

ИМИТАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ЯВЛЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ И ИХ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Исследование распространения эпидемий по территории должно быть достаточно многоаспектным, что связано со многими факторами, влияющими на направления и скорости их развития. Однако необходимость учета этих факторов значительно усложняет имитацию процесса, и в некоторых случаях второстепенные, соподчиненные причины даже затушевывают основную картину распространения явлений. В связи с этим нами была поставлена задача, абстрагируясь от деталей, смоделировать процесс распространения эпидемии на основе самых общих, легко доступных статистических данных — численности жителей поселений и характера их размещения по территории, для чего можно использовать целый ряд моделей как детерминистских, так и стохастических. Среди стохастических моделей пространственного развития явлений важное место занимает метод Монте-Карло, имеющий достаточно простую структуру вычислительного алгоритма [1, 4], но тем не менее позволяющий получать объективные результаты. По-видимому, все это обусловило очень широкое его использование для решения различных задач пространственного развития явлений [2, 13, 15, 17, 18 и др.], в том числе и распространения эпидемий [7, 8].

Для таких же целей все чаще используют модели, основанные на цепях Маркова [6, 16]. Интересен опыт приложения

теории игр к решению проблем прогнозирования пространственного размещения явлений, тесно связанных по своему подходу с рассматриваемым вопросом [21, 24]. Достаточно полные обзоры по данным вопросам можно найти в работах [5, 6, 12, 19].

Однако наиболее часто встречаются модели, основанные на детерминистских началах. Это, в частности, эксперименты по моделированию «волн» заселения [9], развития эпидемий [20] и др. Достаточно подробный обзор моделей приведен в работе [6]. Многие исследования посвящены тем или иным аспектам применения гравитационных моделей или их модификаций [3, 5].

Чаще всего в данных работах определяются эмпирические формулы, устанавливающие взаимосвязи между объемом миграций населения (грузопотоков, телефонных переговоров и т. д.), количеством жителей поселений и их взаимной удаленностью, т. е.

$$I_{ij} = k \frac{P_i \cdot P_j}{D_{ij}^a}, \quad (1)$$

где I_{ij} — объем потоков между пунктами i и j ; P_i и P_j — численность жителей; D_{ij} — расстояние между пунктами.

Как правило, задача сводится к отысканию коэффициентов k и показателей степени a и, таким образом, к установлению эмпирических уравнений. В большинстве экспериментальных работ величина степени a варьирует в пределах от 1 до 3 в зависимости от территории и характера потоков [3]. Коэффициент k лишь устанавливает надлежащую размерность у величины I_{ij} .

Однако если объем потоков между пунктами не известен, то чаще всего для его вычисления пользуются законом всемирного тяготения Ньютона, заимствованным из физики. Формула Ньютона выражает взаимодействие двух тел через произведение их масс, деленное на квадрат расстояния между ними. На основании предположенной аналогии силу демографического взаимодействия двух населенных пунктов можно описать аналогичным образом:

$$I_{12} = \frac{P_1 \cdot P_2}{D_{12}^2}. \quad (2)$$

Использование прямых умозаключительных аналогий между физическими и социальными процессами требует очень тщательных экспериментальных проверок или применения полученных результатов для самых общих выводов.

Нами была поставлена задача смоделировать развитие эпидемии по территории, основываясь на гравитационной модели или ее модификациях. Выбор данной модели обуславливается ее широкой экспериментальной проверкой, выполненной многими учеными, и простотой вычислительной процедуры. При гео-

графическом обосновании возможности использования модели сделано следующее допущение. Полагаем, что развитие эпидемии прямо пропорционально числу контактов между людьми, а следовательно, определяется объемом миграций между пунктами. Как уже отмечалось, для большинства разновидностей миграций численность жителей населенных пунктов и их пространственная удаленность — самые общие факторы миграции. Но можно назвать и еще целый ряд специфических факторов, например искажения в характере распространения эпидемии,

Таблица 1

Статистические данные о численности населения пунктов

Пункт	Численность жителей пунктов, (тыс. чел.)	Координаты, км	
		X	Y
1	056,300	05,0	02,0
2	020,700	09,0	01,0
3	021,600	08,7	02,1
4	080,400	09,3	02,6
5	120,010	08,5	03,7
6	012,200	10,9	03,1

вызванные превентивными прививками, карантинными мероприятиями и т. д.

Однако наиболее заманчиво смоделировать такие многопричинные процессы, хотя бы в общей форме, основываясь на минимальном числе наиболее доступных показателей. Поэтому развитие эпидемии моделировали при помощи формулы (2), но расчеты производили по трем ее вариантам: в первом случае показатель степени у величины D равнялся 1, во втором — 2 и в третьем — 3, т. е. в предположении, что и в нашем случае показатель степени будет находиться в пределах от 1 до 3, охватываясь как бы весь ряд различных видов миграций, исследованных эмпирически [3].

Эксперимент осуществлялся на примере распространения эпидемии между городами Великобритании с числом жителей более 100 тыс. Здесь отсутствовали типичные источники помех, вызывающие, по мнению Ю. В. Медведкова [3], расхождения фактов с формулой (1). Это — отсутствие сильных потоков не местного характера и то, что малолюдные поселения для расчетов не использовались. Статистический материал взят из официальных материалов переписи населения в 1971 г. [10, 11].

Методику расчета этапности распространения эпидемии, разработанную нами с учетом возможности ее картографирования, удобно проиллюстрировать на условном примере. Допустим, что мы имеем шесть населенных пунктов, все необходимые данные о которых сведены в табл. 1. Графическое изображение размещения пунктов показано на рис. 1.

Прежде всего, используя формулу (2), рассчитываем матрицу, характеризующую объемы миграций между пунктами (табл. 2). После этого задаем номер пункта, из которого начинается распространяться эпидемия, например 5. Далее из пятого столбца матрицы выбираем максимальное число (5215,57), свидетельствующее о наибольшем объеме миграций между соответствующими пунктами, а следовательно, и о максимальной вероятности перенесения эпидемии из пункта 5 в пункт 4. Теперь уже и пункт 5, и пункт 4 могут служить очагами распространения эпидемии. Поэтому максимальное число выбираем из двух столбцов — 4-го и 5-го, естественно, не принимая во внимание уже

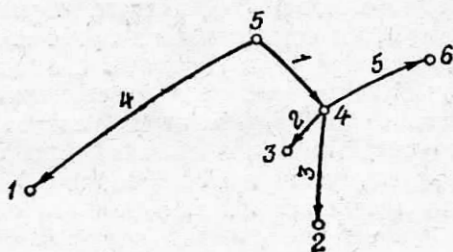


Рис. 1. Условный пример этапности распространения эпидемии.

реализованное число 5215,57. В этом случае максимальное число (2846,95) показывает, что эпидемия распространится из пункта 4 в пункт 3. Рассматривая 3, 4 и 5-й столбцы, находим следующее число: 997,01 (3—5). Однако в этом случае эпидемия не распространяется, так как она уже имеется в обоих пунктах. Поэтому данное число из анализа исключается и в этих же трех столбцах отыскивается следующее максимальное число: 628,03. Следовательно, на третьем этапе эпидемия распро-

Таблица 2

Объемы миграций

Пункт	Пункт					
	1	2	3	4	5	6
1						
2	68,55	68,55	88,76	240,13	446,27	19,07
3	88,76	343,94	343,94	628,03	329,47	31,49
4	240,13	628,03	2846,95	2846,95	997,01	45,12
5	446,27	329,47	997,01	5215,57	5215,57	349,07
6	19,07	31,49	45,12	349,07	239,24	239,24

странится из пункта 4 в пункт 2. Следующий этап распространения — между пунктами 5 и 1 (446,27). Наконец, когда эпидемия еще не распространилась лишь до 6-го пункта, анализ пяти первых столбцов показывает, что вероятнее всего она придет сюда из пункта 4 (349,07). Этапность распространения эпидемии можно показать графически (рис. 1). Цифры над стрелками обозначают номера этапов распространения эпидемии.

Аналогичным образом смоделировано распространение эпидемии от Лондона ко всем остальным 57 городам Великобритании с числом жителей более 100 тыс. Результирующая карта представлена на рис. 2. Этапность распространения эпидемии различается по толщине стрелок, что позволяет воссоздать картину постепенного распространения эпидемии по территории. Анализ полученной карты свидетельствует о доминирующем демографическом влиянии Лондона не только на близлежащие города, но прежде всего на достаточно удаленные крупные города страны (Бирмингем, Бристоль, Шеффилд, Манчестер и др.). То есть эпидемия будет сначала распространяться между крупнейшими городами и лишь затем как бы веерообразно от крупных городов к более мелким. Поэтому противоэпидемические преграды следует устанавливать прежде всего между крупнейшими (а не ближайшими) пунктами, так как в противном случае количество городов (и общее число жителей), захваченных волной эпидемии, за одни и те же отрезки времени в общем увеличивает возможность поражения больших масс населения страны.

Интересно, что основные оси распространения эпидемий совпадают и с главнейшими путями сообщения Британии — главными автотрассами (мотовеями) и железнодорожными магистральями. Кроме того, можно заметить определенное совпадение картины распространения эпидемии с транспортной доступностью городов. Например, чтобы добраться из городов Южного Уэльса в Ливерпуль или Манчестер, по времени выгодно выбирать не кратчайший путь через Центральный Уэльс, а через Лондон, что большинство жителей и делают. Аналогично распространение эпидемии из городов Южного Уэльса в районы Ланкашира и Уэст-Райдинга произошло бы через Лондон (рис. 2).

Если же показатель степени u величины D в формуле (1) будет равняться 1, то доминирующее демографическое влияние Лондона оказывается еще более контрастно выраженным. Когда показатель степени равен 3, т. е. фактор расстояния влияет на результирующую величину достаточно сильно, лучше проявляются демографические особенности регионального характера. Для данного варианта характерна такая последовательность развития эпидемии между крупными городами: Лондон—Бирмингем—Манчестер—Шеффилд—Лидс—Братфорд с последующим распространением эпидемии от них к более мелким городам.

Таким образом, использование исключительно простой методики позволяет получить интересные результаты. Кроме того, аналогичную методику можно применять и для имитации пространственного распространения других явлений, например заселения необжитых территорий, анализа доступности регионов и т. д. Но тем не менее к выполненному эксперименту следует относиться на данном этапе работ как к методическому приме-

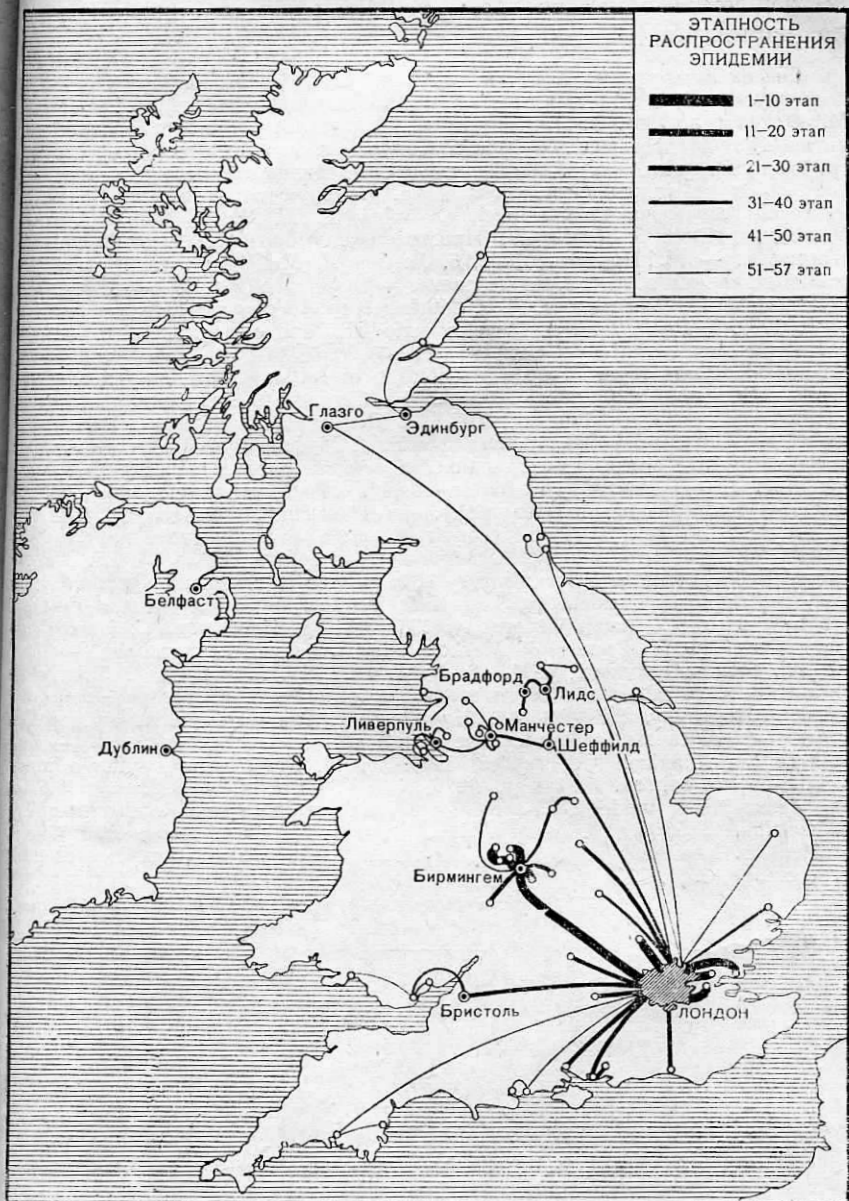


Рис. 2. Распространение эпидемии из Лондона между городами Великобритании.

ру, иллюстрирующему рассматриваемый вопрос. Лишь надлежащая экспериментальная проверка и установление эмпирических зависимостей в формуле (1) позволит с большой надеж-

ностью производить прогнозы развития тех или иных явлений по территории.

- Список литературы:** 1. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация в цифровых машинах. — М.: Физматгиз, 1961. 2. Матлин И. С. Статистическое моделирование развития системы поселений. — В сб.: Вопросы географии: Теоретическая география, 1971, вып. 88. 3. Медведков Ю. В. Экономгеографическая изученность районов капиталистического мира. Приложения математики в экономической географии, 1965, вып. 2. 4. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1968. 5. Хаггер П. Пространственный анализ в экономической географии. — М.: Прогресс, 1968. 6. Харвей Д. Модели развития пространственных систем в географии человека. — В кн.: Модели в географии. М.: Прогресс, 1971. 7. Bailey N. T. J. Mathematical theory of epidemics. — New York, 1957. 8. Bartlett M. S. Measles periodicity and community size. — Journal of the Royal Statistical Society, series A, 1957, 120. 9. Bylund E. Theoretical considerations regarding the distribution of settlement in inner north Sweden. — Geografiska Annaler, 1960, 42. 10. Census 1971. England and Wales. Preliminary report. — London, 1971. 11. Census 1971. Scotland. Preliminary report. — Edinburgh, 1971. 12. Dramowicz K. Modele dyfuzji i łańcuchy Markowa w analizie przestrzennej. — Prz. zagran. lit. geogr., 1976, № 2. 13. Garrison W. L. — Towards simulation models of urban growth and development. — Lund Studies in Geography, series B, Human Geography, 1962, 24. 14. Gould P. R. Man against his environment: a game-theoretic framework. — Annals of the Association of American Geographers, 1963, 53. 15. Hägerstrand T. Migration and area: survey of a sample of Swedish migration fields and hypothetical considerations on their genesis. — Lund Studies in Geography, series B, Human Geography, 1957, 13. 16. Maccheroni C. Un'applicazione delle catene discrete di Markov alle previsioni demografiche. — Riv. int. sci. econ. e commerc., 1971, 18, N 11. 1971. 17. Morrill R. L. Simulation of central place patterns over time. — Lund Studies in Geography, series B, Human Geography, 1962, 24. 18. Morrill R. L. The development and spatial distribution of towns in Sweden: an historical — predictive approach. — Annals of the American Geographers, 1963, 53. 19. Przestrzenna dyfuzja innowacji. — Prz. zagran. lit. geogr., 1975, N 1; 2. 20. Rushton S., Mautner A. J. The deterministic model of a simple epidemic for more than one community. Biometrika, 1955, 42. 21. Stevens B. H. An application of game theory to a problem in locational strategy. — Regional Science Association. Papers and Proceedings, 1961, 7.

Работа поступила в редколлегия 8 августа 1979 года.