



ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Борис М. Кумицкий¹ ✉, boris-kum@mail.ru, 0000-0001-8135-8431

Наталья Ю. Евсикова², evsikovany_phlt@vgtu.ru, 0000-0001-5288-0140

Светлана Г. Тульская¹, tcdtnkyf2014@yandex.ru, 0000-0003-4822-4938

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Дестабилизация устойчивого состояния лесов и связанное с ней ухудшение санитарного климата, в основном, связаны с их заболеваниями. Одной из главных задач лесопатологического мониторинга является обнаружение очагов заболевания древостоев и борьба с их распространением. В настоящей работе предложено математическое описание процессов распространения и ликвидации инфекционных заболеваний лесных насаждений с использованием дифференциальной модели SIR (Susceptible, Infected, Recovered), основные положения которой являются базовыми при интерпретации различного рода инфекционных болезней, зачастую принимающих форму эпидемий. В предположении постоянства суммарного числа здоровых инфицированных субъектов в процессе распространения заболевания и прямо пропорциональной зависимости скорости заражения от числа инфицируемых полученные результаты свидетельствуют о том, что: а) если в начальный момент времени число зараженных индивидов не превышает некоторого детерминированного значения, то растения с течением времени не инфицируются; б) если это число больше некоторого фиксированного значения, то восприимчивая к заболеванию часть особей будет заражаться. Показано, что, несмотря на абстрактный характер и невозможность вероятностной интерпретации обнаружения очагов заболевания в силу своей детерминированности, предлагаемая дифференциальная модель может быть эффективна в решении проблем распространения, локализации и прогнозирования заболеваний древостоев и использована практически для любой закрытой биолого-экологической системы.

Ключевые слова: дифференциальная модель, инфекционные заболевания, лесные насаждения.


Благодарности: Авторы статьи благодарят доктора технических наук, профессора кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова Михаила Валентиновича Драпалюка за проявленный интерес к теме исследования и аспиранта кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ВГТУ Егора Сергеевича Аралова за помощь в оформлении работы.


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Кумицкий, Б. М. Дифференциальное моделирование процессов распространения и ликвидации инфекционных заболеваний лесных насаждений / Б. М. Кумицкий, Н. Ю. Евсикова, С. Г. Тульская // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 5–15. – Библиогр.: с. 12–15 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/1>.

Поступила: 10.11.2021 **Принята к публикации:** 24.12.2021 **Опубликована онлайн:** 30.12.2021

DIFFERENTIAL MODELING OF THE PROCESSES OF SPREADING AND ELIMINATION OF INFECTIOUS DISEASES OF FOREST PLANTATIONS

Boris M. Kumitskiy¹, boris-kum@mail.ru,  0000-0001-8135-8431

Natalia Yu. Evsikova², evsikovany_phlt@vgtu.ru,  0000-0001-5288-0140

Svetlana G. Tulskeya¹, tcdtnkfyf2014@yandex.ru,  0000-0003-4822-4938

¹ Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

Abstract

The destabilization of the sustainable state of forests and the associated deterioration of the sanitary climate are mainly associated with their diseases. One of the main tasks of forest pathology monitoring is the detection of foci of disease of stands and the fight against their spread. In this paper, we propose a mathematical description of the processes of the spread and elimination of infectious diseases of forest plantations using the deterministic SIR (Susceptible, Infected, Recovered) model, the main provisions of which are basic in the interpretation of various kinds of infectious diseases, often taking the form of epidemics. Assuming the constancy of the total number of healthy infected subjects during the spread of the disease and the direct proportional dependence of the infection rate on the number of infected, the results obtained indicate that: a) if at the initial moment of time the number of infected individuals does not exceed a certain deterministic value, then plants do not become infected over time; b) in cases if this number is greater than a fixed value, then the part of individuals susceptible to the disease will become infected. It is shown that despite the abstract nature and the impossibility of probabilistic interpretation of the detection of foci of the disease, the proposed differential model can be effective in solving the problems of the spread, localization and prediction of tree diseases and is used, practically, for any closed biological and ecological system.

Keywords: differential model, infectious diseases, forest plantations.

Acknowledgments: The authors of the article thank Mikhail Valentinovich Drapalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design at G.F. Morozov VSTU, for his interest in the proposed study and Egor Sergeevich Aralov, senior lecturer at the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business at VSTU, for his help in the design of the work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kumitskiy B.M., Evsikova N.Yu., Tulskeya S.G. (2021) Differential modeling of the processes of spreading and elimination of infectious diseases of forest plantations. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 5-15 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/1>.

Received: 10.11.2021 **Revised:** 02.12.2021 **Accepted:** 24.12.2021 **Published online:** 30.12.2021

Введение

Известно, что одно из главных богатств страны – лес – не только является легкими нашей планеты, но и служит фундаментальной составляющей продовольственной безопасности, играет важную роль в улучшении комфортности проживания человечества, а также в решении проблемы смягчения последствий изменения климата.

Наблюдаемая в последнее время повсеместная интенсификация лесоразработок сопровождается экологическими проблемами. Одной из них является дестабилизация лесных экологических систем, приводящая к потере биологической устойчивости лесных насаждений [1-3].

К данному моменту на государственном уровне перед лесными организациями нашей страны поставлена задача повышения устойчивости существования лесных насаждений. Основную роль в решении данной проблемы должна осуществлять лесозащита, особенно лесная энтомология [3, 5]. Развитию данного направления в России способствовали труды Г.Ф. Морозова (1867-1920), идеи которого направлены на необходимость изучения болезней лесонасаждений, так как массовые поражения древостоев ведут к нарушению биоценозов [4, 16, 18, 21]. К существующим лесозащитным мероприятиям относятся комплексное применение мониторинга, карантина растений, а также биологического, химического, биофизического и механического методов [8, 12, 17]. Перечисленные мероприятия направлены на сохранение леса как экосистемы и на его защиту от болезней и вредителей.

Для защиты растений непрерывно расширяется производство микробиологических и противовирусных препаратов.

В качестве объекта лесопатологического мониторинга могут служить опасные болезни лесонасаждений, развивающиеся на больших площадях и наносящие лесу существенный урон. Инфекционные (паразитарные) болезни возникают в результате «поселений» болезнетворных организмов на так называемых растениях-хозяевах и получающих от них питание. Далее инфекции легко передаются от заболевших растений к здоровым и поэтому имеют широкое распространение в природе [19, 20]. Среди

такого рода распространяющихся инфекций на древостоях 90 % принадлежит грибковым заболеваниям [4, 16].

Изучение механизмов возникновения, развития и распространения инфекционных заболеваний является одним из методов борьбы с ними.

Кроме профилактических мер, разработок, поисков новых лекарственных препаратов и биологических добавок, на борьбу с массовыми заболеваниями растений привлекаются физико-математические методы, позволяющие прогнозировать распространение и локализацию эпидемии [6, 8, 9, 11]. Так, в работе [14] показана эффективность использования математического описания эволюции инфекционных болезней среди полевых растений, различных дифференциальных моделей с привлечением компьютерных исследований.

Однако, несмотря на достаточно сложный математический аппарат, применяемый в представленных моделях, большинство из них носит характер абстракции и слабо связано с реальными моделируемыми объектами. Сведения о моделях, имитирующих развитие инфекционных заболеваний среды древесных насаждений, практически отсутствуют.

Объекты и методы

Целью настоящей работы является применение дифференциальной модели SIR для описания динамики распространения и ликвидации инфекционных заболеваний среди лесных насаждений. Авторами модели SIR являются W.O. Kermack и A.G. McKendrick, которые впервые применили ее для описания эпидемий среди населения в 1927 году [15]. Привлечение данной модели обусловлено универсальностью, позволяющей использовать её и в описании образовательного процесса [7], и при моделировании динамики смены поколений инновационных технологий [11].

Кроме того, достоинством моделей типа SIR, в основе которых лежит аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, является возможность проведения анализа решений. Рассмотрим данную модель применительно к распространению инфекции среди лесных насаждений. Для этого будем иметь в виду [9], что процесс возникновения и развития инфекции возможен только при существ-

вовании трех условий: наличия возбудителя болезни, восприимчивости растений и комфортной для развития болезни окружающей среды.

В этой связи экосистему в виде ограниченного лесного массива [14] представим состоящей из трех групп насаждений, каждая из которых с течением времени заболевания изменяет свою численность: $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$.

Здесь $S(t)$ – восприимчивая, но ещё не инфицированная группа растений, достаточно слабоустойчивая и легко заражающаяся.

В группу $I(t)$ входят древостои, являющиеся зараженными и носителями какой-либо инфекции. Считаем, что началом развития заболевания является момент появления первых симптомов на растении.

Наконец, третья группа насаждений, численность которой в момент времени t равна $R(t)$, содержит в себе абсолютно здоровые древостои. Следует заметить, что к группе $R(t)$ относятся и растения, выздоровевшие после болезни, хотя практика показывает, что их число небольшое [4]. Выздоровление растений может произойти из-за внезапных изменений условий жизнедеятельности возбудителя заболевания (патогена), а также жизнедеятельности растений (питания) и своевременного проведения оздоровительных мер.

Считается, что в период массового заболевания растений общее число особей в массиве леса остается постоянным (отсутствие гибели растений), т.е.

$$S(t) + I(t) + R(t) = N. \quad (1)$$

Предположим прямо пропорциональную зависимость скорости изменения числа восприимчивых к заболеванию растений от количества самих восприимчивых индивидов при условии, когда численное значение инфицированных из группы $I(t)$ превышает некоторое фиксированное количество I^* , т.е. когда $I(t) > I^*$. При этом скорость изменения числа зараженных, но уже выздоравливающих особей будем считать пропорциональной числу инфицированных деревьев. Далее считаем, что при $I(t) > I^*$ зараженные особи способны инфицировать восприимчивых к заболеванию растений из окружения $S(t)$. Последнее утверждение содержит в

себе факт содержания на карантине или в удалении от восприимчивых к болезни растений [3, 4].

Все сказанное можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dS}{dt} = \begin{cases} -\alpha S, & \text{если } I(t) > I^* \\ 0, & \text{если } I(t) \leq I^* \end{cases}. \quad (2)$$

Так как каждое восприимчивое к болезни растение, заражаясь, само становится носителем инфекции, то скорость образования числа инфицированных особей равна разности в единицу времени между выздоравливающими и вновь заболевшими субъектами [11]

$$\frac{dI}{dt} = \begin{cases} \alpha S - \beta I, & \text{при } I(t) > I^* \\ -\beta I, & \text{при } I(t) \leq I^* \end{cases}. \quad (3)$$

Входящие в систему уравнений (3) постоянные α и β будем называть коэффициентами заболевания и выздоровления соответственно, как это было сделано в работе [15], а их отношение $\alpha/\beta = R_0$ – базовым коэффициентом воспроизведения. Для реализации излагаемой математической модели необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{dR}{dt} = \beta I. \quad (4)$$

Однозначное решение уравнений (1)–(4) получим при начальных условиях в предположении, что в момент времени $t = 0$ выбранный для исследования массив заселяют только древостои без иммунитета к инфекции [1], т.е. $R(0) = 0$, а количество инфицированных равно $I(0)$. Далее в предположении равенства коэффициентов α и β ($\alpha = \beta$) рассмотрим два случая развития сценария заболевания.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим случай $I(0) \leq I^*$, когда с течением времени лесные насаждения не будут подвержены инфицированию, потому что при этом $dS/dt = 0$. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$S(t) = S(0) = N - I(0). \quad (5)$$

Это соответствует ситуации, когда достаточное количество зараженных растений оказывается в карантине (изоляции).

Для этого случая из уравнений (3) следует

$$\frac{dI}{dt} = -\alpha I, \quad (6)$$

$$I(t) = I(0)e^{-\alpha t}. \quad (7)$$

С учетом (7) уравнение (1) позволяет найти зависимость от времени эпидемии не подверженной заболеванию группы растений $R(t)$

$$R(t) = N - S(t) - I(t) = I(0)[1 - e^{-\alpha t}]. \quad (8)$$

Изменение с течением времени каждой из трех групп, составляющих N насаждений лесного массива в соответствии с уравнениями (5), (7) и (8), показано на рис. 1.

Из рисунка видно, что наблюдается процесс локализации распространения инфекции при неизменном количестве восприимчивых особей.

Для случая, когда $I(0) > I^*$, должен существовать промежуток времени $0 \leq t < \tau$, для которого справедливо неравенство $I(t) > I^*$ в предположении непрерывности функции $I(t)$. Это означает, что для всего временного промежутка $[0, \tau)$ инфекция будет распространяться за счет заражения группы восприимчивых растений в соответствии с уравнением (2), решение которого для всех t из промежутка $0 \leq t < \tau$ представляет собой зависимость

$$S(t) = S(0)e^{-\alpha t}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в уравнение (3) дает дифференциальное уравнение

$$\frac{dI}{dt} + \alpha I = \alpha S(0)e^{-\alpha t}, \quad (10)$$

для решения которого умножим обе части его на $e^{\alpha t}$. Получим $d/dt(Ie^{\alpha t}) = \alpha S(0)$, откуда

$$Ie^{\alpha t} = \alpha S(0)t + c,$$

а множество всех решений уравнения (10) запишется в виде

$$I(t) = ce^{-\alpha t} + \alpha S(0)te^{-\alpha t}. \quad (11)$$

При начальных условиях $t=0$ постоянная интегрирования $c = I(0)$, а соотношение (11) примет вид

$$I(t) = [I(0) + \alpha S(0)t]e^{-\alpha t} \quad (12)$$

для всех t из интервала $0 \leq t < \tau$. Как и в любой задаче о распространении инфекционных заболеваний, главными являются вопросы определения

момента времени t^* , при котором инфицирование восприимчивых к болезням растений прекращается, и значение t^* , когда наступает пик заболеваемости. Это означает, что при $t = \tau^*$ правая часть уравнения (12) становится равной I^* , т. е.

$$I^* = [I(0) + \alpha S(0)\tau^*]e^{-\alpha \tau^*}. \quad (13)$$

Считая, что число восприимчивых к болезни насаждений, избегающих заражения, соответствует зависимости

$$S(\tau^*) = \lim_{t \rightarrow \tau^*} S(t) = S(0)e^{-\alpha \tau^*}, \quad (14)$$

можно найти искомым момент времени τ^*

$$\tau^* = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{S(0)}{S(\tau^*)}. \quad (15)$$

Эта формула позволяет прогнозировать время окончания эпидемии, если будет известно число $S(\tau^*)$. В этом случае, используя (15), из условия (13) получим равенство

$$I^* = \left[I(0) + S(0) \ln \frac{S(0)}{S(\tau^*)} \right] \frac{S(\tau^*)}{S(0)},$$

или (16)

$$\frac{I^*}{S(\tau^*)} + \ln S(\tau^*) = \frac{I(0)}{S(0)} + \ln S(0).$$

Соотношение (16), по существу, представляет собой трансцендентное алгебраическое уравнение с одним неизвестным $S(\tau^*)$, которое решается графически.

Для определения момента времени максимума числа зараженных индивидов t^* исследуем (12) на экстремум:

$$\frac{dI}{dt} = [\alpha S(0) - \alpha I(0) - \alpha^2 S(0)t]e^{-\alpha t} = 0.$$

Откуда момент t^* , на который приходится пик эпидемии, определяется по формуле

$$t^* = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{I(0)}{S(0)} \right]. \quad (17)$$

Подставляя теперь значение (17) в уравнение (12), получим

$$I_{\max} = S(0) \exp \left[\frac{I(0)}{S(0)} - 1 \right] = S(t^*). \quad (18)$$

Последнее равенство означает, что в момент времени t^* число восприимчивых к заболеванию

растений (S) совпадает с числом зараженных древостоев.

Сравнение выражений (12) и (13) показывает, что при $t > t^*$ восприимчивая к заболеванию растительность уже не является заразной, при этом $I(t)$ становится равным

$$I(t) = I^* e^{-\alpha(t-t^*)}.$$

Каким образом с течением времени изменяется число представителей каждой из трех рассматриваемых групп растений, схематически представлено на рис. 2.

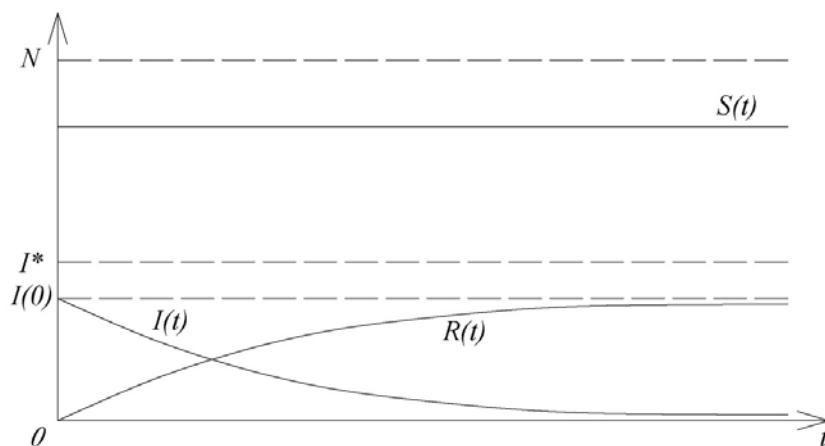


Рисунок 1. Изменение численности отдельных групп насаждений, составляющих лесной массив, в процессе развития эпидемии для случая, когда $I(0) \leq I^*$

Figure 1. The change in the number of individual groups of plantings that make up the forest area during the development of the epidemic for the case when $I(0) \leq I^*$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

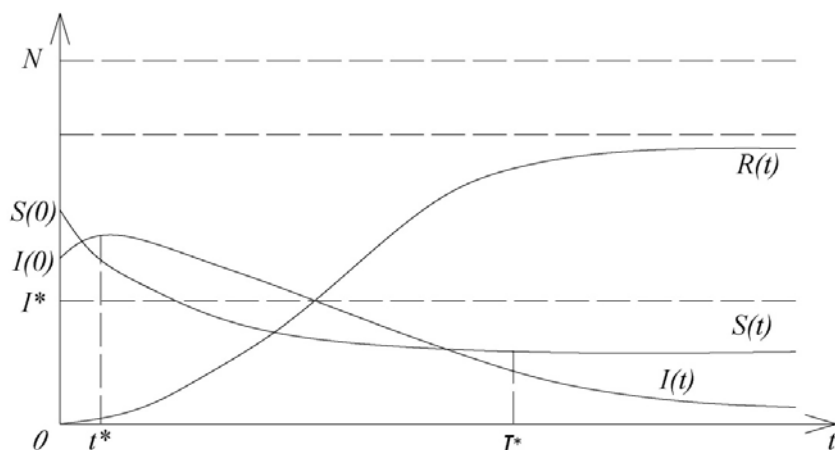


Рисунок 2. Схема изменения численности каждой из трех групп насаждений, составляющих лесной массив, в процессе развития эпидемии для случая $I(0) > I^*$:

t^* - время, соответствующее пику заболевания,

τ^* - момент времени окончания эпидемии

Figure 2. The scheme of changing the number of each of the three groups of plantings that make up the forest area during the development of the epidemic for the case of $I(0) > I^*$:

t^* - the time corresponding to the peak of the disease,

τ^* - the time of the end of the epidemic

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

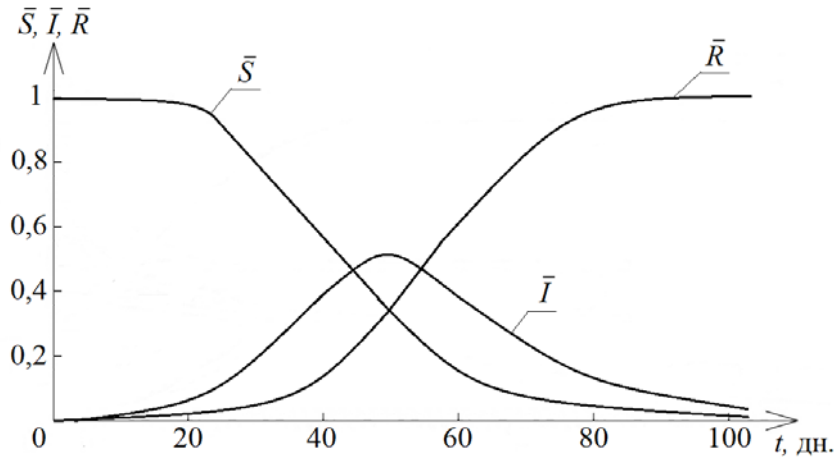


Рисунок 3. Временные зависимости безразмерных компонентов \bar{S} , \bar{I} , \bar{R} в соответствии с численными решениями (1) – (4) при $R_0 = 4$, $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,1$

Figure 3. Time dependences of dimensionless components \bar{S} , \bar{I} , \bar{R} in accordance with numerical solutions (1) – (4) at $R_0 = 4$, $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,1$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

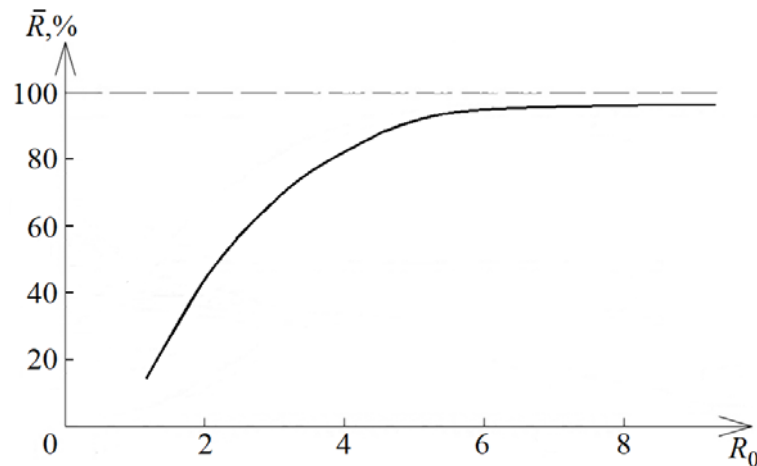


Рисунок 4. Процент переболевших к концу эпидемии лесных насаждений как функция $R_0 = \alpha / \beta$ при $\alpha = 0,1$ 1/д и начальных условиях $\bar{S}(0) = 1$, $\bar{R}(0) = 0$, $\bar{I}(0) = 10^{-6}$

Figure 4. The percentage of forest stands that had recovered by the end of the epidemic as a function of $R_0 = \alpha / \beta$ at $\alpha = 0,1$ 1/d and initial conditions $\bar{S}(0) = 1$, $\bar{R}(0) = 0$, $\bar{I}(0) = 10^{-6}$

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Видна картина развития и локализации заболевания при неизменной общей численности растений лесного массива в предположении единичного базового коэффициента воспроизведения.

Следует заметить, что представленные на рис. 1 и 2 графические зависимости являются след-

ствием решения системы уравнений (1) – (4) в предположении единичного базового коэффициента ($R_0 = \alpha / \beta = 1$). При этом параметры α и β , имеющие размерности 1/день (1/д), определяют скорости роста числа инфицированных $I(t)$ и выздоравливающих $R(t)$ особей.

Вариации начального числа $I(0)$ зараженных древостоев приводят к изменению времени достижения максимума массового поражения насаждений и окончания процесса распространения заболевания. Численное решение указанной системы уравнений при $\alpha = 0,4$ 1/д и $\beta = 0,1$ 1/д и начальных

$$\bar{S}(0) = \frac{S(0)}{N} = 1, \quad \bar{R}(0) = \frac{R(0)}{N} = 0,$$

$$\bar{I}(0) = \frac{I(0)}{N} = 10^{-6} \quad \text{представлено графически на}$$

рис. 3 в относительных составляющих лесного массива. Видно смещение максимума инфекционного заболевания по сравнению с рис. 2 из-за изменения соотношения α и β .

Базисное число R_0 является важным параметром, определяющим характер эпидемии, а также максимальное число инфицированных и переболевших растений к концу эпидемии. Процент лесных насаждений, переболевших и получивших после этого иммунитет, в зависимости от базового коэффициента воспроизведения R_0 показан на рис. 4. При $R_0 < 1$ инфекционное заболевание будет развиваться до формирования иммунитета. При низких значениях коэффициента ($R_0 \approx 1,6$) устойчивость к болезни формируется, когда переболеет ~20% растений. Этот процент возрастает значительно с увеличением R_0 . При $R_0 \approx 6$ количество

новых инфицируемых насаждений практически не зависит от параметров α и β .

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Выводы и заключения

1. Показана пригодность использования дифференциальной модели SIR для описания картины развития инфекционных заболеваний среди лесных насаждений.

2. Показано, что для случая незначительного числа инфицированных особей при единичном базовом коэффициенте воспроизведения массового поражения древостоев не наблюдается (эпидемия отсутствует).

3. Для случая большого числа инфицированных растений получены аналитические выражения для определения моментов времени максимальной интенсивности заболевания (пика эпидемии) и локализации последней, что позволяет прогнозировать развитие болезни.

4. Обнаружено совпадение количества восприимчивых к болезни растений с числом инфицированных особей в момент времени, соответствующий максимуму интенсивности заболевания.

5. Для полной реализации предлагаемой математической модели необходимо определить границы численных значений коэффициентов заболеваемости и выздоровления.

Список литературы

1. Антонов О.И., Кузнецов Е.Н. Совершенствование технологии комплексного ухода за лесом с целью повышения качественной продуктивности насаждений. Лесотехнический журнал. 2017; 7;1(25): 42–49. DOI: 12737/25191.

2. Арефьев Ю.Ф. Авторегуляция патогенеза в лесных экосистемах. Лесотехнический журнал. 2018; 8; 3(31): 29–34. DOI: 10.12737/article_5b97a20dd07530.21107185.

3. Арефьев Ю.Ф., Нгуен Тхи Лан Хьонг Принцип экосистемной защиты лесных и полевых насаждений от паразитических организмов. Лесотехнический журнал. 2019; 9;1(33): 17–23. DOI: 10.12737/article_5c92016ba6da97.20256806.

4. Высоцкий А.А., Корчагин О.М. Корневая губка в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Проблемы и пути решения. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018;224: 176-192. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36172850>.

5. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Исаев А.С. Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таежных лесах. Доклады академии наук. 2017; 475;4: 473-476. DOI: 10.7868/S0869565217220248.

6. Криворотко О.И., Андорная Д.В., Кабанихин С.И. Анализ чувствительности и практическая идентифицируемость математических моделей биологии. *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2020; 23(1): 107-125. DOI: <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2020.23.110>.
7. Кумицкий Б.М., Саврасова Н.А., Плаксина Е.В., Кипрушев А.А. Дифференциальное моделирование эффективности профориентационной работы приемной комиссии вуза. *Инженерные системы и технологии*. 2020; 1 (38): 42–47.
8. Ухманьски Я.З. Об алгоритмической сущности биологии. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020; 12;3: 641–652. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-641-652.
9. Янчевская Е.Ю., Меснянкина О.А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*. 2019;23; 3: 328-334. DOI: 10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334.
10. Bergland H., Wyller J., Burlakov E. Pasture-livestock dynamics with density-dependent harvest and changing environment. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32(4): e12213. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12213>.
11. Burlakov E. On Inclusions Arising in Neural Field Modeling. *Differential Equations and Dynamical Systems*. 2018. 23 pp. DOI: 10.1007/s12591-018-0443-5.
12. Uchmański J., Opaliński K.W., Rau K. Intraspecific competition in an island environment: variability and dispersal of terrestrial snail *Helix aspersa aspersa* Müller, 1774 (Gastropoda: Helicidae). *Acta Zoologica Bulgarica Suppl*. 2018; 12: 25-39.
13. Uchmański J. Cyclic outbreaks of forest insects: A two-dimensional individual-based model. *Theor Popul Biol*. 2019; Aug; 128: 1-18. DOI: 10.1016/j.tpb.2019.04.006. Epub 2019 May 6. PMID: 31071341.
14. Shamilev S.R. Biological, mathematical and computer modeling of a disease of agricultural crops. *Economy. Business. Computer science*. 2017; 1: 39-54.
15. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1927; 115. Iss. 772: 700-721. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.
16. Ghelardini L., Aglietti C., Loria F. (et al.) Dothistroma Needle Blight in protected pine forests in Italy. *Manag. Biol. Invasions*. 2020; 11. Iss. 4: 689–702. DOI: <http://dx.doi.org/10.3391/mbi.2020.11.4.05>.
17. Linnakoski R., Forbes K.M. Pathogens – The hidden face of forest invasions by wood-boring insect pests. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10: 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00090>.
18. Moricca S., Bracalini M., Croci F. (et al.) Biotic factors affecting ecosystem services in urban and peri-urban forests in Italy: The role of introduced and impending pathogens and pests. *Forests*. 2018.; 9(2): 65. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9020065>.
19. Panzavolta T., Bracalini M., Benigno A., Moricca S. Alien Invasive Pathogens and Pests Harming Trees, Forests, and Plantations: Pathways, Global Consequences and Management. *Forests*. 2021; 12(10): 1364. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101364>.
20. Panzavolta T., Panichi A., Bracalini M. (et al.) Tree pathogens and their insect-mediated transport: Implications for oak tree die-off in a natural park area. *Global Ecology and Conservation*. 2018;15: e00437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00437>.
21. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*. 2019;35: 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.

References

1. Antonov O. I., Kuznetsov E. N. (2017) Improving the technology of complex care for forests with the aim of improving quality of productivity of plantations. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 7, No. 1 (25), pp. 42-49 (in Russian). DOI: 12737/25191.

2. Arefiev Yu. F. (2018) Autoregulation of pathogenesis in forest ecosystems. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 8, No. 3(31), pp. 29-34 (in Russian). DOI: 10.12737/article_5b97a20dd07530.21107185.
3. Arefiev Yu. F., Nguyen Thi Lan Huong (2019) The principle of ecosystem protection of forest and field plantings from parasitic organisms. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 9, No. 1 (33), pp. 17-23 (in Russian). DOI: 10.12737/article_5c92016ba6da97.20256806.
4. Vysotsky A. A., Korchagin O. M. (2018) Root sponge in Scots pine plantations (*Pinus Sylvestris* L.). Problems and solutions. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoi akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy], No. 224, pp. 176-192 (in Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36172850>.
5. Karelin D. V., Zamolodchikov D. G., Isaev A. S. (2017) Little-known pulse components of soil carbon dioxide emissions in the boreal forests. *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], Vol. 475, No. 4, pp. 473-476 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869565217220248.
6. Krivorotko O. I., Andornaya D. V., Kabanikhin S. I. (2020) Sensitivity analysis and practical identifiability of mathematical models of biology. *Sibirskij zhurnal industrialnoj matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics], Vol. 23, No. 1, pp. 107-125 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2020.23.110>.
7. Kumitsky B.M., Savrasova N. A., Plaksina E. V., Kiprushev A. A. (2020) Differential modeling of the effectiveness of career guidance work of the university admissions committee. *Inzhenernye sistemy i tekhnologii* [Engineering systems and technologies], Issue 1 (38), pp. 42-47 (in Russian).
8. Uhmansky Ya.Z. (2020) About the algorithmic essence of biology. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and Modeling], Vol. 12, No. 3, pp. 641-652 (in Russian). DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-641-652.
9. Yanchevskaya E. Yu., Mesnyankina O. A. (2019) Mathematical modeling and forecasting in the epidemiology of infectious diseases. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Medicina* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Medicine], Vol. 23. No. 3. pp. 328-334 (in Russian). DOI: 10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334.
10. Bergland H., Wyller J., Burlakov E. Pasture-livestock dynamics with density-dependent harvest and changing environment. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32(4): e12213. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12213>.
11. Burlakov E. On Inclusions Arising in Neural Field Modeling. *Differential Equations and Dynamical Systems*. 2018. 23 pp. DOI: 10.1007/s12591-018-0443-5.
12. Uchmański J., Opaliński K.W., Rau K. Intraspecific competition in an island environment: variability and dispersal of terrestrial snail *Helix aspersa aspersa* Müller, 1774 (Gastropoda: Helicidae). *Acta Zoologica Bulgarica Suppl.* 2018; 12: 25-39.
13. Uchmański J. Cyclic outbreaks of forest insects: A two-dimensional individual-based model. *Theor Popul Biol.* 2019; Aug; 128: 1-18. DOI: 10.1016/j.tpb.2019.04.006. Epub 2019 May 6. PMID: 31071341.
14. Shamilev S.R. Biological, mathematical and computer modeling of a disease of agricultural crops. *Economy. Business. Computer science.* 2017; 1: 39-54.
15. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character.* 1927; 115. Iss. 772: 700-721. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.
16. Ghelardini L., Aglietti C., Loria F. (et al.) Dothistroma Needle Blight in protected pine forests in Italy. *Manag. Biol. Invasions.* 2020; 11. Iss. 4: 689–702. DOI: <http://dx.doi.org/10.3391/mbi.2020.11.4.05>.
17. Linnakoski R., Forbes K.M. Pathogens – The hidden face of forest invasions by wood-boring insect pests. *Frontiers in Plant Science.* 2019; 10: 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00090>.
18. Moricca S., Bracalini M., Croci F. (et al.) Biotic factors affecting ecosystem services in urban and peri-urban forests in Italy: The role of introduced and impending pathogens and pests. *Forests.* 2018.; 9(2): 65. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9020065>.

19. Panzavolta T., Bracalini M., Benigno A., Moricca S. Alien Invasive Pathogens and Pests Harming Trees, Forests, and Plantations: Pathways, Global Consequences and Management. *Forests*. 2021; 12(10): 1364. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101364>.

20. Panzavolta T., Panichi A., Bracalini M. (et al.) Tree pathogens and their insect-mediated transport: Implications for oak tree die-off in a natural park area. *Global Ecology and Conservation*. 2018;15: e00437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00437>.

21. Jactel H., Koricheva J., Castagnyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*. 2019;35: 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.

Сведения об авторах

Кумицкий Борис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8135-8431>, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Евсикова Наталья Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: evsikovany_phlt@vgtu.ru.

Тульская Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4822-4938>, e-mail: tcdtknkyf2014@yandex.ru.

Information about the authors

Boris M. Kumitskiy – Cand. Sci. in Physics and Mathematics, associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8135-8431>, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Natalia Yu. Evsikova – Cand. Sci. in Physics and Mathematics, associate Professor, head of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: evsikovany_phlt@vgtu.ru.

Svetlana G. Tulskaia – Cand. Sci. in Technical Sciences, associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4822-4938>, e-mail: tcdtknkyf2014@yandex.ru.