

**ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ОЧАГА ХАНТАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ:  
СТАТИСТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Кшнясев И.А.<sup>1</sup>, Бернштейн А.Д.<sup>2</sup>, Маклаков К.В.<sup>1</sup>

1 – ИЭРiЖ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

2 – ИПиВЭ им. М.П. Чумакова, РАМН, г. Москва, Россия

kia@ipae.uran.ru

Понимание механизмов колебаний активности природных очагов Хантавирусных (ХВ) инфекций и предсказание эпидемических вспышек являются актуальными проблемами эпидемиологии и медицинской териологии. ХВ встречаются по всему миру, где распространены и их хозяева – грызуны и насекомоядные. Хантавирус Пуумала (PUUV) вызывает у человека геморрагическую лихорадку с почечным синдромом (ГЛПС) и по заболеваемости населения занимает первое место среди всех зоонозов в лесной зоне Европы. В России ГЛПС наиболее эндемична в Предуралье (Удмуртская республика и Башкортостан) с заболеваемостью до 56 человек на 100 тыс. жителей в год. Главная задача исследования – разработка статистических и имитационных моделей для интерпретации и прогнозирования активности ХВ природно-очаговых заболеваний. Эпизоотический мониторинг рыхой полевки (*Myodes glareolus*) – основного хозяина PUUV проведен в районе г. Ижевск (56°50' с.ш., 53°11' в.д.) и ХВ-антител в легких полевок определен иммуноферментным методом (ELISA).

*Гармоническая модель.* Первая часть временного ряда (4 наблюдения в год) логарифма плотности PUUV-инфицированного населения полевок (1981–1995) выглядит как колебание с приблизительно 3-х летней периодичностью и может быть адекватно ( $R = 0,89$ ) описана единственной гармоникой:  $lg(I+1) = 0,52 + 0,48 \sin(0.36*t - 0.79)$ , где  $t$  – порядковый номер месяца с начала 1981 года.

*Разностные уравнения.* Если исследовать данные однократных учетов (в августе), то удобна модель зависящего от плотности роста популяции инфицированных особей (с дискретными поколениями):  $I_{t+1} = \varepsilon + \alpha * I_t / [1 + (I_t / \beta)^\gamma]$ , где каждый параметр ( $\varepsilon$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) имеет простую биологическую интерпретацию. Оценки параметров, полученные, на обучающей части ряда, обеспечивают  $R_{1981-1998} = 0,89$ , выглядят правдоподобными:  $I_{t+1} = 1 + 2,8 * I_t / [1 + (I_t / 4,3)^{25}]$  и свидетельствуют о сверх-компенсации ( $\gamma >> 1$ ). Но прогноз, выполняемый на тестовую часть ряда, теряет фазу наблюдаемых флуктуаций (и, следовательно, и свою ценность), если не принять во внимание «импульсы внешней силы» – был ли сверхурожай плодов липы в предыдущем году. Сверхурожай приводит к сверхраннему началу размножения полевок, поскольку обеспечивает грызунов экстремально высоко-калорийным кормом. И, таким образом, предопределяет (или синхронизирует) рост активности природного ХВ очага: 1) за счет больших доли и притока восприимчивых особей (а поскольку прошло не менее 2-х лет после предыдущей вспышки, то обилие вируса в среде и плотность активных вирусоносителей низки); 2) вступающие в репродукцию животные имеют высокую частоту прямых (и косвенных) контактов и/или подвижность, и, следовательно, находятся под высоким риском инфицирования, если не обладают активным или пассивным иммунитетом. Учет зимнего размножения полевок обеспечил наиболее точный прогноз (с упреждением в полгода), как для PUUV активности, так и вспышки ('0', '1') ГЛПС (1973–2012:  $\tau = 1,0$ ,  $Z = 9,1$ ). Урожай липы (баллы: 0–5) как единственный предиктор дает более заглавовременный ( $\approx 1$  год), но менее точный прогноз (1973–2012:  $\tau = 0,7$ ,  $Z = 6,3$ ).

*Дифференциальные уравнения.* В качестве итога мы построили детерминированную систему «ресурс-потребитель/хозяин-паразит» в виде двух связанных подсистем, каждая из которых – суть система дифференциальных уравнений, и далее исследовали её динамику. Мы показали качественное сходство поведения предложенной модели и наблюдений, предположили ведущую роль трофических взаимодействий и важность каскадных эффектов и в динамике других систем природно-очаговых инфекций подобных изученной.