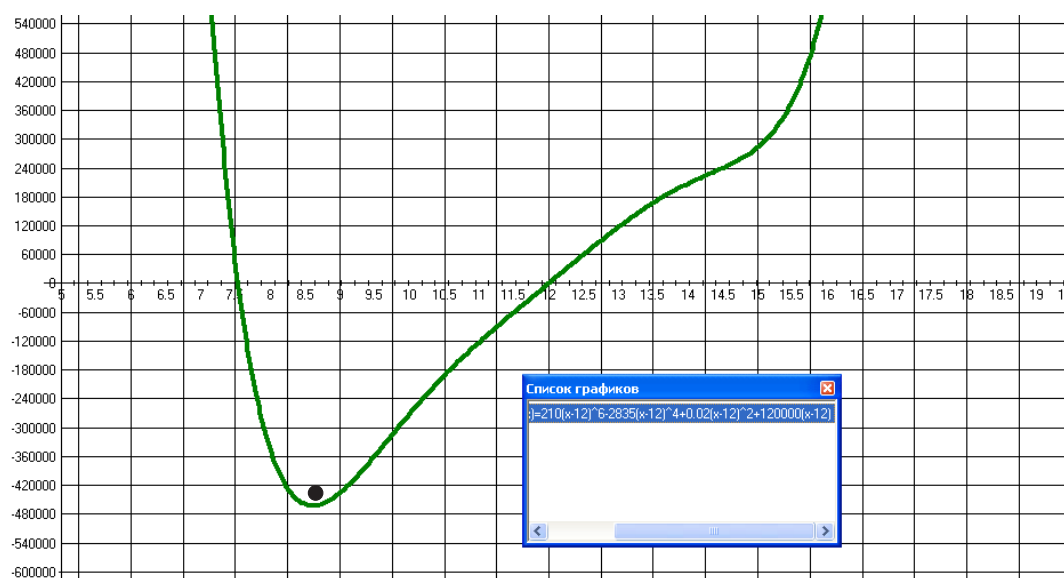


Рис. 4. Начало 4-й стадии вымокания, 2-й уровень деградации. Катастрофа. Происходит замена одной экосистемы на другую. Исчезает древесная растительность. Идёт постепенное заболачивание территории.  $W = W_0 + 60\%$ . Продукция  $x = 8,5$  т/га за год. Переход к 3-ему уровню деградации

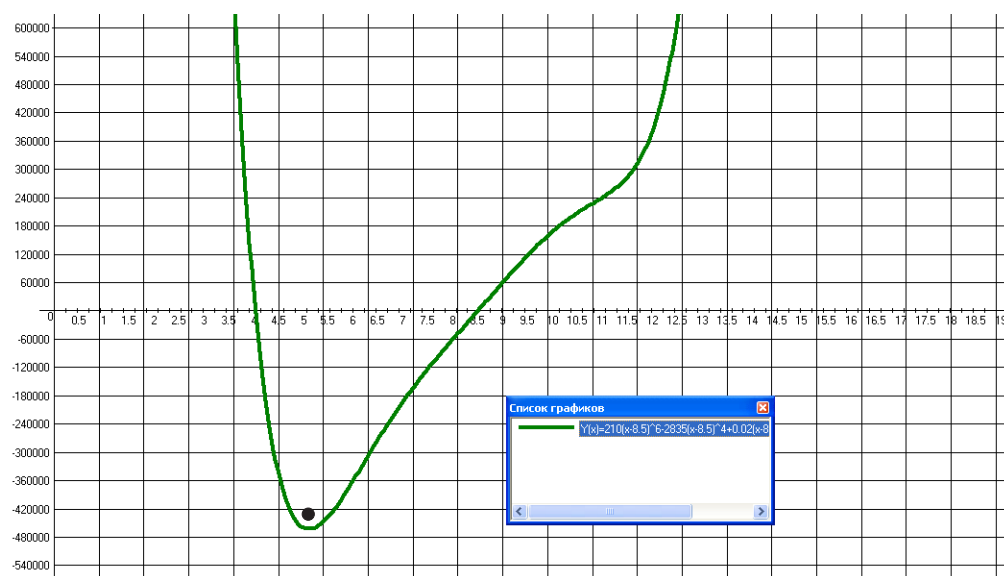


Рис. 5. Развитие 4-й стадии вымокания.  $W = W_0 + 60\%$ . Продукция  $x = 5$  т/га за год

На рис. 4 показано начало 4-й стадии вымокания. С этого момента следует уточнить вид потенциала леса, поскольку на 4-й стадии это лес, стоящий в болоте, с новой устойчивой продуктивностью 8,5 т/га за год.

Поэтому берём

$$V(x) = 210(x - 8,5)^6 - 2835(x - 8,5)^4 + 0,02(x - 8,5)^2 + 2 \cdot 10^3(W - W_0)(x - 8,5). \quad (1)$$

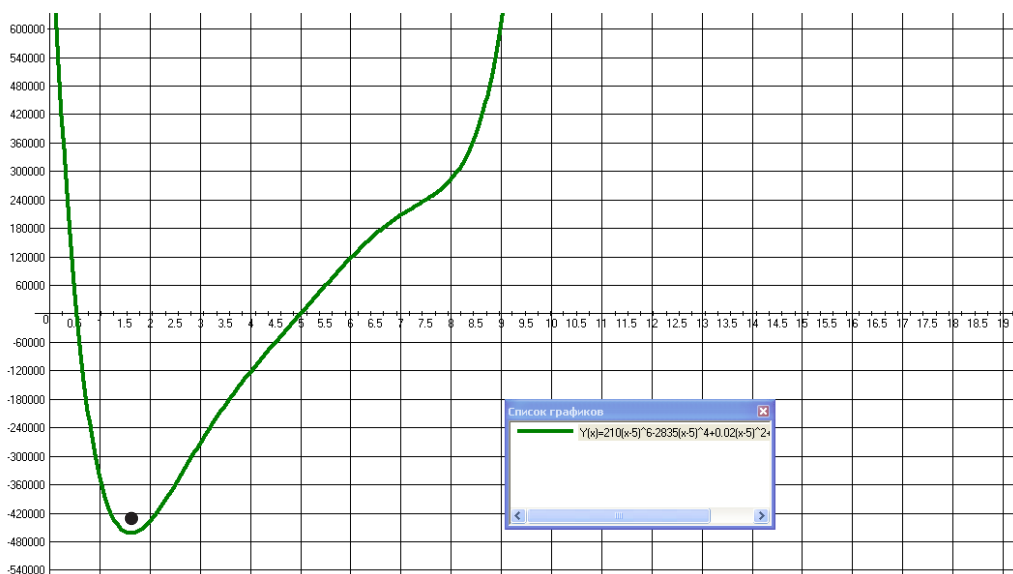


Рис. 6. Конец 4-й стадии вымокания. Полное исчезновение древесной растительности. Травяной покров составляют виды, характерные для болот (осока береговая, рогоз, тростник). Слой солоды в почвенном профиле достигает мощности 30–35 см. На месте леса возникают заболоченные территории.  $W = W_0 + 60\%$ . Продукция  $x = 1,5$  т/га за год

Имеем развитие 4-й стадии. Продуктивность падает до 5 т/га за год (рис. 5).  
Новое уточнение потенциала

$$V(x) = 210(x - 5)^6 - 2835(x - 5)^4 + 0,02(x - 5)^2 + 2 \cdot 10^3(W - W_0)(x - 5). \quad (2)$$

даёт продуктивность 1,5 т/га за год (рис. 6). Другими словами, имеем лес с погибающей древесной растительностью. Это уже полная деградация леса.

## 6. Устойчивость текущего состояния конкретного берёзового леса

Имея теперь для берёзовых насаждений константы  $c_k, c_m, c_a, c_w$ , мы можем выписать потенциал

$$V_0(x) = 210(x - 12)^6 - 2835(x - 12)^4 + 0,02(x - 12)^2 + 2 \cdot 10^3(W - W_0)(x - 12)$$

и использовать его для проверки устойчивости текущего состояния конкретного берёзового леса, как показано ниже.

- Если жирная точка находилась на дне «ямки» (устойчивое равновесие), но рядом появляется другая, более глубокая (рис. 1, 2), то жди экологического кризиса или катастрофы (рис. 3).

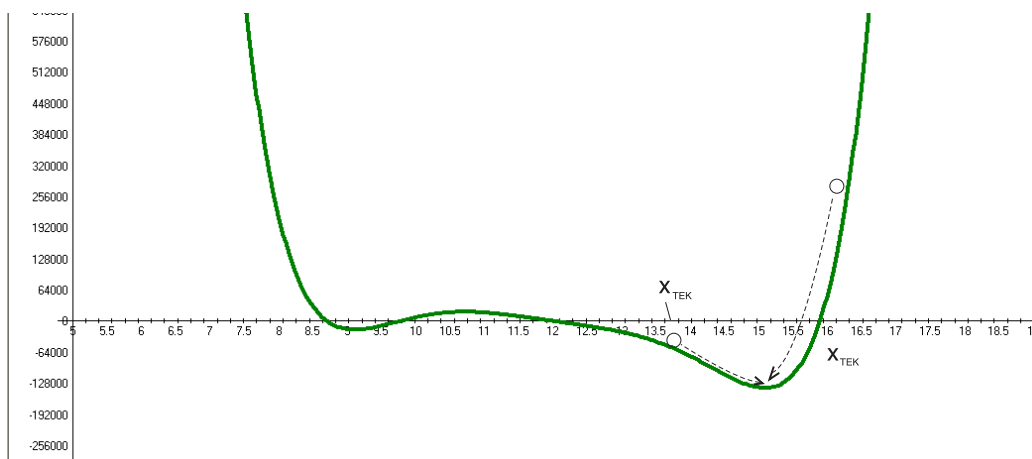


Рис. 7. Переход к устойчивому равновесию  $x = 15,0$  т/га за год из неустойчивых состояний в динамике развития леса ( $W = W_0 - 10\%$ )

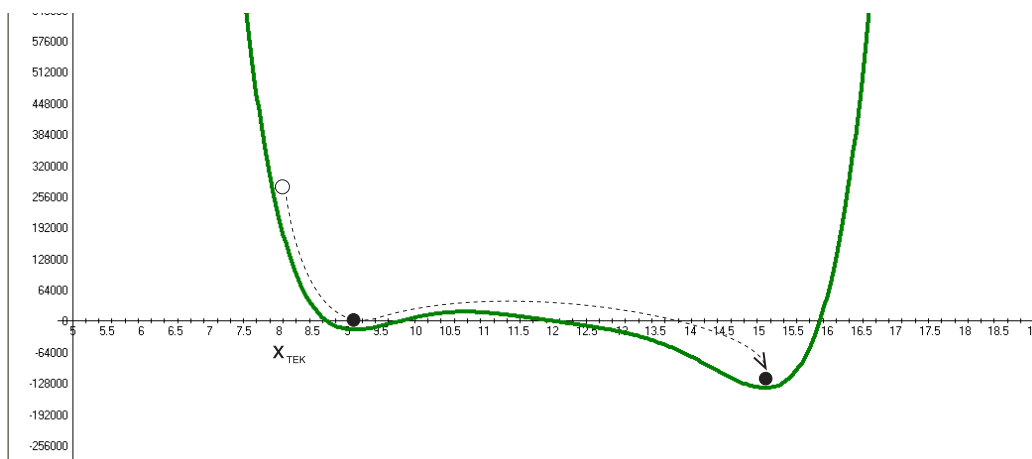


Рис. 8. Переход к устойчивому равновесию  $x = 15,0$  т/га за год из неустойчивых состояний в динамике развития леса ( $W = W_0 - 10\%$ )

- Если «кружок», т.е. лес в текущем состоянии и с продукцией фитомассы  $x_{\text{ТЕК}}$  находится в «ямке», но не на дне (рис. 7), то это неустойчивое состояние, которое не продлится долго; со временем «кружок» скатится на дно ямки. Это нормальная ситуация в динамике развития леса — переход к устойчивому равновесию (состоянию).
- Если «кружок», т.е. лес в текущем состоянии и с продуктивностью  $x_{\text{ТЕК}}$  находится в левой, менее глубокой «ямке» (рис. 8), то это неустойчивое состояние (равновесие), которое не продлится долго; со временем «кружок» скатится в силу правила Максвелла на дно правой, более глубокой ямки. Это нормальная ситуация в динамике развития леса. Но в случае правила максимального промедления «кружок» скатится на дно левой, менее глубокой ямки.

## Заключение

Предложенная модель, как видно из изложенного выше, достаточно адекватно отражает стадии вымокания леса и его деградацию, выражающуюся в падении продуктивности фитомассы. Найденные потенциалы легко можно использовать для проверки устойчивости текущего состояния конкретного берёзового (берёзово-осинового) леса и для прогнозирования его будущего состояния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Перепечина Ю.И. Влияние периодического увлажнения на состояние лесов Курганской области «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития». IX Международная научно-техническая конференция. Брянск : БГИТА, 2009. URL: [http://science-bsea.bgita.ru/2009/les\\_komp\\_2009/perepetchina\\_v1.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2009/les_komp_2009/perepetchina_v1.htm)
2. Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга. Приложение 1 к приказу Рослесхоза от 29.12.2007 N. 523.
3. Черепанов А.С. Технология выявления медленных изменений в лесах по мультиспектральным космическим снимкам (на примере вымокания лесов) // Геоматика. 2009. N. 3. С. 66-75.
4. Володченкова Л.А., Гуц А.К. Катастрофы типа «бабочка» в лесных экосистемах // Математические структуры и моделирование. 2009. Вып. 19. С. 48-68
5. Вайс А.А. Влияние конкуренции на размеры деревьев в условиях средней Сибири // VIII Международная научно-техническая конференция «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития» 1–30 ноября 2007 г. Брянск: БГИТА, 2008. URL: [http://science-bsea.narod.ru/2007/leskomp\\_2007/vais\\_v1.htm](http://science-bsea.narod.ru/2007/leskomp_2007/vais_v1.htm).
6. Большаник П.В., Игенбаева Н.О. Эколого-ландшафтное районирование Омского Прииртышья // География, природные ресурсы. 2006. N. 3. С. 37-41.
7. Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С., Булуй Ю. Модели и таблицы биологической продуктивности // Леса и лесное хозяйство России. Данные и анализ. URL: [http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest\\_cdrom/home\\_ru.html](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/home_ru.html).
8. Гридасов В.Ф., Астафьева Ю.В. Автоматизированная технология контроля данных влажности почвы // Информационный сборник № 34 Гидрометцентра России. Результаты испытания новых и совершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. URL: <http://hmc.hydromet.ru/methods/publ/sb34/gridasov.rtf>.