ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ

Кулыгин В.В.

Институт аридных зон Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону
kulygin@ssc-ras.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время преобладающей, в том числе и в России, остается практика ликвидации последствий опасных природных явлений (ОЯ), хотя очевидно, что необходима научно обоснованная стратегия планирования мероприятий по предотвращению возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных ОЯ, и снижению их последствий [1].

Пространственное планирование, несомненно, является один из основных способов снижения риска ОЯ. Регулируя долгосрочное использование пространства, оно определяет распределение населения, местоположение и интенсивность запланированного развития. Соответствующее расположение различных видов землепользования влияет на подверженность стихийным бедствиям и минимизирует ущерб жизни и имуществу. Следовательно, лица, ответственные за планирование, могут либо увеличить, либо уменьшить риск путем принятия решений о том, где и как строить дома, инфраструктуру и другие объекты.

Существенные трудности возникают при интеграции и интерпретации большого количества данных, поддерживающих пространственное планирование. Во многих случаях степень детализации собранных данных не соответствует степени обобщения, необходимой для планирования, или наоборот. В этом контексте географическая информационная система (ГИС) становится ключевой средой для поддержки подобных комплексных исследований. В результате наблюдается растущий спрос на геоинформационные системы, которые служат инструментом для интеграции различных контекстов при пространственном планировании.

В последние десятилетия было разработано большое количество ГИС-приложений для ОЯ. До сих пор, несмотря на существование неопределенности в пространственных моделях и данных, результаты их работы в основном являются детерминистическими. В тоже время, современные исследования природных опасностей требуют учета неопределенностей, возникающих из-за ограниченного знания о протекающих процессах, ошибок измерений, неполных наблюдений и внутренней случайности управляющих процессов.

Байесовские сети (БС) известны как удобный способ явного моделирования неопределенностей в вероятностной форме. Потенциал использования БС для

оценки ОЯ заключается не только в способности БС моделировать различные взаимозависимости, но и в их интуитивно понятном формате: представление зависимостей между используемыми переменными в виде графической сети позволяет улучшить понимание взаимоотношений внутри системы ОЯ и характера её функционирования [2].

БС использовались при оценке таких ОЯ, как землетрясения [3], цунами [4], наводнения [5, 6], оползни [7], снежные лавины [8], извержение вулканов [9], селевые потоки [10].

Несмотря на хорошую теоретическую изученность БС, их применение к реальным данным вызывает определенные трудности. Основной проблемой является обработка неполных наблюдений и работа с непрерывными переменными. Кроме того, за исключением работ [6, 8] при использовании БС не рассматривается пространственный аспект, что крайне важно при планировании землепользования.

Целью настоящей работы является создание геомодели для оценки риска опасных явлений, основанной на учете неопределенности с использованием БС.

ГЕОМОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Оценка ОЯ и их рисков проводится в разных масштабах: начиная от глобального масштаба и заканчивая уровнем поселений. Каждый из этих уровней имеет свои собственные цели и требования к пространственным данным для инвентаризаций опасностей, экологических данных, причин возникновения ОЯ и объектов, подверженных риску.

Целью оценки ОЯ, чаще всего, является подготовка районирования территории по разным типам опасных процессов, тяжести их последствий и частоты возникновения. Поэтому геомодель должна обеспечивать возможность классификации территорий по степени опасности от каждого вида ОЯ для конкретных объектов и построение поверхностей риска на основе моделирования последствий реализации возможных сценариев.

Для достижения этих целей исследуемая геосистема делится на пространственные единицы таким образом, чтобы они естественным образом отражали пространственные особенности воздействия ОЯ на геосистему, специфику хозяйственной деятельности и состояние экосистемы. Каждая пространственная единица представляет собой геообъект, который может рассматриваться как отдельный элемент, сложившийся в результате взаимодействия геологических, геоморфологических, океанографических, климатических и антропогенных факторов [1]. Размеры геообъектов уточняются в зависимости от детальности анализа и имеющейся информации.

При растровой форме представления геоинформации элементарными пространственными объектами являются ячейки растра, имеющие некоторую

площадь. Таким образом, выбранная область представляется в виде множества непересекающихся ячеек, снабженных атрибутивной информацией.

Векторная форма представления позволяет работать на уровне объектов, для которых представлена атрибутивная информация (кадастровые участки, отдельные здания и т.д.).

Таким образом, информационная составляющая геоинформационной модели представляет собой группу пространственных наборов данных с единым разбиением области исследования на элементарные пространственные объекты (элементы).

Геоинформационная модель в составе моделирующей системы реализуется в виде тематической ГИС. Обычно структуру ГИС можно представить в виде двух частей: часть, связанная с подготовкой входных данных и сценариев расчета (информационное обеспечение); управляющая программа с запуском расчета выбранного сценария (модельный блок).

Данные, полученные в ходе моделирования, затем используются в геоинформационной модели. Результатом геоинформационной модели могут быть карты, отражающие состояние, взаимосвязи и потенциальные изменения факторов, связанных с возникновением ОЯ и их последствиями.

БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ

БС это одна из форм вероятностных графических (графовых) моделей. Это ориентированные ациклические графы, в которых узлы представляют собой случайные величины, а дуги – зависимости между ними. Дуги характеризуют отношения «причина-следствие» между случайными величинами и задаются условными распределениями вероятностей (значение в дочернем узле обусловлено набором значений его родительских узлов). Таким образом, БС обеспечивают графическое представление совместного распределения вероятностей $P(X)$ набора случайных величин ($X = x_1, \dots, x_n$). Совместное распределение вероятностей такой сети определяется как

$$P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i \mid pa(x_i)),$$

где $pa(x_i)$ – это множество родительских узлов для x_i . Распределения x_i могут иметь любую форму, но эффективные алгоритмы точного вероятностного вывода существуют только для случая, когда узлы имеют дискретные или нормальные распределения.

БС могут быть построены как в результате экспертного оценивания, так и путем определения распределений вероятности на основе данных.

Процедура анализа ОЯ с использованием БС заключается в следующем:

- построение структуры БС;

- определение распределений вероятностей для узлов (маргинальные распределения) и дуг (условные распределения);
- расчет априорного распределения целевой переменной (например, ущерб от ОЯ);
- расчет постериорных распределений вероятности для конкретных ситуаций/сценариев путем замены априорные распределения некоторых переменных на конкретные значения, наблюдавшиеся в этой ситуации.

Дисперсия распределений вероятностей целевой переменной может использоваться для количественной характеристики неопределенности модели.

Связь ГИС и БС основана на геопространственном представлении области исследования. Для каждого элементарного пространственного элемента производится запуск статистического вывода БС следующим образом.

1. Входные узлы БС инициализируются значениями из пространственных наборов данных (например, входные узлы «тип здания» и «тип дороги» получают информацию из карты землепользования).
2. Для каждого пространственного элемента сначала производится означивание случайных переменных (evidence), представленных пространственными наборами данных, а затем вероятностный вывод.
3. Значения целевых переменных БС для каждого пространственного элемента возвращаются в ГИС и могут быть отображены на карте.

МУЛЬТИ-ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ОЯ, возникающие на одной и той же территории, не являются независимыми, в частности одно ОЯ может спровоцировать другие ОЯ (каскадный эффект). Описанный выше подход может быть использован для исследования группы ОЯ с учетом взаимодействия между опасностями. Гибкая структура, предлагаемая БС, позволяет также анализировать каскадные эффекты через вероятностную структуру.

Структура БС строится на основе предварительного анализа группы/совокупности ОЯ, характерных для исследуемой области. Результатом анализа является качественная оценка связей между ОЯ. Пример такого анализа для Азовского моря представлен в работе [11].

После создания БС, учитывающей взаимовлияния ОЯ, может быть оценена вероятность возникновения каскадного эффекта. Сначала определяется вероятность события первичной опасности и условные вероятности возможных последующих событий вторичной опасности. После чего вероятность каскадного эффекта рассчитывается как произведение вероятности первичного события на условную вероятность последующих явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рисков ОЯ является важным элементом в реализации стратегии устойчивого развития и планировании землепользования. В настоящей работе рассмотрено создание геомодели для оценки ОЯ, основанной на учете неопределенности с использованием БС. В предложенном походе БС связывается с ГИС для облегчения моделирования причинно-следственных связей между рассматриваемыми параметрами и связанных с ними неопределенностей в пространственно-явной форме. Представленная модель может служить основой для разработки согласованного и унифицированного подхода к оценке рисков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60043 мол_а_дк.

Список литературы

1. Кулыгин В.В. Подход к оценке рисков опасных природных явлений в морехозяйственных системах // Проблемы анализа риска. 2017. Т. 14. № 2. С. 64-73.
2. Straub D. Natural hazards risk assessment using Bayesian networks // Paper presented at the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 05), Rome, Italy, 19–23 June 2005.
3. Bayraktarli Y.Y., Faber M.H. Bayesian probabilistic network approach for managing earthquake risks of cities // Georisk. 2011. 5. P. 2–24. doi:10.1080/17499511003679907.
4. Blaser L., Ohrnberger M., Riggelsen C., Babeyko A., Scherbaum F. Bayesian networks for tsunami early warning // Geophys. J. Int.. 2011. 185. P. 1431–1443.
5. Vogel K., Riggelsen C., Korup O., Scherbaum F. Bayesian network learning for natural hazard analyses // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014. 14. P. 2605–2626, doi:10.5194/nhess-14-2605-2014.
6. Balbi S., Villa F., Mojtahed V., Hegetschweiler K.T., Giupponi C. A spatial Bayesian network model to assess the benefits of early warning for urban flood risk to people // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. 16. P. 1323–1337. doi:10.5194/nhess-16-1323-2016
7. Song Y., Gong J., Gao S., Wang D., Cui T., Li Y., Wei B. Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China // Comput. Geosci. 2012. 42. P. 189–199.
8. Grêt-Regamey A., Straub D. Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. 6. P. 911–926. doi:10.5194/nhess-6-911-2006.
9. Hincks T., Aspinall A., Woo G. An evidence science approach to volcano hazard forecasting // Paper presented at the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earths Interior (AVCEI), 2004.
10. Antonucci A., Salvetti A., Zaffalon M. Hazard assessment of debris flows by credal networks // iEMSs. 2004. P. 98–103.
11. Кулыгин В.В. Методика оценки взаимовлияния совокупности опасных природных явлений // Геориск. 2017. № 2. С. 30-37.

GEOINFORMATIONAL MODEL OF NATURAL HAZARDS RISK ASSESSMENT ON THE BASIS OF BAYESIAN NETWORKS

V.V. Kulygin

Institute of Arid Zones Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences

kulygin@ssc-ras.ru

Abstract – Many regions of the world are affected by a number of different types of hazards. Modern natural hazards research requires dealing with uncertainties that arise from limited process knowledge, measurement errors, incomplete observations and etc. The objective of this work is developing a geomodel of natural hazards risk assessment which takes into account possible uncertainties.

In paper it is shown that Bayesian networks (BN) offer a flexible framework for expressing uncertainties encountered in natural hazard assessments. Geographical information systems and BN models are fully coupled for prepare spatial simulations. The spatial context is geosystem that is divided into units, in each of which a probabilistic model runs.

The presented model may consider as a basis for developing a consistent and unified risk assessment approach.

Keywords. Natural hazards, Bayesian network, geoinformation model, uncertainties

References

1. Kulygin V.V. 2017. [The approach to assessing the risks of natural hazards in economic marine systems] Issues of Risk Analysis. 14(2): 64-73. (In Russian).
2. Straub D. Natural hazards risk assessment using Bayesian networks // Paper presented at the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 05), Rome, Italy, 19–23 June 2005.
3. Bayraktarli Y.Y., Faber M.H. Bayesian probabilistic network approach for managing earthquake risks of cities // Georisk. 2011. 5. P. 2–24. doi:10.1080/17499511003679907.
4. Blaser L., Ohrnberger M., Riggelsen C., Babeyko A., Scherbaum F. Bayesian networks for tsunami early warning // Geophys. J. Int.. 2011. 185. P. 1431–1443.
5. Vogel K., Riggelsen C., Korup O., Scherbaum F. Bayesian network learning for natural hazard analyses // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014. 14. P. 2605–2626, doi:10.5194/nhess-14-2605-2014.
6. Balbi S., Villa F., Mojtahed V., Hegetschweiler K.T., Giupponi C. A spatial Bayesian network model to assess the benefits of early warning for urban flood risk to people // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. 16. P. 1323–1337. doi:10.5194/nhess-16-1323-2016
7. Song Y., Gong J., Gao S., Wang D., Cui T., Li Y., Wei B. Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China // Comput. Geosci. 2012. 42. P. 189–199.
8. Grêt-Regamey A., Straub D. Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. 6. P. 911–926. doi:10.5194/nhess-6-911-2006.

9. Hincks T., Aspinall A., Woo G. An evidence science approach to volcano hazard forecasting // Paper presented at the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earths Interior (AVCEI), 2004.
10. Antonucci A., Salvetti A., Zaffalon M. Hazard assessment of debris flows by credal networks // iEMSs. 2004. P. 98–103.
11. Kulygin V.V. 2017. [Method for assessment of multiple natural hazard interaction] Georisk. 2: 30-37. (In Russian).