

4.2. РАСЧЕТ РИСКОВ НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ р. ДОН

В.В. Кулыгин

Аннотация. В работе рассматривается подход к оценке риска нагонных явлений с использованием байесовских сетей и ГИС, обеспечивающий моделирование всех требуемых параметров, их причинно-следственных связей в пространственно-явной форме. Обсуждаются возможности явного учета неопределенности факторов, участвующих в оценке риска. Представлен расчет риска нагонных явлений в дельте р. Дон разного периода повторяемости. В соответствии с величиной возможного ущерба выделены и охарактеризованы четыре группы населенных пунктов. Согласно расчетам, суммарный ущерб для всех населенных пунктов дельты р. Дон от нагонов с периодами повторяемости 50 и 100 лет составил около 190 млн руб. и 680 млн руб. соответственно.

Ключевые слова: байесовские сети, ГИС, штормовые нагоны, риски, дельта р. Дон

Катастрофические нагоны в дельте р. Дон в 2013 и 2014 гг. привели к существенному ущербу [Матишов, Бердников, 2015; Матишов и др., 2017]. Как правило, опасные для дельты р. Дон подъемы уровня вызываются юго-западными воздушными потоками над Азовским морем. При достижении на посту Азов отметки уровня воды 1,1 м БСВ (Балтийской системы высот) происходит подтопление поймы и прибрежных строений. При отметке 2 м большая часть территории дельты Дона от истока Мертвого Донца до устьевого взморья оказывается под водой. Список наиболее сильных нагонных наводнений за весь период наблюдений на посту Азов представлен в таблице 1. Существенный материальный ущерб от нагонов определяет необходимость оценки риска возникновения этих опасных явлений.

Современный анализ риска опасных явлений базируется на определении риска как произведении оценки тяжести последствий опасного события на величину вероятности его осуществления, количественно отражающую возможность наступления неблагоприятной ситуации. При этом трудности возникают как при оценке вероятности, так и при оценке тяжести последствий. В первом случае это связано с тем, что, согласно классическому определению, вероятность вводится как частота однородных событий, происходящих в неизменных внешних условиях, чего при фактическом управлении территорией достичь почти невозможно. С другой стороны, мало внимания уделено оценке ожидаемых последствий, которая основана на комбинации наблюдений и мнений экспертов. Как следствие, отсутствуют количественные исследования

неопределенностей, связанных с этой частью анализа риска. Неспособность включить неопределенности в расчет риска может привести к существенным несоответствиям или создать ложную уверенность в достоверности полученных оценок.

Таблица 1. Штормовые нагоны в дельте р. Дон, приведшие к подъему уровня воды выше отметки опасного

Дата	Максимальный уровень на посту Азов, м БСВ
14 марта 1914 г.	2,11
13 мая 1926 г.	2,11
24 февраля 1958 г.	2,00
31 октября 1970 г.	2,21
28–30 июня 1980 г.	2,16
20–23 апреля 1981 г.	2,30
15–17 ноября 1992 г.	2,34
10–14 апреля 1997 г.	2,58
28 февраля – 2 марта 2005 г.	2,28
23–25 марта 2013 г.	2,38
24–25 сентября 2014 г.	2,81

Байесовские сети (БС) известны как один из способов явного моделирования неопределенностей в вероятностной форме. Потенциал использования БС для оценки опасных явлений 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 исследуемой системы и характера её функционирования.

БС применялись для оценки различных опасных природных явлений: землетрясений [Bayraktarli, Faber, 2011], цунами [Blaser et al., 2011], наводнений [Balbi et al., 2016], оползней [Song et al., 2012], снежных лавин [Grêt-Regamey, Straub, 2006] и др.

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 [Grêt-Regamey, Straub, 2006; Balbi et al., 2016] при использовании БС никем не рассматривается пространственный аспект, что крайне важно в задачах пространственного планирования.

В настоящей работе рассматривается оценка риска нагонных явлений в дельте р. Дон, выполненная методами вероятностного вывода на базе гео-модели [Кулыгин, 2017а].

Материалы и методы исследований

Байесовские сети являются одной 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 ($X = x_1, \dots, x_n$), определяемого как

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

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. В этом исследовании мы ограничимся переменными с дискретными состояниями.

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

Процедура анализа с использованием БС заключается в следующем:

- построение графа БС (выбор узлов и связей между ними);
- определение распределений вероятностей для узлов (маргинальные распределения) и дуг (условные распределения);
- расчет априорного распределения целевой переменной (например, ущерб от природной опасности);
- расчет апостериорных распределений вероятности для конкретных ситуаций/сценариев путем замены априорных распределений некоторых переменных на конкретные значения, наблюдающиеся в этой ситуации.

Байесовская сеть для оценки риска нагонных явлений. Риски, рассматриваемые в настоящем исследовании, включают стоимость поврежденных зданий, а также расходы, связанные с социальными потерями. Из последних мы рассматриваем случаи смерти и потерь здоровья населения в зданиях. Потери на сельскохозяйственных участках, травмы птицы и скота, затраты на очистку, ущерба инфраструктуре и сооружениям не включены в анализ; добавление этих факторов в модель на более позднем этапе работ не представляется сложным.

На рисунке 1 показана БС для процедуры оценки риска нагонных наводнений. Красным цветом выделены входные узлы; голубым – переменные узлы, введенные для представления причинно-следственных связей в системе; а синие узлы характеризуют итоговое выражение риска.

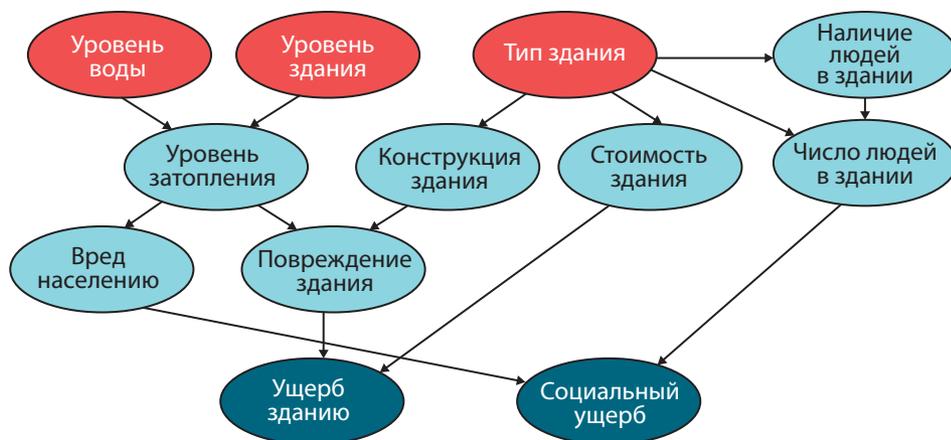


Рис. 1. Байесовская сеть для оценки последствий нагонного наводнения в дельте р. Дон

В общем виде структура оценки риска может быть представлена тремя компонентами: «опасность», «подверженность» и «уязвимость». Компонент «опасность» описывает вероятность возникновения потенциально опасных явлений. В предложенной БС он выражается как годовая вероятность подъема уровня воды в дельте до определенной отметки (узел «Уровень воды»). «Подверженность» системы описывается вероятностью того, что здание будет затоплено. Несколько узлов моделируют «уязвимость» системы, т. е. тяжесть последствий воздействия наводнения на здания или людей. Наконец, узлы, определяющие ожидаемый ущерб в зависимости от числа пострадавших людей и степени физического повреждения домов, выражены в монетарных оценках.

Интеграция БС с геоинформационной системой (ГИС) основана на геопространственном представлении региона исследования. Для этого геосистема делится на пространственные единицы так, чтобы они естественным образом отражали пространственные особенности воздействия природных опасностей на геосистему и специфику хозяйственной деятельности. Каждая пространственная единица представляет собой геообъект, который может рассматриваться как отдельный элемент, сложившийся в результате взаимодействия геологических, геоморфологических, океанографических, климатических и антропогенных факторов [Кулыгин, 2017б].

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 (населенные пункты, 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).

Для каждого элементарного пространственного элемента задается свой экземпляр БС и выполняется статистический вывод:

- входные узлы БС инициализируются значениями из пространственных наборов данных;

- случайные переменные, представленные пространственными наборами данных, сначала получают означивание (вероятностное распределение в узле заменяется конкретным значением), а затем выполняется вероятностный вывод;

- значения целевых переменных БС для каждого пространственного элемента возвращаются в ГИС и могут быть отображены на карте.

Источники данных. Оценка риска выполнялась для населенных пунктов, т. к. именно там сосредоточено подавляющее большинство зданий, основное имущество и объекты, подверженные риску. Всего в регионе дельты р. Дон расположено 23 сельских поселения и город Азов. Для выбранных населенных пунктов были охарактеризованы узлы предложенной БС.

Для узла «Уровень воды» были определены четыре состояния, соответствующие сценариям подъема уровня воды с различным периодом повторяемости: 1 год, 10, 50 и 100 лет. По данным наблюдений за уровнем моря на гидропостах на основе методов экстремальной статистики были определены значения уровня воды, соответствующие каждому сценарию, и их вероятности, составившие 0,87, 0,10, 0,02 и 0,01 соответственно. Величины подъема уровня составили 0,85, 2,12, 2,50 и 2,90 м БСВ соответственно. Следует отметить, что для характеристики интенсивности наводнений в дельте р. Дон для гидропоста Азов Росгидрометом определены две отметки «неблагоприятного явления» и «опасного явления», равные 1,1 м и 2 м БСВ. Это означает, что «опасные» нагонные наводнения в среднем возникают один раз в 10 лет.

При подготовке информации о зданиях каждого населенного пункта использовались данные кадастровой оценки Ростовской области [Официальный портал ... 2017], материалы OpenStreetMap (<http://openstreetmap.ru>) и WikiMapia (<http://wikimapia.org>). Некоторая информация (о типе конструкции и этажности зданий) уточнялась по свободным данным публичной кадастровой карты (ПКК) Росреестра (<http://pkk5.rosreestr.ru/>). Невозможность полноценно использовать интернет-сервис ПКК в качестве единственного источника связана с несколькими причинами:

- здания (в отличие от кадастровых участков) в ПКК представлены недостаточно полно (по грубым оценкам, для исследуемого региона в ПКК присутствует информация только о 10 % зданий);

- информация в ПКК не всегда является актуальной;

– лицензионное соглашение об условиях использования ПКК существенно ограничивает возможности работы с данными.

При подготовке списка зданий крупных населенных пунктов, большая часть территории которых находится на возвышенности (г. Азов, с. Кагальник), рассматривались только объекты, попадающие в возможную область затопления.

В соответствии с уровнями подъема воды для узла «Уровень здания» были выбраны следующие градации высот уровня поверхности грунта в месте строительства здания (далее для краткости будем называть это уровнем здания): менее 0,85 м, от 0,85 до 2,12 м, от 2,12 до 2,50 м, от 2,50 до 2,90 м БСВ. Для определения высот использовалась цифровая модель рельефа дельты р. Дон с разрешением 10 м. В качестве распределения для каждого населенного пункта использовалась гистограмма величин уровня зданий, находящихся на территории этих населенных пунктов (рис. 2А).

Узел «Уровень затопления» представлен четырьмя категориями, характеризующими величину слоя воды над застроенной территорией, и, соответственно, степень опасности – «Подтопление», «Наводнение», «Сильное наводнение», «Катастрофическое наводнение». Таблица условных вероятностей заполнялась экспертно на основе разности между уровнем подъема воды и уровнем зданий.

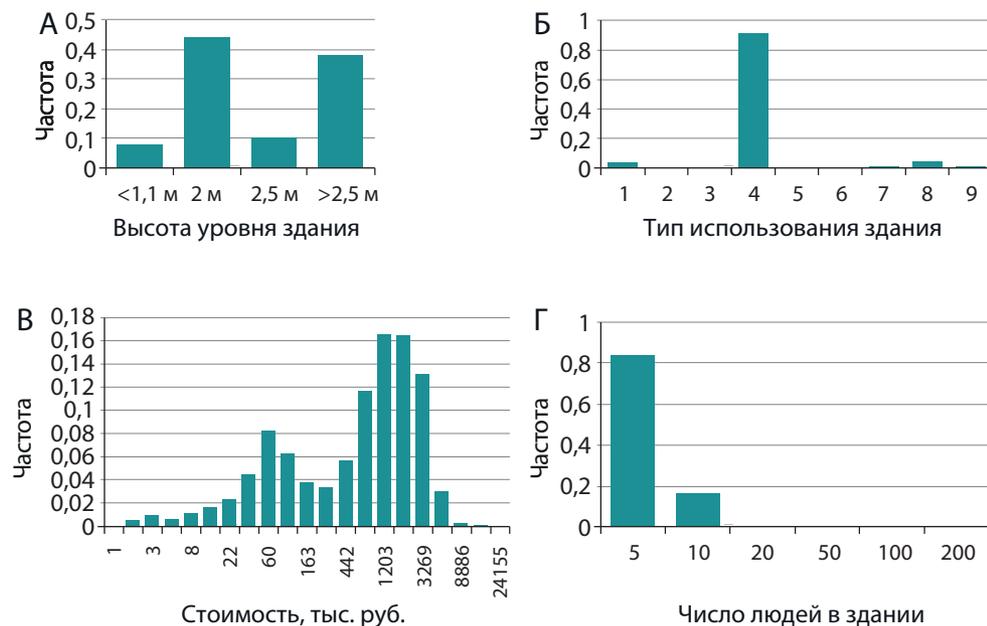


Рис. 2. Примеры гистограмм (рассматривается хутор Обуховка): А) распределение уровней зданий; Б) распределение типов использования зданий (см. далее в табл. 2); В) распределение стоимости жилых домов (для типа использования зданий 4); Г) распределение численности людей в жилых домах (для типа использования зданий 4)

Рассматриваемые типы использования зданий и их конструкций представлены в таблицах 2, 3 соответственно. Оценка распределений выполнялась по гистограммам. Для каждого населенного пункта было построено свое распределение по типам зданий (рис. 2Б). Из-за ограниченного объема доступной информации условное распределение типов конструкций по типам зданий было общее для всех пунктов. Подобное упрощение допустимо, т. к. весьма вероятным выглядит предположение об использовании единых конструкторских решений при строительстве зданий в одном регионе.

Таблица 2. Типы использования зданий

№	Тип здания
1	Производственные здания, строения промышленности, коммунального хозяйства, материально-технического, продовольственного снабжения
2	Образовательные учреждения
3	Объекты здравоохранения и социального обеспечения
4	Жилые дома
5	Объекты досуга, искусства, культуры, религии
6	Гостиницы, отели
7	Объекты торговли, общественного питания и бытового обслуживания
8	Подсобные, хозяйственные постройки
9	Административные и офисные здания

Таблица 3. Тип конструкции зданий

№	Тип конструкции
1	Деревянные дома
2	Кирпичные малоэтажные здания (1–2 этажа)
3	Кирпичные дома повышенной этажности (3 этажа и более)
4	Здания с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом

В качестве стоимости зданий использовались значения кадастровой оценки по данным [Официальный портал ... 2017]. В пределах выбранных населенных пунктов были построены гистограммы стоимости зданий разных типов, на основе которых получены таблицы условных распределений (рис. 2В).

Таким образом, для каждого населенного пункта были получены собственные распределения уровней зданий, их типов и стоимости.

Узел «Повреждение здания» выражает оценку уязвимости. Для него были выделены четыре возможных состояния: «нет повреждений», «незначительные», «средние», «значительные». Величины уязвимости зданий разных конструкций к затоплению разной интенсивности определялись согласно реко-

мендациям МЧС [Методика определения ... 2007] и составили в долях от стоимости здания 0, 0,1, 0,3, 0,7 соответственно.

Ущерб зданию выражался как произведение доли повреждения здания (уязвимости) на его стоимость.

Узел «Наличие людей в здании» имеет два состояния: «да» и «нет». Распределение вероятностей определялось по формуле:

$$p_i(\text{да}) = (C_i \cdot D_i) / (24 \cdot 7),$$

$$p_i(\text{нет}) = 1 - p_i(\text{да}),$$

где C_i – средняя продолжительность присутствия в зданиях типа i в часах в течение дня, D_i – средняя продолжительность присутствия в зданиях типа i в днях в течение недели, $i = 1 \dots 9$.

Распределения для узла «Число людей в здании» представлены гистограммами (рис. 2Г), сгенерированными из нормальных распределений, для которых среднее значение задавалось как среднее число людей в здании определенного типа, а среднеквадратичное отклонение определялось экспертно.

Для узла «Вред населению» были определены три состояния: «не причинен», «потеря здоровья» и «смерть». В качестве показателя среднего вреда здоровью одного человека выбрана средняя страховая сумма выплат при наступлении несчастного случая, связанного с потерей трудоспособности в России (48 тыс. руб. на душу населения [Бабурин и др., 2015]). В качестве оценки ущерба в случае смерти выбрана выплата при потере кормильца семьи (примерно 2 млн руб. [Бабурин и др., 2015]).

Социальный ущерб определялся как результат умножения числа жителей, присутствующих в здании, на величины ущерба, определенные для разных типов вреда населению.

Суммарный ущерб рассчитывался как сумма ущерба зданиям и социального ущерба.

При оценке каждого пространственного объекта на вход сети подавались распределения, полученные для соответствующего населенного пункта. На выходе получались распределения вероятности ущерба для зданий, социального и общего ущерба. В этом итоговом распределении общего ущерба выражено суммарное воздействие неопределенности каждого фактора, используемого при расчете. Оценить неопределенность в каждом населенном пункте можно, определив границы 95 % байесовского доверительного интервала общего ущерба, рассчитываемого на основе распределения как $[F^{-1}(0,025), F^{-1}(0,975)]$, где F^{-1} – обратная функция распределения вероятности общего ущерба.

Результаты и обсуждение

Среднегодовые величины ущербов, рассчитанные с использованием БС, представлены на рисунке 3. В соответствии с величиной ущерба были выделены несколько групп населенных пунктов.

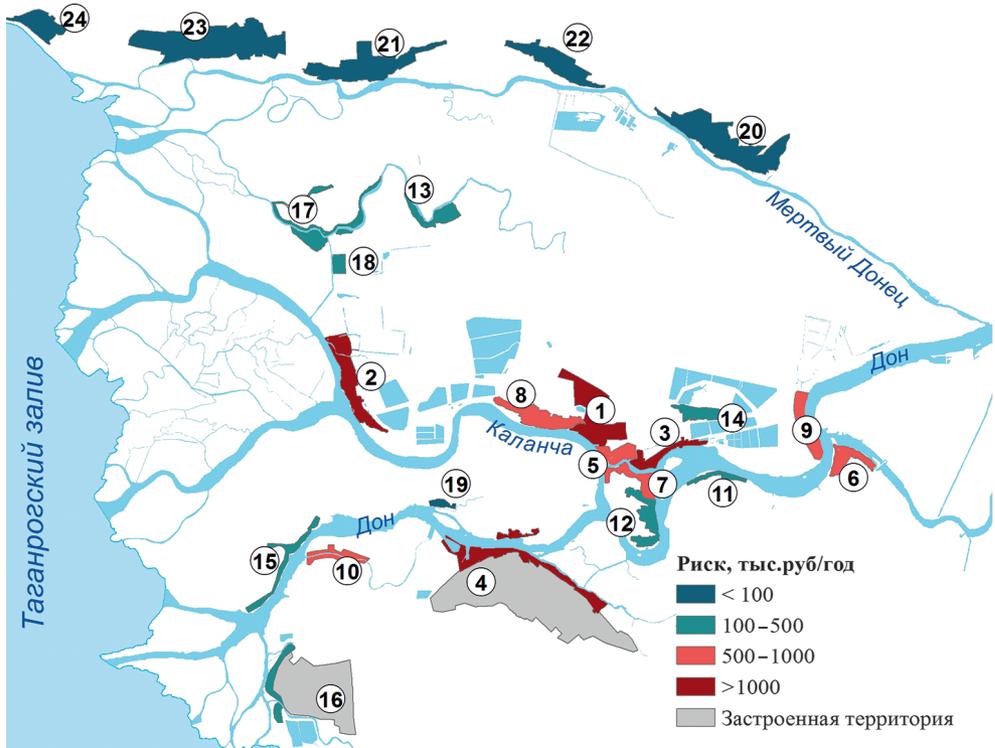


Рис. 3. Среднегодовой риск для населенных пунктов дельты р. Дон: 1 – х. Обуховка, 2 – х. Рогожкино, 3 – х. Курган, 4 – г. Азов, 5 – х. Казачий Ерик, 6 – х. Усть-Койсуг, 7 – ст. Елизаветинская, 8 – х. Дугино, 9 – х. Колузаево, 10 – х. Узьяк, 11 – х. Шмат, 12 – х. Коса, 13 – х. Полушкин, 14 – х. Городище, 15 – х. Донской, 16 – с. Кагальник, 17 – х. Лагутник, 18 – пос. Топольки, 19 – х. Петровский, 20 – х. Калинин, 21 – х. Недвиговка, 22 – х. Хапры, 23 – с. Синявское, 24 – х. Морской Чулек

В группу с самым незначительным ущербом (не превышающим 100 тыс. руб/год) попали населенные пункты, расположенные на правом (северном) высоком берегу: с. Синявское, х. Морской Чулек, х. Недвиговка, х. Хапры, х. Калинин. В эту группу также попал х. Петровский, но уже в силу общего малого числа зданий и их сравнительно невысокой стоимости.

Вторую группу (среднегодовой ущерб до 500 тыс. руб/год) составляют небольшие, но регулярно затапливаемые населенные пункты, расположенные в передней части дельты (х. Донской, х. Полушкин, х. Лагутник, п. Топольки, с. Кагальник), вдоль основного рукава Дона (х. Коса, х. Шмат), и х. Городище, находящийся на относительной возвышенности.

В третью группу (среднегодовой ущерб до 1 млн руб/год) попали населенные пункты, расположенные в центральной части дельты. Основное отличие в величине ущерба между пунктами заключается в разном количестве объектов, подверженных воздействию, и стоимости этих объектов.

В четвертой группе сосредоточены поселения с наиболее высокими ожидаемыми среднегодовыми ущербами (более 1 млн руб/год). В г. Азове в зону подтопления попадает портово-промышленная зона и район города Задонье, расположенный на правом берегу рукава Старый Дон. Наибольший ущерб определен для х. Рогожкино (1,6 млн руб/год) и х. Обуховка (1,7 млн руб/год). Полученное пространственное распределение ущербов частично отражает тот факт, что наибольшее воздействие нагона обычно приходится на правобережные наветренные участки водотоков дельты.

В таблице 4 представлены результаты расчета ущерба по населенным пунктам для нагонов с разным периодом повторяемости. Для большинства пунктов характерно, что самый низкий риск связан с частыми, но слабыми наводнениями. В некоторых пунктах, напротив, наибольшие среднегодовые риски связаны с самыми частыми событиями. Это объясняется тем, что количество объектов, подверженных затоплению в этих пунктах как при сильных, так и при слабых наводнениях, меняется незначительно, поэтому среднегодовой риск для более редких событий снижается.

Суммарный ущерб всем населенным пунктам дельты р. Дон от нагона с периодом повторяемости 50 лет составил около 190 млн руб., или 3,8 млн руб/год; для нагона с периодом повторяемости 100 лет – около 680 млн руб. и 6,8 млн руб/год соответственно. Для сравнения ущербы от двух катастрофических нагонов в марте 2013 и сентябре 2014 г. (максимальные отметки уровня – 2,4 м и 2,81 м БСВ соответственно) оценены в 404 млн руб. и 564 млн руб. соответственно [Матишов и др., 2017]. Кривая риска суммарного ущерба всем населенным пунктам дельты р. Дон от нагонных явлений представлена на рисунке 4.

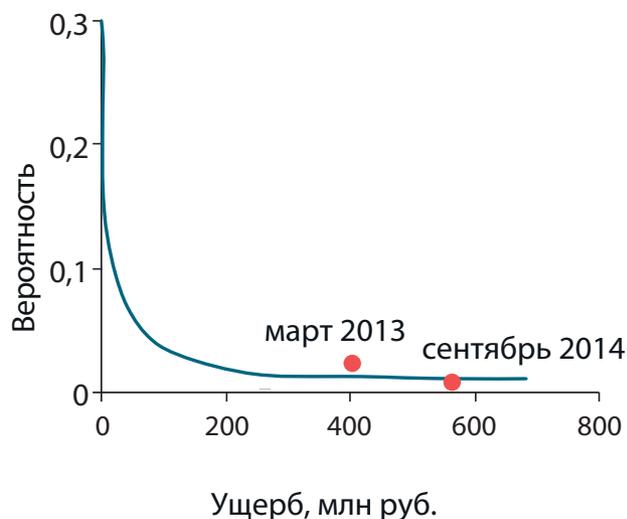


Рис. 4. Кривая риска нагона в дельте р. Дон. Кружки соответствуют двум катастрофическим нагонам в марте 2013 и сентябре 2014 г.

Таблица 4. Среднегодовой ущерб (тыс. руб/год) населенным пунктам дельты р. Дон от нагонов с разным периодом повторяемости

№	Населенный пункт	Период повторяемости		
		10 лет	50 лет	100 лет
1	х. Обуховка	254	483	843
2	х. Рогожкино	180	459	879
3	х. Курган	243	402	642
4	г. Азов	144	332	604
5	х. Казачий Ерик	179	253	368
6	х. Усть-Койсуг	158	248	381
7	ст. Елизаветинская	49	236	500
8	х. Дугино	91	233	475
9	х. Колузаево	30	212	539
10	х. Узьяк	155	188	244
11	х. Шмат	142	133	129
12	х. Коса	20	120	291
13	х. Полушкин	80	116	170
14	х. Городище	41	103	221
15	х. Донской	72	99	145
16	с. Кагальник	39	83	155
17	х. Лагутник	44	57	78
18	пос. Топольки	8	39	84
19	х. Петровский	1	12	29
20	х. Калинин	10	6	3
21	х. Недвиговка	6	3	5
22	х. Хапры	11	2	1
23	с. Синявское	3	2	1
24	х. Морской Чулек	3	1	1
	Всего	1963	3820	6787

Для иллюстрации анализа неопределенности на рис. 5 представлены величины среднего ожидаемого риска (математическое ожидание) и верхней границы доверительного интервала для нагона с периодом повторяемости 50 лет. Максимальные значения доверительного интервала (6,2 млн руб. – х. Обуховка) значительно превышают максимальные ожидаемые ущербы

(0,48 млн руб. – х. Обуховка). В среднем по всем населенным пунктам верхняя граница доверительного интервала в 10 раз больше величины ожидаемого ущерба.

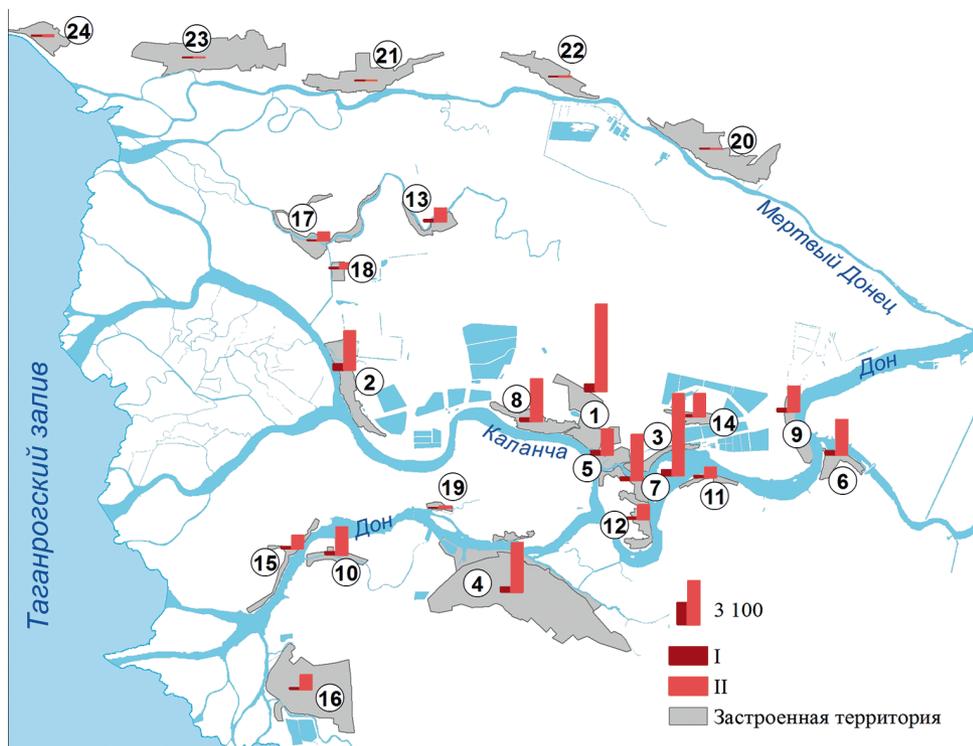


Рис. 5. Средний ожидаемый риск (I) и верхняя граница байесовского доверительного интервала (II) для нагона с периодом повторяемости 50 лет в дельте р. Дон

Сравнение ожидаемых затрат с верхней границей доверительного интервала позволяет оценить уверенность в результатах оценки среднего значения и определить области наибольшей потенциальной ошибки. Карта, содержащая только величины ожидаемых ущербов, давала бы ложное впечатление точности получаемых оценок.

Одним из способов снижения полученной высокой неопределенности является переход с уровня оценки населенных пунктов на уровень оценки отдельных зданий. При этом предложенная БС может использоваться без изменений. Подробная информация о зданиях позволит в большем числе узлов заменить вероятностное распределение на конкретное значение, а следовательно, уточнить итоговую оценку риска.

Заключение

Анализ рисков опасных природных явлений остается сложной задачей, для решения которой необходим учет многих факторов, имеющих разную природу.

Предложенная модельная конструкция оценки рисков нагонных явлений в дельте р. Дон основана на вероятностном подходе – использовании байесовских сетей совместно с ГИС. В БС включены компоненты, связанные с вероятностью возникновения опасного явления, а также компоненты для расчета ущерба, поскольку он зависит не только от интенсивности наводнения, но и от свойств объектов. Согласно расчетам, суммарный ущерб для всех населенных пунктов дельты р. Дон от нагонов с периодами повторяемости 50 и 100 лет составил около 190 млн руб. и 680 млн руб. соответственно.

Явный учет неопределенностей в БС позволяет подготавливать обоснованные оценки риска для лиц, принимающих решения. Кроме того, доверительные интервалы, представленные на картах, способствуют пространственной интерпретации риска. Наконец, поскольку БС обеспечивает моделирование различных взаимозависимостей, вызванных общими причинными факторами, такой подход имеет большой потенциал для анализа различных типов рисков в одной системе, что заслуживает дальнейшего изучения.

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 01201363188; а также гранта РФФИ № 16-35-60043 мол_а_дк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабурин В.Л., Горячко М.Д., Фадеев М.С., Земцов С.П., Кидяева В.М. Оценка социально-экономических рисков и ущербов от опасных гидрологических явлений (на примере Славянского района Краснодарского края) // Геориск. 2015. № 3. С. 45–53.

Кулыгин В.В. Геоинформационная модель оценки рисков опасных природных явлений на основе байесовских сетей // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017а. Т. 1. № 2. С. 66–72.

Кулыгин В.В. Подход к оценке рисков опасных природных явлений в морехозяйственных системах // Проблемы анализа риска. 2017б. Т. 14. № 2. С. 64–73.

Матишов Г.Г., Бердников С.В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // Известия РАН. Серия географическая. 2015. № 3. С. 111–118.

Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Яцкая Н.А. Природные катастрофы в Азово-Черноморском бассейне в начале XXI века. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. 160 с.

Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений: Приказ МЧС России и Минтранса России от 02.10.2007 г. № 528/143.

Официальный портал Правительства Ростовской области. Государственная кадастровая оценка. URL: <http://www.donland.ru/economy/Kadastr/?pageid=127982> (дата обращения: 05.06.2017).

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. No. 16. P. 1323–1337.

Bayraktarli Y.Y., Faber M.H. Bayesian probabilistic network approach for managing earthquake risks of cities // *Georisk.* 2011. No. 5. P. 2–24.

Blaser L., Ohrnberger M., Riggelsen C., Babeyko A., Scherbaum F. Bayesian networks for tsunami early warning // *Geophys. J. Int.* 2011. No. 185. P. 1431–1443.

Grêt-Regamey A., Straub D. Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006. No. 6. P. 911–926.

Song Y., Gong Gao J.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. No. 42. P. 189–199.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кулыгин Валерий Валерьевич – к.т.н., зав. лаб. ЮНЦ РАН; kulygin@ssc-ras.ru