

в состоянии, когда каким-то образом периодически меняются биомасса и плодородие почвы (пожары + восстановление леса после пожаров или вырубки + восстановление леса после пожаров или вырубок).

Литература

1. Ничипорович А. А., Овчаров К. Е. *КПД зеленого листа, витамины в растениях*. <https://lsdinfo.org/vozdjeistvie-lesov-na-pochvu>.
2. Володченко Л. А., Гуц А. К. *Математические модели лесных экосистем с бифуркациями Андронова-Хопфа* // Математические структуры и моделирование. 2021. № 3(59). С. 92–108.
3. Марсен Дж., Мак-Кракен М. *Бифуркация рождения цикла и её приложения*. М.: Мир, 1980.
4. Касты Дж. *Большие системы. Связность, сложность и катастрофы*. М.: Мир, 1982.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПАНДЕМИИ COVID-19 НА БАЗЕ СПЕЦИФИКАЦИИ SIR МОДЕЛИ

А.С. Горулёв, А.В. Капусто

В период с декабря 2019 по март 2022 года по всему миру было зафиксировано 488 млн. случаев заражения коронавирусной инфекцией, 6,14 млн. из которых имели летальный исход (хотя показатель смертности считается заниженным). Самой смертоносной пандемией прошлого века принято считать испанку (испанский грипп), которая в 1918–1922 гг. после Первой мировой войны унесла жизни 50 миллионов человек или 2,73% от всего населения. Число жертв пандемий чумы (541–542 гг., 1347–1351 гг.) было еще более многочисленным. Последствия пандемий сказываются во всех сферах деятельности как отдельного человека, так и стран в целом, — социальной, финансовой, политической и т.д. Поэтому большое значение приобретают не только достижения медицины в области борьбы с инфекциями, но и все результаты в направлении моделирования распространения и развития эпидемий [1].

Наиболее известной моделью развития эпидемий считается SIR модель, в основе которой лежит разделение населения на восприимчивых (S), инфицированных (I) и переболевших (R). Она имеет высокую точность прогноза при большой популяции и легко может быть расширена путем добавления дополнительных параметров [2]. Например, в известную SEIR модель включают E – инкубационный период.

Для повышения точности прогноза в проведенном исследовании в классическую SIR модель было добавлено 3 параметра: H – госпитализированные (не в реанимации или отделении интенсивной терапии), C – госпитализированные (в реанимации или отделении интенсивной терапии) и D – умершие от болезни.

SIHCDR модель описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= -\theta_I(t) \cdot \frac{S(t)}{N - D(t)} - \mu \cdot S(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \theta_I(t) \cdot \frac{S(t)}{N - D(t)} - (\omega_1 + \eta + \mu) \cdot I(t), \\ \frac{dH(t)}{dt} &= \eta I(t) - (\omega_2 + \lambda_1 + \xi + \mu) \cdot H(t), \\ \frac{dC(t)}{dt} &= \xi H(t) - (\omega_3 + \lambda_2 + \mu) \cdot C(t), \\ \frac{dD(t)}{dt} &= \lambda_1 H(t) + \lambda_2 C(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \omega_1 I(t) + \omega_2 H(t) + \omega_3 C(t) - \mu R(t),\end{aligned}$$

где $S(t)$ – количество восприимчивых на момент времени t , $I(t)$ – количество инфицированных на момент времени t , $H(t)$ – количество госпитализированных без интенсивной терапии на момент времени t , $C(t)$ – количество госпитализированных в отделении интенсивной терапии на момент времени t , $D(t)$ – количество умерших от пандемии на момент времени t , $R(t)$ – количество выздоровевших на момент времени t , N – население страны, μ – естественный уровень смертности, $\theta_I(t)$ – коэффициент перехода из категории S в категорию I , ξ – коэффициент перехода из категории H в категорию C , ω_1 , ω_2 , ω_3 – коэффициенты выздоровления из категорий I , H и C соответственно, λ_1 – коэффициент смертности от болезни для категории H , λ_2 – коэффициент смертности от болезни для категории C , η – коэффициент госпитализации [3].

Проведение моделирования требует определения коэффициентов модели на базе ряда вспомогательных статистических данных, для чего была использована находящаяся в свободном доступе требуемая статистическая информация по Германии.

Моделирование с использованием системы дифференциальных уравнений выполнялось в пакете прикладных программ MATLAB [4]. Для решения системы с заданными параметрами применялась функция `ode45`. Показатели времени лечения, периодов заразности и интенсивной терапии были определены по оценкам Института имени Роберта Коха. При оценке количества контактов использовались средние показатели из статей и публикаций на тему распространения пандемии. Коэффициенты госпитализации и смертности рассчитаны на основе данных электронного источника de.statista.com.

С целью проверки точности прогноза и корректировки значений коэффициентов было проведено моделирование второй волны распространения пандемии COVID-19 в Германии на основе данных электронных ресурсов de.statista.com, worldometers.info и intensivregister.de за период, предшествующий вспышке заболеваемости. В результате моделирования была получена картина динамики изменения количества инфицированных людей, которая подтвердила корректность модели, что позволило рассчитать коэффициент риска заражения.

Моделирование четвертой волны COVID-19 продемонстрировало изменение количества инфицированных людей во второй половине 2021 года и в 2022 году в зависимости от принимаемых государством мер, а также дало основание для ожидания пятой волны пандемии в 2022 году при отсутствии локдауна во время четвертой волны.

Прогнозирование будущих волн распространения пандемий и эпидемий играет важную роль в краткосрочном и среднесрочном планировании и позволяет заранее оценить потенциальный ущерб данной угрозы и принять решение о целесообразности введения ограничительных мер.

Литература

1. Kermack W.O., McKendrick A.G. *A contribution to the mathematical theory of epidemics* // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1927. V. 115. P. 700-721.
2. Piccolomiini E.L., Zama F. *Monitoring Italian COVID-19 spread by an adaptive SEIRD model* // medRxiv. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.03.20049734v1>.
3. Treibert S.M. *The SIR Model in Epidemic Modelling. In: Mathematical Modeling and Nonstandard Schemes for the Corona Virus Pandemic*. BestMasters. Springer Spektrum: Wiesbaden, 2021.
4. Ashiro R., Nagase M., Vaillancourt R. *Behind and beyond the Matlab ODE suite* // Comput. Math. Appl. 2000. V. 40. P. 491-512.