

Возможности оценки риска безопасности дорожного движения на перекрестках с помощью новых методов

М. Юнгханс,
канд. техн. наук,
руководитель отдела телематики и сбора информации о движении транспортных средств
Немецкого центра воздушного и космического движения (DLR) Института системотехники дорожного движения (Германия)

К. Коцемпель,
канд. физич. наук,
научный сотрудник отдела программного обеспечения DLR (Германия)

Х. Саул,
научный сотрудник отдела программного обеспечения DLR (Германия)

По данным Европейского общества дорожной безопасности ERSO в 2011 г. в ДТП погибло 30 000 человек (ERSO, 2013). И хотя в ряде стран, например Германии, ситуация с аварийностью заметно улучшилась – число погибших в ДТП в 2013 г. составило менее 3500 человек против 20 000 в 1970 г., – потребность в поиске новых, более совершенных средств расследования ДТП и обнаружения вызывающих их причин по-прежнему сохраняется [1].

Сегодня крайне важно использовать существующие технологии и технические средства (пространственные и временные датчики, камеры, радары и лазеры) для сбора данных о ДТП и дорожных ситуациях, которые могли бы привести к опасным ситуациям или происшествиям. Рис. 1 показывает сложность расследования таких ситуаций, особенно на перекрестках с повышенной аварийностью (в следствии множества причин, способных вызвать ДТП). Системное использование современных технических средств и технологий позволит определять причины ДТП и опасных ситуаций, а также выявлять возможности их минимизации, чтобы разрабатывать меры, направленные на дальнейшее по-

вышение безопасности дорожного движения. Для достижения заявленного ЕС уровня снижения числа погибших в ДТП к 2020 г. в два раза или более амбициозных целей в соответствии с принятой в Швеции инициативой под названием Vision Zero (отсутствие погибших в ДТП, или «нулевая смертность») европейским исследователям в сфере безопасности дорожного движения необходимо незамедлительно создать инструмент, способный защитить жителей стран ЕС и серьезно уменьшить количество и тяжесть ДТП [2].

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие требования:

- механизм формирования уровня безопасности дорожного движения должен быть хорошо осмысленным и измеримым с возможностью его количественной и качественной оценки;
- данные по безопасности движения должны быть доступными для любой географической области;
- должны осуществляться постоянные усилия по повышению дорожной безопасности строительными и организационно-техническими мерами;
- участникам дорожного движения до и в ходе поездки должен быть обеспечен доступ к информации о потенциальных очагах аварийности, а также мерах предупреждения опасных ситуаций и вспомогательные сведения.

Рассмотрим подход, позволяющий добиться выполнения перечисленных требований, его возможности и ограничения.

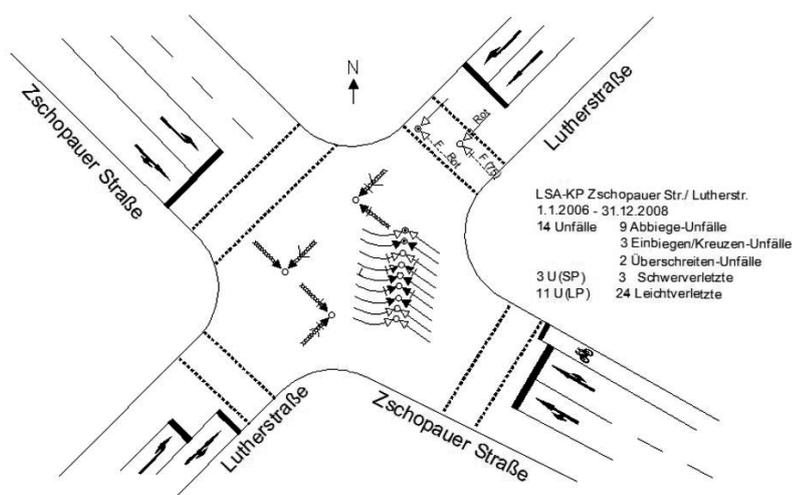


Abb. 4.6: Unfalldiagramm 3-JK 2006-2008 LSA-KP Zschopauer Straße/ Lutherstraße

Рис. 1. Диаграмма ДТП на перекрестке с повышенной аварийностью (Цшопауэр-штрассе и Лютерштрассе в г. Кемниц)

Методы и результаты

Для квалифицированной оценки и заключения о безопасности движения необходимо поэтапно выполнить представленные ниже действия.

Классический подход

В соответствии с классическим подходом для оценки безопасности движения в качестве основы используются классификация ДТП по типу, виду и тяжести. Этот метод имеет два существенных недостатка:

- не всегда удается точно определить сопутствующие обстоятельства, которые могли привести к происшествию;
- для регистрации ДТП (особенно ДТП с тяжелыми или смертельными последствиями) необходимо, чтобы ДТП действительно произошло. В то же время, если рассматривать осмысленные опасные ситуации, то заключение о безопасности движения можно сделать и без данных о ДТП.

В связи с этим уже в 1950-х годах была предложена концепция регистрации опасных (до ДТП) ситуаций, позволяющая оценивать безопасность объектов транспортных систем по параметрам опасных ситуаций (т. е. по «суррогатным показателям»), однако исследователям до сих пор не удалось определить функциональную взаимосвязь ДТП и опасных (критических) ситуаций. Современные технологии видеонаблюдения, радарной детекции и лазерных датчиков предоставляют новые возможности для объективной оценки дорожной ситуации. Для этого необходимо создать автоматизированную систему регистрации участников движения и анализа дорожных ситуаций. Одним из возможных способов решения этих задач является способ построения траекторий движения объектов (т. е. перемещений в дорожной среде во времени и пространстве).

Построение траекторий движения объектов

Для оценки безопасности движения необходимо обеспечить своевременное распознавание участников движения и их взаимодействие с другими объектами, а также прогнозирование их поведения. Для этого в центре DLR разработан проект по оснащению выбранных узловых точек улично-дорожной сети современными датчиками для регистрации дорожной ситуации. В частности, перекресток улиц Рудовер-шоссе и Вегедорнштрассе

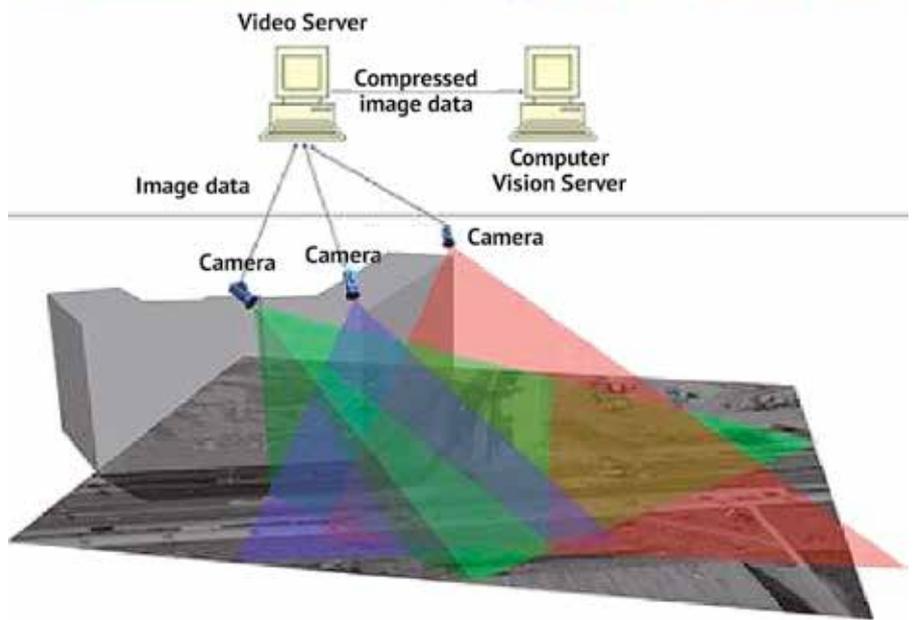


Рис. 2. Система из нескольких камер: размещение камер (вверху, ©googlemaps), схема работы (внизу)

был оборудован системой из нескольких камер (рис. 2), позволяющей распознавать, классифицировать и отслеживать объекты. Именно отслеживание объектов позволяет строить их траектории. Наложение траекторий объектов, движущихся через узловую точку сети, создает пространственно-временную модель движения, которая облегчает оценку дорожной ситуации и, соответственно, общую оценку безопасности движения.

Для построения траектории необходимы следующие действия:

- распознавание объекта — отделение движущегося переднего плана (участники движения) от неподвижного заднего плана;

- классификация объектов — классификация распознанных объектов по классам ТС (легковые или грузовые автомобили, велосипедисты и т.д.);

- отслеживание объекта — построение пути классифицированного объекта для создания траекторий с помощью адаптивных фильтров (рис. 3).

Анализ дорожной ситуации

Под дорожной ситуацией понимаются следующие аспекты движения и безопасности:

- аспекты дорожного движения — распознавание критических ситуаций (в частности, транспортных коллапсов, т. е. переходов от нерегулируемого к



Рис. 3. Регистрация перемещений с помощью инструмента распознавания фона (вверху) и технологии отслеживания (внизу)

регулируемому движению или переходов от регулируемого движения к состоянию переполнения), нежелательных с точки зрения организации движения;

- аспекты безопасности — регистрация ДТП; регистрация и различение нестандартных и опасных ситуаций.

Регистрация нестандартных ситуаций

Под нестандартными ситуациями подразумеваются такие, которые отличаются от стандартных, но не представляют опасности в данный момент. Примерами нестандартных ситуаций являются случаи езды по зигзагообразной траектории на улице с малоинтенсивным движением, развороты в неподходящем месте, неожиданные торможения или перестроения, а также проезд на запрещающий сигнал светофора. Нестандартная ситуация может перерасти в критическую.

Для определения нестандартных ситуаций используются два подхода:

- создается нейронная сеть в виде самоорганизующейся карты характеристик (SOFM), которая обучается на базе существующих траекторий. Вектор признака F состоит из положения (x, y) , скорости (v_x, v_y) и ускорения (a_x, a_y) , причем под функционалом s понимается функция с определенной

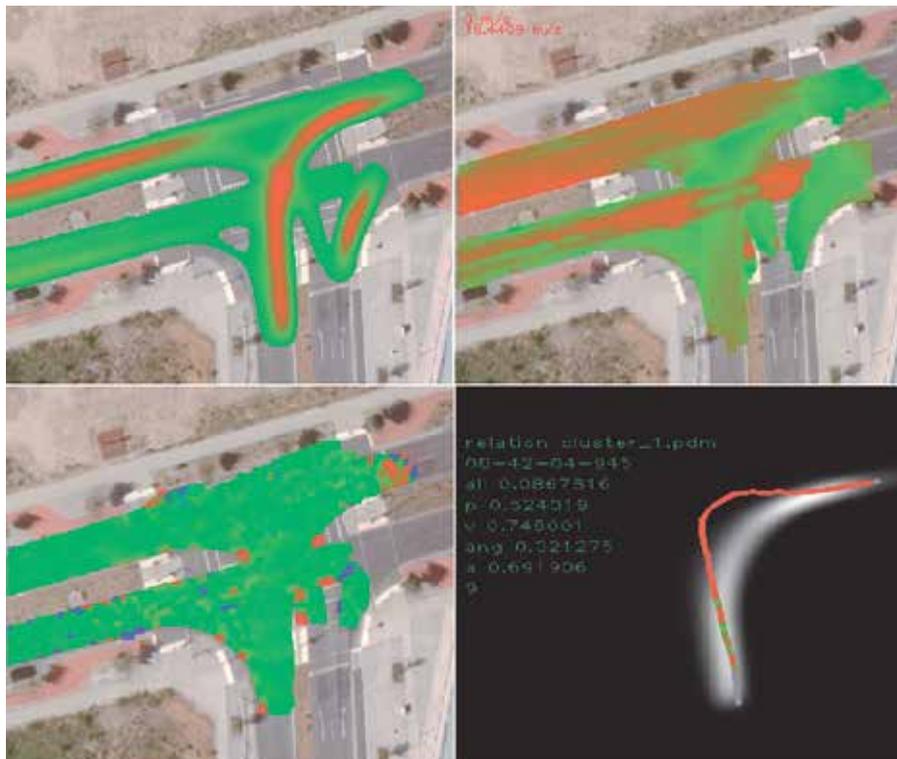


Рис. 4. Распознавание нестандартных ситуаций. Слева сверху: штатное положение, справа сверху: штатные скорости, слева внизу: штатные ускорения, справа внизу: нестандартная траектория

величиной, аппроксимирующая дискретные значения:

$$F = (x, y, s(x), s(y), s(v_x), s(v_y), s(a_x), s(a_y))^T$$

Обучение завершается в момент выполнения определенного критерия прерывания. После обучения карты SOFM образуются частые сочетания признаков, которые описывают штатную ситуацию. Нестандартные сочетания признаков, напротив, встречаются редко. Таким образом, особенно редкие события можно зафиксировать путем простого «наблюдения» за картой SOFM;

на основе «стандартных» траекторий создается двумерная функция плотности распределения вероятности (Probability Density Map, PDM). В результате «стандартная» траектория вписывается в эту функцию, а нестандартная траектория отличается от нее (рис. 4)

Регистрация опасных (критических) ситуаций

Под опасными ситуациями понимаются те ситуации, которые напрямую или косвенно приводят или могут привести к ДТП. Примером является движение с серьезным превышением скорости или с большой скоростью при небольшой дистанции до впереди идущего ТС, а также езда по полосе встречного движения.

Для описания опасных ситуаций определяются так называемые суррогатные величины, количественно выражающие предстоящее ДТП или опасную ситуацию. Такими величинами являются в том числе время до столкновения (time-to-collision, TTC), т. е. отношение дистанции Δx между двумя ТС и разницы скоростей их движения $\Delta v = v_0 - v_1$

$$TTC = -\frac{\Delta x}{\Delta v} \Big|_{v_1 > v_0}$$

где v_0 — скорость впереди идущего ТС, v_1 — скорость следующего за ним ТС, или показатель торможения, необходимого для предотвращения ДТП (deceleration to avoid the crash, DRAC), который равен:

$$DRAC = \frac{\Delta v^2}{2\Delta x} = \frac{\Delta v}{2TTC}$$

Значения TTC можно классифицировать следующим образом:

- TTC < 3 с: подготовься к предстоящей ситуации;
- TTC < 2 с: срочно предприни меры для предотвращения ситуации;
- TTC < 1 с: ДТП практически неизбежно.

По аналогии с TTC большие значения замедления DRAC являются критическими. Так, о критической ситуации можно говорить в том случае, если DRAC > 5 м/с².

На рис. 5 представлен реализованный принцип определения предстояще-

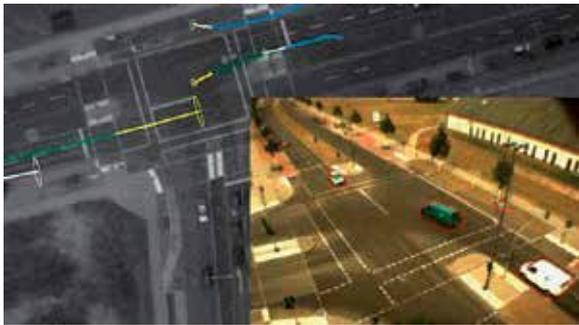


Рис. 5. Прогнозирование столкновений по текущему положению

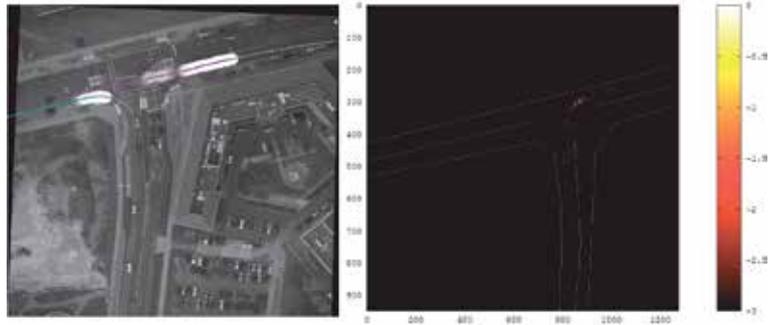


Рис. 6. Перекресток и географическая привязка значений ТТС

го столкновения. На изображении справа внизу выполняется распознавание объектов, а слева сверху для этих объектов строятся и прогнозируются траектории. Если два объекта взаимодействуют между собой из-за низких значений ТТС или высоких значений DRAC, то в этом примере это обозначается белым (нормальная ситуация), желтым (внимание) и красным цветом (ДТП неизбежно).

С помощью этих и других показателей можно регистрировать критические ситуации и их серьезность. После выполнения географической привязки (рис. 6 справа) эти показатели могут использоваться для определения критичных точек улично-дорожной сети и реализации соответствующих мероприятий.

Корреляционный анализ на основе ситуативно-вероятностных экспериментов

После определения степени критичности и штатности дорожной ситуации производится количественная оценка безопасности движения. Для этого целесообразно использовать не только данные о ДТП (классический подход), но и данные о критических ситуациях.

Исследователей уже долгое время занимает вопрос о том, существует ли зависимость между ДТП и критическими ситуациями. Литература и здравый смысл подсказывает, что это так, но неоднократные эксперименты и исследования других перекрестков и участков показывают, что это неоднозначно. В связи с этим все громче раздаются предположения о том, что корреляция будет зависеть от различных условий, например, от следующих:

- время суток, время года, сезон;
- погодные условия;
- дорожная инфраструктура;
- управление движением и регулирование;
- кинематические и динамические

параметры движения (тормоза, рулевое управление, перемещение);

- интенсивность движения;
- водитель, участники движения и уровень их внимания.

Вероятностное моделирование в виде байесовой сети

Комплексный анализ и оценка зафиксированных сведений о ДТП и критических ситуациях становятся возможными при использовании байесовых сетей, которые представляют собой графические модели для обработки данных, объединенных причинно-следственными связями и вероятностями. Байесовы сети — это направленные ациклические графы, узлами которых являются случайные величины (события и ситуации), а стороны описывают причинно-следственные отношения между узлами (рис. 7). При этом узлы, имеющие «продолжение», называются родительскими, а узлы, не имеющие родительских узлов, называются корневыми. Узлы, не имеющие потомков, называются дочерними узлами. Все остальные узлы являются внутренними.

Расчет байесовой сети создает вероятностную модель, количественно отражающую рассматриваемый подход.

Для этого требуются условные таблицы вероятностей, которые определяют совместную вероятность по правилу цепи, так что для любой байесовой сети с узлом x_1, \dots, x_n справедливо:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{x_i} P(x_i | \text{eltern}(X_i))$$

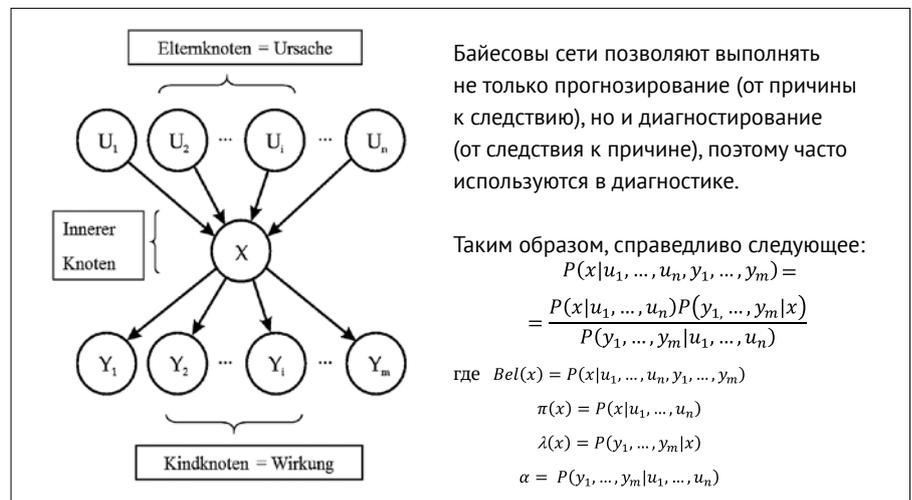
Для сети на рис. 7 справедливо:

$$P(x, u_1, \dots, u_n, y_1, \dots, y_m) = P(u_1, \dots, u_n)P(x|u_1, \dots, u_n)P(y_1, \dots, y_m|x)$$

Количественное выражение причинно-следственных связей с помощью условных вероятностей позволяет определить совместную вероятность сети. Таким образом, с помощью байесовой сети можно количественно выразить не только причинные цепочки, но и обратный случай диагностического вывода путем расчета $Bel(x)$, а также причинные и диагностические показатели $\pi(x)$ и $\lambda(x)$.

Пример данных ДТП

Примером байесовой сети может служить результат анализа ДТП на автомагистрали А2 за 4 года — с 2005 по 2008 — на участке между Брауншвейгом и Берлином с учетом данных о ДТП, интенсивности движения, погоде, времени, категории и состоянии дороги.



Байесовы сети позволяют выполнять не только прогнозирование (от причины к следствию), но и диагностирование (от следствия к причине), поэтому часто используются в диагностике.

Таким образом, справедливо следующее:

$$P(x|u_1, \dots, u_n, y_1, \dots, y_m) = \frac{P(x|u_1, \dots, u_n)P(y_1, \dots, y_m|x)}{P(y_1, \dots, y_m|u_1, \dots, u_n)}$$

где $Bel(x) = P(x|u_1, \dots, u_n, y_1, \dots, y_m)$

$$\pi(x) = P(x|u_1, \dots, u_n)$$

$$\lambda(x) = P(y_1, \dots, y_m|x)$$

$$\alpha = P(y_1, \dots, y_m|u_1, \dots, u_n)$$

Рис. 7. Общая байесова сеть (слева) и ее расчет методом прогнозирования и диагностирования (справа)

Упорядочивание этих данных согласно описанной модели образует причинно-следственный граф (рис. 8 вверху) и итоговую количественную сеть (рис. 8 внизу).

Байесова сеть (рис. 8) позволяет количественно выразить взаимосвязь между различными факторами (корневыми узлами) и результирующим типом опасной ситуации или ДТП. Очевидно, что на предстоящее ДТП влияют различные факторы. Следует, однако, заметить, что каждая опасная ситуация привела к ДТП. Таким образом, формируется причинно-следственная цепь, которая приводит опасную ситуацию к ДТП с определенной тяжестью. Количественно выразив вероятности, мы получим итоговую сеть (рис. 8).

Анализ байесовой сети для различных участков и в контексте интересующих параметров (например, погодных условий или состояния дороги) позволяет сделать выводы и инициировать мероприятия по повышению безопасности. Так осуществляется причинно-следственный анализ.

При диагностировании на основе данных о тяжести ДТП можно создать утверждения об их причинах, в которых уравнение $Bel(x) = \alpha \cdot \pi(x) \cdot \lambda(x)$ рассчитывается для интересующих узлов (например, для интенсивности движения) при заданном дочернем узле (например, тяжести ДТП). В таком случае отношение выражает вероятность наличия определенной интенсивности движения при заданной тяжести ДТП.

При рассмотрении участков магистрали А2 (рис. 9 слева) можно увидеть, что определенные участки встречаются существенно чаще остальных. Этому противопоставлено представление на рис. 9 справа, на котором отражены все ДТП во временной перспективе за 4 года, и которое позволяет определить области с неочевидной концентрацией ДТП, т. е. выявить локальные очаги аварийности, как, например, на 180-м километре дороги (здесь пересекаются две магистрали). Кроме того, становится заметно, что временное рассмотрение ДТП важно и для определения причин происшествий. Например, очевидно, что некоторые ДТП происходят только в определенное время (синий цвет). Особенно наглядно это видно на примере очага аварийности на 270–280-м километре дороги за 2007 г. (дни 800–1000). На этом участке расположен уклон, который провоцировал ДТП в особенности при плохих погодных условиях. Данный участок был реконструирован в 2008 г., что сократило число ДТП.

В качестве обобщения следует отметить, что метод байесовых сетей подходит для наглядного количественного выражения как существующих, так и неизвестных взаимосвязей между интересующими показателями. Важным условием для этого является наличие достаточно большой и статистически значимой базы данных. Кроме того, можно утверждать, что большое значение имеет пространственно-временной анализ произошедших ДТП с учетом различных влияющих факторов (например, типа и состояния дороги, погодных условий и регулирования движения). Представляется целесообразным привлекать для оценки безопасности дорожного движения не только ДТП, но и показатели, описывающие критические ситуации, которые могли привести к ДТП, или показатели, оказывающие прямое или косвенное влияние на ДТП, в том числе функции пространственно-временного распределения действий по торможению и рулению, импульсов систем АБС и ESP, фаз управления LSA, состояния дорожной инфраструктуры и т. д.

Расширение байесовой сети показателями, важными для безопасности

На основе выводов предыдущего раздела будет расширена байесо-

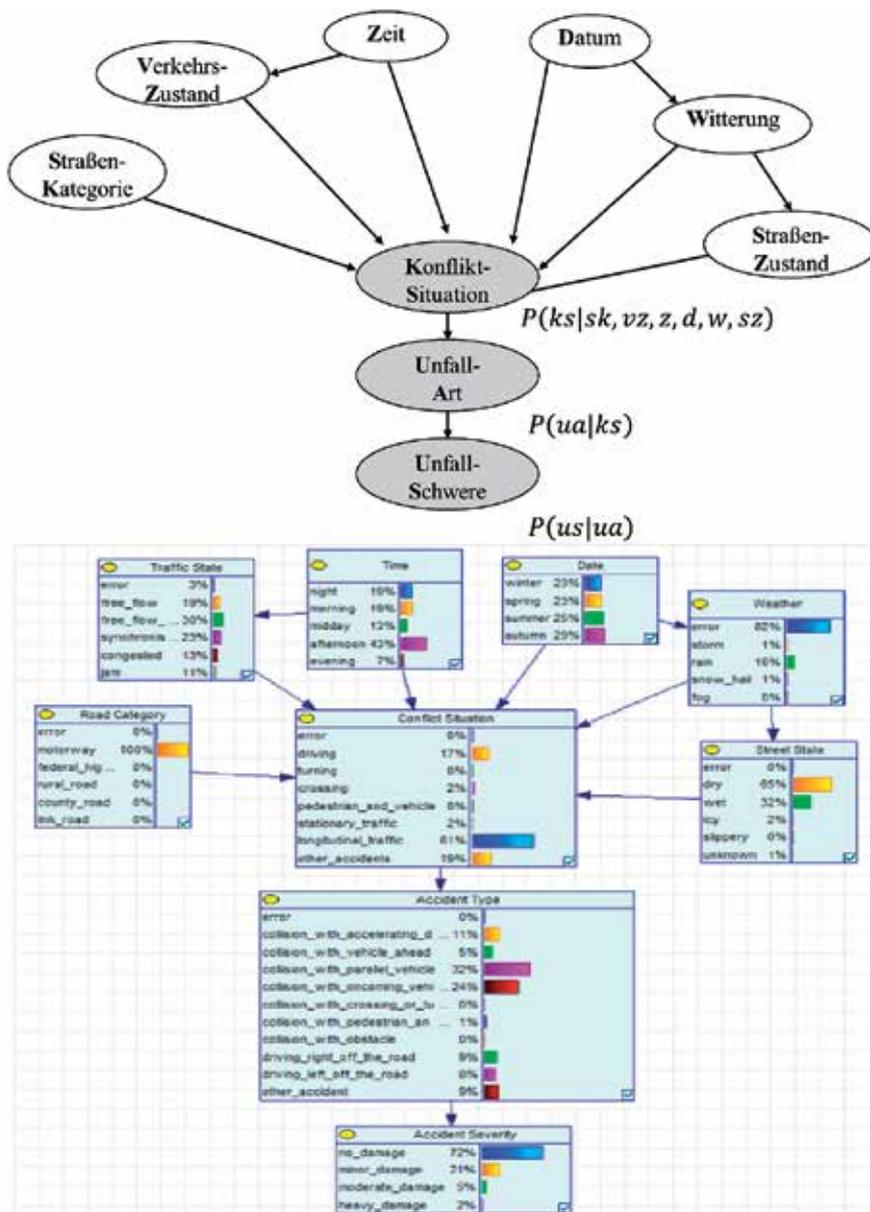


Рис. 8. Анализ данных о ДТП на автомагистрали А2 с помощью байесовой сети: причинно-следственный граф (вверху), количественная сеть (внизу)

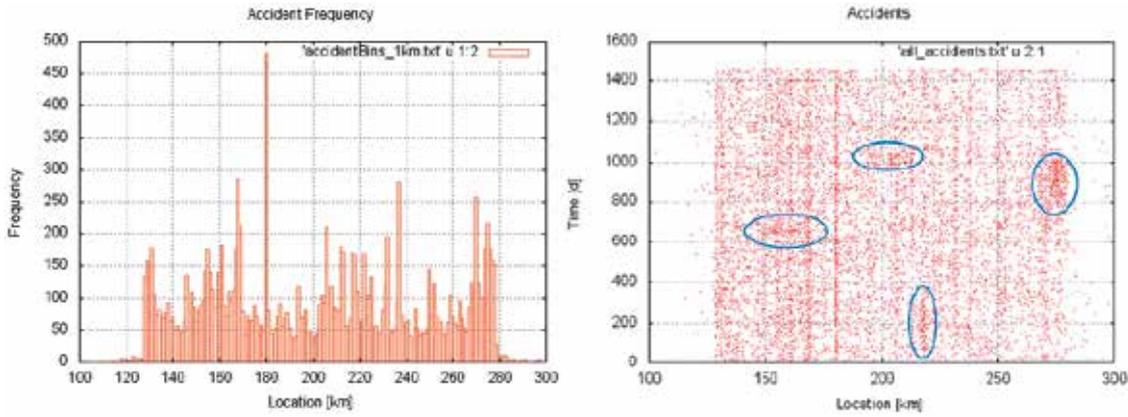


Рис. 9. Очаги аварийности: концентрация ДТП (слева) и пространственно-временная концентрация ДТП (справа)

ва сеть, показанная на рис. 8, которую затем можно будет использовать при дальнейших исследованиях. Например, эту сеть можно представить так, как на рис. 10. Показанные здесь причинно-следственные связи между опасными ситуациями и влияющими показателями следует рассматривать как сборные узлы, сочетающие в себе все показатели. К примеру, сборное наименование «Кинематика и динамика движения» объединяет узлы «Интенсивность торможения», «Интенсивность руления», ESP, ABC и другие, а узел «Регулирование движения» объединяет в себе способы регулирования дорожного движения, фазы светосигнальных устройств регулирования и т. д.

Кроме того, необходимо понимать, что между представленными узлами также существуют взаимозависимости, которые не показаны для наглядности. Очевидно, что определенная интенсивности торможения и руления (узел «Кинематика и динамика движения») причинно связана с узлом «Характеристики водителя», так как эти воздействия являются реакцией водителей на формирующуюся критическую ситуацию.

Помимо сборных узлов на рис. 10 показано еще одно различие: наряду с косвенными причинно-следственными связями (через узел «Вид ДТП») между опасной ситуацией и тяжестью ДТП возможна и прямая связь. Важной целью исследователя дорожной безопасности является прогнозирование потенциальной тяжести ДТП в опасных ситуациях.

Дискуссия и возможности

В данной работе рассматривались возможности оценки риска для участников дорожного движения с помощью новых методов, причем окончательного ответа найти не удалось. Эта статья создает основу для дальнейшего обсу-

ждения, рассмотрения и оценки безопасности дорожного движения и риска для участников движения, что также является темой других исследований. Не претендуя на полноту изложения, авторы попытались показать шаги, необходимые для объективной оценки безопасности движения (регистрация, классификация и отслеживание объектов, построение и классификация траекторий по штатным, нештатным и критическим ситуациям, а также ДТП). Кроме того, было продемонстрировано, что функциональная взаимосвязь ДТП и критических ситуаций является темой многих современных исследований и должна использоваться при оценке безопасности дорожного движения, но пока ожидает доказательства на материале важных для безопасности показателей (так называемых суррогатных величин), описывающих ДТП и опасные ситуации. В статье также была представлена концепция байесовых сетей, которая позволяет исследовать не изученные до конца функциональные взаимосвязи на пространственно-временном вероятностном уровне и делать выводы о вероятности типа и тяжести ДТП на основе дорожной си-

туации и других влияющих факторов (инфраструктуры, интенсивности движения, характеристик водителя и т. д.).

Несмотря на то, что описанный метод применялся лишь в некоторых исследованиях, можно наметить следующие возможности дальнейшей работы:

- новые исследования в области безопасности дорожного движения и выработка более эффективных аналитических методов, проверенных на практике;
- идентификация и количественное выражение влияния факторов риска (например, инфраструктуры, регулирования движения, характеристик водителя, кинематики и динамики) на безопасность в улично-дорожной сети;
- реализация мер по повышению безопасности дорожного движения, предотвращение ДТП и снижение количества погибших и тяжелораненых. ■

Литература

1. Новая газета. URL: <http://www.novayagazeta.ru/news/1684254.html>.
2. Шведский ноль как вызов традиционному образу мышления [Автотранспортный портал]. URL: http://transler.ru/content/arxiv_perevoznic.

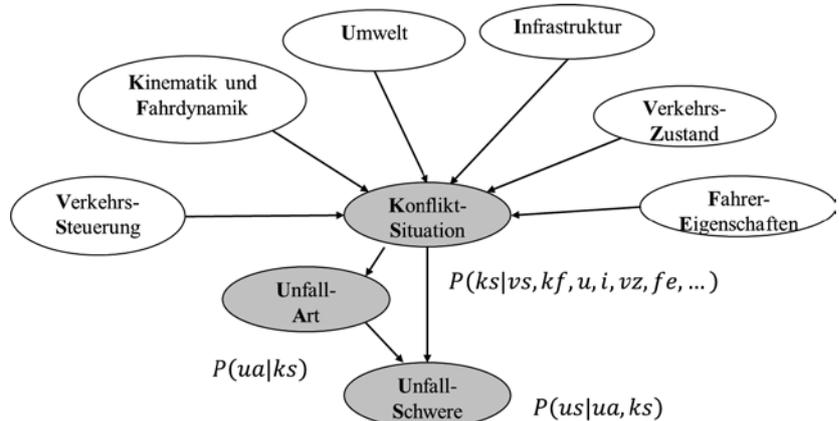


Рис. 10. Причинно-следственный граф, расширенный различными влияющими факторами