

Оригинальная статья
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-60-67>
УДК 631.6:624.137:519.2



ВЕРОЯТНОСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОПОЛЗНЕВЫМ РИСКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДОВЕРИЯ

Д.И. Кацко

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина (КубГАУ); 350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, 13, Россия

Аннотация. Целью исследований явилась разработка оценки оползневой опасности, основанной на байесовской сети доверия. Выполнена оценка оползневого риска на базе систематического использования (после ливней, снегопадов и др. природных явлений) экспертных баз фрагментов знаний, реализованных в графических вероятностных моделях – байесовских сетях доверия (*Bayesian Belief Network – BBN*), позволяющих использовать объективные и субъективные оценки вероятностей и знания экспертов о структуре связей (зависимости и независимости) переменных, для управления неопределенностью и риском. Управление рисками при формировании мелиоративных систем предполагает использование различных детерминированных и вероятностных методов. Одна из важнейших процедур управления риском – его оценка. Опасные природные явления (оползни, сели, водная и ветровая эрозия, затопление, подтопление и размыв земель) могут угрожать жизни, здоровью населения и причинять значительный экономический ущерб. Ограничения ресурсов (временных, финансовых и др.) часто не позволяют проводить полноценный мониторинг и дополнительные исследования с использованием ГИС и других средств. Для минимизации рисков и своевременного принятия управленческих решений по защите людей и территорий требуется использовать методы и модели, основанные на знаниях экспертов (субъективные вероятностные оценки) о причинно-следственных связях и законах распределения интегральных характеристик проявления опасных природных явлений (например, в случае оползневой опасности – коэффициента устойчивости FS склона). В результате использования предложенной методики на реальном примере была получена вероятность оползня на разных этапах наблюдений за склоном. Предложенная идеология вероятностной оценки оползневого риска, опирающаяся на систематическое использование знаний экспертов в байесовских сетях доверия, хорошо себя проявила в рассматриваемом примере. Факторы, по которым оценивалась вероятность оползня, являются универсальными и могут быть использованы для оценки рисков на других участках, где развиваются склоновые процессы.

Ключевые слова: мелиорация земель, система, вероятностное мышление, управление риском, байесовские сети доверия, оползень, противооползневые мероприятия

Формат цитирования: Кацко И.Д. Вероятностное управление оползневым риском с использованием байесовских сетей доверия // Природообустройство. 2025. № 2. С. 60-67. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-60-67>

Scientific article

PROBABILISTIC LANDSLIDE RISK MANAGEMENT USING BAYESIAN BELIEF NETWORKS

D.I. Katsko

Russia Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; (KubGAU); 350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, Kalinin St., 13. Russia

Abstract. Development of a landslide hazard assessment based on a Bayesian belief network. **Methodology.** Landslide risk assessment with basic systematic use (after heavy rains, snowfalls, etc.) of expert fragments of basic knowledge implemented in graphical probabilistic models – Bayesian Belief Networks (BBN), resolved objective and selective probabilities and knowledge. We considered possible relationships (dependencies and independences) for uncertainty and risk management. **Results.** Risk management during the closure of drainage systems involves the use of various deterministic and probabilistic methods. One of the risk management procedures is its assessment. Hazardous natural phenomena (landslides, mudflows, water and wind erosion, flooding, waterlogging and land erosion) can threaten the lives and health of the population and lead to significant damage. Resource limitations (time, financial, etc.) often do not allow for full-fledged monitoring and additional research using GIS and other

means. To minimize risk and make timely management decisions to protect people and territories, it is necessary to use methods and models based on expert knowledge (subjective probabilistic assessments) about cause-and-effect relationships and distribution laws of integral characteristics of the manifestation of characteristic conditions (for example, in the case of landslide hazard – the slope stability coefficient FS). As a result of using the proposed methodology in the first example, restrictions were obtained that allow using different methods to maintain the slope. **Conclusions.** The proposed ideology of probabilistic landslide risk assessment based on the system of using expert knowledge in Bayesian belief networks is well applied in the context under consideration. The factors affected by the landslide zone are universal and can be used to assess risks in other areas where slope processes are developing.

Keywords: system, land reclamation, probabilistic thinking, risk management, Bayesian belief networks, landslide, anti-landslide measures

Format of citation: Katsko D.I. Probabilistic landslide risk management using bayesian belief networks // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 2. P. 60-67. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-2-60-67>

Введение. Развитие технологий делает жизнь человека гораздо более комфортной, однако часто создание человеком новых ландшафтов требует формирования природоохранных сооружений. Тем самым реализуется понимание мелиорации как коренного долговременного улучшения не только неблагоприятных природно-климатических условий, но и негативного антропогенного воздействия на окружающую природу. Для обеспечения безопасности жизни человека и сооружений необходимы оценка и управление приемлемым уровнем риска новой и существующей инфраструктуры осваиваемых территорий, чему традиционно способствуют знания экспертов, вероятностные и статистические методы. Знания и их вероятностная оценка (как объективная, так и субъективная) являются основой формирования компетенций, которые могут использоваться в экспертных системах и отличаются: постоянством (в отличие от человеческих); легкостью передачи и воспроизведения; воспроизводимостью и стабильностью результатов; недорогой эксплуатацией.

Цель исследований: разработка оценки оползневой опасности, основанной на байесовской сети доверия.

Материалы и методы исследований. Объединение В.И. Ивоным различных мелиоративных мероприятий в общую теорию мелиоративных систем (ОТМС) позволяет говорить о новом этапе разработки методологии научных основ улучшения земель [1-3]. Принятие решений по формированию мелиоративных мероприятий всегда сопровождается рисками того, что они не позволят решать задачи по улучшению земель. В этом случае принято говорить о рисках принятия решений. В современной системной инженерии рассматриваются принципы вероятностного мышления, которые предлагается использовать при формировании мелиоративных систем [4-6]:

– формирование мелиоративных мероприятий осуществляется в сложной

природно-технической системе взаимосвязанных процессов (системный подход);

– реальные наблюдаемые процессы и их модели содержат неопределенность, которая может описываться субъективно (субъективная вероятность) или стохастическими моделями, призванными учесть общие причины вариаций, обусловленных ограниченностью точности параметров и условий процесса);

– вероятностное управление риском при формировании мелиоративных систем должно опираться на понимание и использование вариаций в процессе принятия решений.

Оценка риска для мелиоративных систем опирается [6]:

– на подход Бернулли, не предполагающий регулирования процесса, риск которого оценивается, и использующий вероятность риска как вероятностную оценку наступления опасного события (R_{norm}):

0,5-50/50

0,6-0,7 – возможно

0,7-0,8 – правдоподобно

0,8-0,9 – весьма правдоподобно

свыше 0,9 – почти наверняка

– подход Колумба, требующий детальной регулировки опасных участков, который можно представить в виде требования минимизации некой функции полезности:

$$U = \sum_{i=1}^n c_i p_i \rightarrow \min \quad (1)$$

где C_i – стоимость восстановительных работ, p_i – вероятность возникновения опасной ситуации на i -м участке; U (utility) – полезность, отражающая вероятностные потери (уровень финансового риска).

Байесовские вероятностные сети доверия как средство оценки риска. Основным современным логического вывода считаются правила «если..., то...», иллюстрирующие причинно-следственные связи. Пусть H – событие, заключающееся в том, что данная гипотеза верна, E – событие,

закрывающееся в том, что наступило определенное доказательство (свидетельство), которое может подтвердить правильность указанной гипотезы. Тогда формула Байеса примет вид:

$$P(H/E) = \frac{P(E/H)P(H)}{P(E/H)P(H) + P(E/\bar{H})P(\bar{H})}. \quad (2)$$

Она устанавливает связь гипотезы H и свидетельства E , и в то же время – свидетельства с неподтвержденной гипотезой $\bar{H}$. $P(H)$ – априорная вероятность гипотезы, известная до наступления события E .

Предполагается, что $P(H)$ и $P(E/H)$ находятся опытным или экспериментальным путем. В нашем случае свидетельства и их вероятностные оценки могут формироваться на основании данных текущего визуального осмотра природоохранных сооружений после наступления одного или нескольких событий, способствующих наступлению оползней.

Формулу Байеса обобщают на случай множества гипотез $(H_1, H_2, \dots, H_m)$ и множества свидетельств $(E_1, E_2, \dots, E_n)$.

Вероятности каждой из гипотез можно определить по формуле:

$$P(H_i/E_1E_2\dots E_n) = \frac{P(E_1E_2\dots E_n/H_i)P(H_i)}{\sum_{k=1}^m P(E_1E_2\dots E_n/H_k)P(H_k)}, \quad (3)$$

где $i = \overline{1, m}$.

Сложность формулы (3) заключается в необходимости знать все условные вероятности знаменателя, поэтому часто делается довольно сильное предположение о независимости свидетельств (подход называют как наивный Байес – *naïve Bayes*). Тогда формула приобретает вид:

$$P(H_i/E_1E_2\dots E_n) = \frac{P(E_1/H_k)P(E_2/H_i)\dots P(E_n/H_i)P(H_i)}{\sum_{k=1}^m P(E_1/H_k)P(E_2/H_k)\dots P(E_n/H_k)P(H_k)}. \quad (4)$$

Риск можно охарактеризовать как произведение вероятности возникновения опасности на ожидаемый ущерб [2]:

$$R(A) = P(A) \times Y(A),$$

где $P(A)$ – вероятностная оценка возникновения опасности; $Y(A)$ – ожидаемый ущерб.

Как известно, в современных научных исследованиях для управления риском предлагается использование формулы Байеса (4), позволяющей делать выводы «вперед и назад»: $B \rightarrow A$ или $P(A/B)$ и $A \rightarrow B$ или $P(B/A)$.

Оползневые события могут характеризоваться вероятностной оценкой воздействия факторов на элементы природно-технических систем.

Опираясь на мнения экспертов, взаимодействие элементов визуального обследования, можно сформировать таблицы априорных и условных вероятностей и представить их графически, в виде дерева, что позволяет сформировать априорные вероятности всех событий в сети [7].

Основная идея рассуждений в *байесовской сети доверия* (БСД) заключается в распространении (*propagation* – пропация) свидетельств, которые подаются на вход сети. БСД – это направленный ациклический граф, в котором количество состояний вершины равно произведению количества состояний всех ее родительских вершин [8, 9]:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i / \text{parents}(X_i)). \quad (5)$$

Таким образом, в ациклическом графе, визуализирующем БСД, каждая вершина ставится в соответствие распределения условных вероятностей (тензор вероятностей). Это позволяет использовать вероятностные байесовские сети для решения задач диагностики – в частности, оценки рисков.

Системы, опирающиеся на правила в условиях неопределенности, часто приводят к неверным выводам. Нейронные сети – «черный ящик», что затрудняет выявление наиболее вероятного исхода, а также при этом не удастся выявить набор событий, доставляющих наиболее вероятный прогноз [8, 9]. Сегодня представляется, что байесовские сети позволяют моделировать закономерности взаимосвязи факторов защиты территорий от оползней и др. для управления вероятностной неопределенностью и риском.

Для реализации формулы Байеса в качестве факторов для оценки вероятности развития оползневых процессов предлагается рассматривать наиболее общие наблюдаемые факторы, состояние которых изменяется со временем: эрозия, механические повреждения склона, влажность грунта, наличие растительности, антропогенное воздействие [10-14]. Несмотря на то, что грунтовые условия, существующие гидротехнические сооружения, высота и крутизна склона также существенно влияют на его устойчивость, эти параметры неизменяемы во времени и способны повлиять лишь на первоначальную оценку устойчивости.

Результаты и их обсуждение. Анализ проблем управления риском формирования мелиоративных систем приводит к пониманию того, что их отдельные элементы отличаются по своим характеристикам и условиям окружающей среды, которые предполагались при анализе и проектировании. Поэтому общепринято, что традиционные детерминированные методы необходимо дополнять вероятностными. Вероятностные методы

дают средства количественной оценки рисков, позволяют принять меры по их снижению, а также дать оценку альтернативных решений при проектировании мелиоративных систем. Полностью избавиться от риска априори невозможно, но благодаря инструментам управления становится возможным существенно снизить как вероятность, так и урон, который может быть нанесен мелиоративной системе.

На основе причинных факторов была разработана байесовская сеть доверия (рис. 1) для визуального обследования (мониторинга) оползневых участков.

Это сеть с узлами принятия решений (*Investment*), узлами полезности и узлами со случайными переменными, которые на диаграмме часто называют вероятностными переменными (*Landslide*, *Erosion*, *Vegetation* и др.). Ребра, ведущие к узлам принятия решений, указывают на временную последовательность: ребро, ведущее от случайной переменной к переменной принятия решения, указывает на то, что значение случайной переменной известно на момент принятия решения, а ребро, ведущее от одной переменной принятия решения к другой, указывает на хронологическую последовательность соответствующих решений.

Сеть должна быть ациклической. Согласно исследованиям [15] в Краснодарском крае объем недополученной чистой прибыли (*Harv*) от реализации продукции с неиспользуемых земельных участков для последующего вовлечения их в сельскохозяйственный оборот может составлять около 47 тыс. руб. на 1 га.

Был рассмотрен участок, где проведено обследование (мониторинг) и посредством экспертного опроса дана оценка возможного ущерба территории ввиду оползневых процессов на склоне. Состояние склона оценивалось визуально по 5 показателям, приведенным далее. Рассмотрено несколько сценариев с инвестициями в виде противооползневых мероприятий на нескольких стадиях развития склоновых процессов.

Изначально на склоне образовалась оплывина, возникшая по причине таяния снега. Маломощный слой почвы глубиной до 1 м превратился в тестообразную массу и начал стекать вниз под влиянием собственного веса (рис. 2).

Для оценки развития последующих событий рассматривались следующие факторы: эрозия, механические повреждения склона, влажность грунта, наличие растительности, антропогенное воздействие. С использованием теории Байеса была дана вероятностная оценка того, что оползневые процессы будут развиваться. Например, с помощью экспертного опроса было сделано предположение того, что без противооползневых

мероприятий эрозия будет в дальнейшем прогрессировать на участке с вероятностью 20%, и через некоторое время – 71,6%, полученные в программе *Hugin Expert*. (В статье используется понятие «модельного времени», где t – текущее наблюдение; $t + 1$ – следующее наблюдение.)

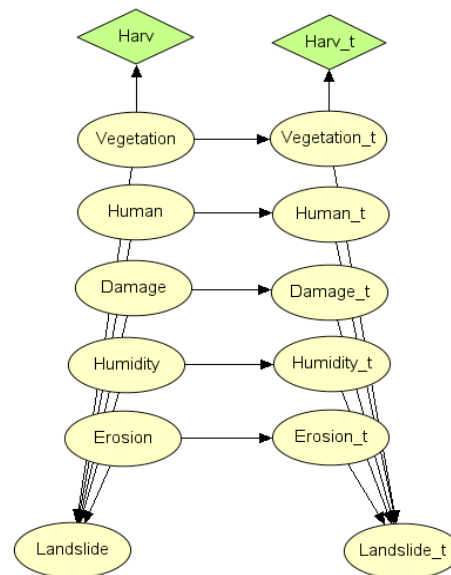


Рис. 1. Байесовская сеть доверия:

Erosion – эрозионные процессы в виде размыва почвы, образования борозд, промоин, оврагов, речных долин;

Vegetation – нарушение растительности («пьяный лес», оголение почвы, повреждение корневой системы, изменение типов растительности, образование участков без растительности);

Humidity – увеличение влажности грунта (изменение УГВ, избыточные осадки, интенсивное таяние снега, паводки, ослабление грунтовых масс);

Damage – механические повреждения и деформации склона (трещины, просадки, оплывины, вывал грунта, выпор грунта, осыпи, небольшие оползневые подвижки);

Human – изменение естественного состояния склона ввиду деятельности человека (пригрузка на верховом склоне, изменение рельефа,

изменение естественного водостока, использование химических веществ, вследствие чего ухудшается состояние почвы и др., при инвестициях подразумеваются противооползневые мероприятия);

Harv – доход от сбора урожая;

Landslide – оползневые процессы;

Investment – узел принятия решений в виде противооползневых мероприятий;

Cost – стоимость противооползневых мероприятий;

Erosion_t, Vegetation_t, Humidity_t, Damage_t, Human_t, Landslide_t, Harv_t,

Cost_t – то же в течение нескольких лет

Fig. 1. Bayesian belief networks



Рис. 2. Первоначальное состояние склона

Fig. 2. Initial slope condition

Чтобы определить вероятность оползня, также необходимо было задать степень влияния факторов на вероятность этого события. Соответствующие данные вносились в программный комплекс *Hugin Expert*, где была построена байесовская сеть доверия (рис. 3).

Таким образом, видим, что вероятность оползня в течение года – $P(L) = 29,75\%$, а вероятность оползня в течение ближайших нескольких лет – $P(L_t) = 65,28\%$. Однако байесовский подход позволяет пересчитать вероятность с изменением или добавлением новой информации. Для принятия возможных наилучших решений узлы полезности функции связаны с различными состояниями сети. Принимая решения об инвестициях, мы влияем на вероятности конфигураций. Таким образом, мы можем вычислить ожидаемую полезность каждого альтернативного решения (глобальная функция полезности представляет собой сумму всех локальных функций полезности).

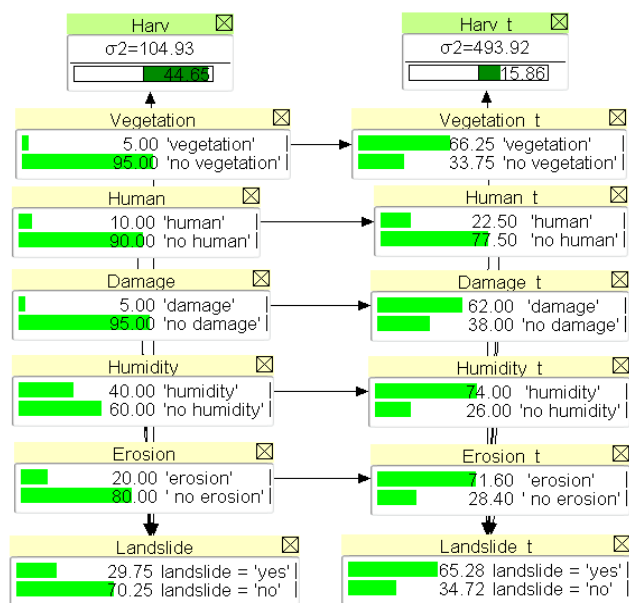


Рис. 3. Байесовская сеть доверия. Состояние 1

Fig. 3. Bayesian belief networks. State 1

Мы выберем альтернативу с наибольшей ожидаемой полезностью, что называется принципом максимальной ожидаемой полезности.

Предполагалось, что будет проведено укрепление склона в виде высадки растительности с гидропосевом, устройством противоэрозионного покрытия и системы дренажа (открытые водостоки и каптажи). Тогда эрозия и переувлажненный грунт не будут оказывать негативного влияния на склон. Таким образом, вероятность оползня снизится до $P(L) = 7,30\%$ и $P(L_t) = 2,91\%$ (рис. 4). Однако на рассматриваемом участке не были проведены своевременные противоэрозионные и дренажные работы. В результате переувлажнения прочность грунта снизилась, начались оползневые

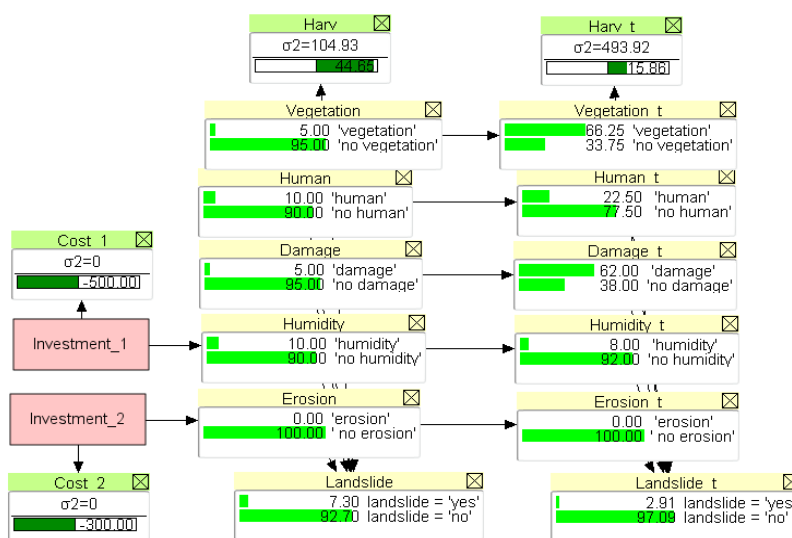


Рис. 4. Байесовская сеть доверия. Состояние 2

Fig. 4. Bayesian belief networks. State 2

подвижки, растительность была уничтожена, что привело к еще большей водонасыщенности грунтов после дождя. Все эти события взаимосвязаны и имеют кумулятивный эффект. В результате образовалась огромная промоина (рис. 5).

С ухудшением состояния рассматриваемого участка произошло перераспределение вероятностей (рис. 6).

Нарушение растительности и развитие эрозии будут составлять около 100%. В таком случае вероятность оползня – $P(L) = 60,15\%$ и $P(L_t) = 74,51\%$.

На данном этапе была построена подпорная стена (рис. 7), которая частично улучшает ситуацию, воспринимая активное давление в низовой части склона, но смещение грунтовой массы по поверхности продолжается. Итак, вероятности опять перераспределяются (рис. 8): $P(L) = 24,82\%$, $P(L_t) = 27,45\%$.



Рис. 6. Байесовская сеть доверия. Состояние 3

Fig. 6. Bayesian belief networks. State 3



Рис. 5. Образование на склоне промоины

Fig. 5. The formation of a washout on the slope



Рис. 7. Подпорная стена

Fig. 7. Retaining wall

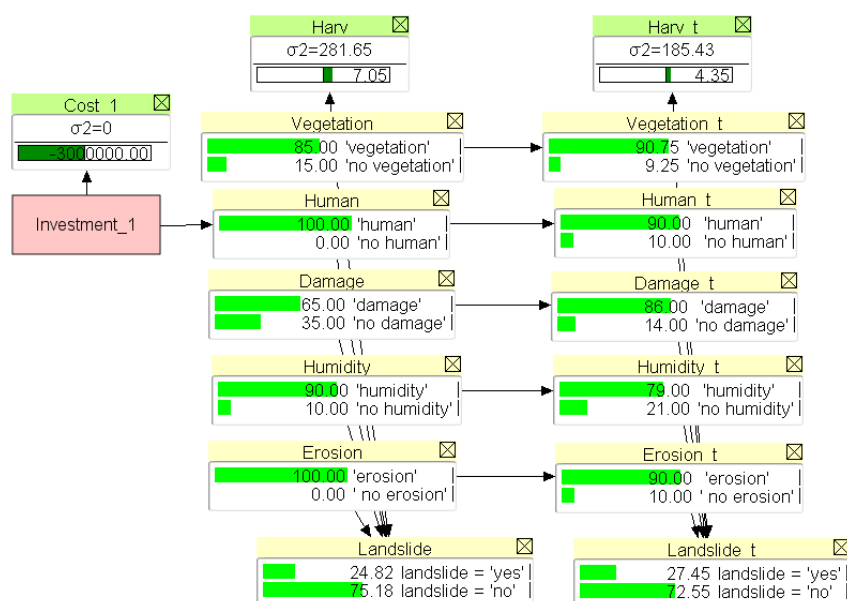


Рис. 8. Байесовская сеть доверия. Состояние 4

Fig. 8. Bayesian belief networks. State 4

Однако для полной ликвидации склоновых процессов все еще необходимы устройство дренажа и противоэрозионного покрытия, а также террасирование или замена

грунта на более прочный. Таким образом, вероятность оползня будет составлять: $P(L) = 7,66\%$, и через некоторое время – $P(L_t) = 8,83\%$ (рис. 9).

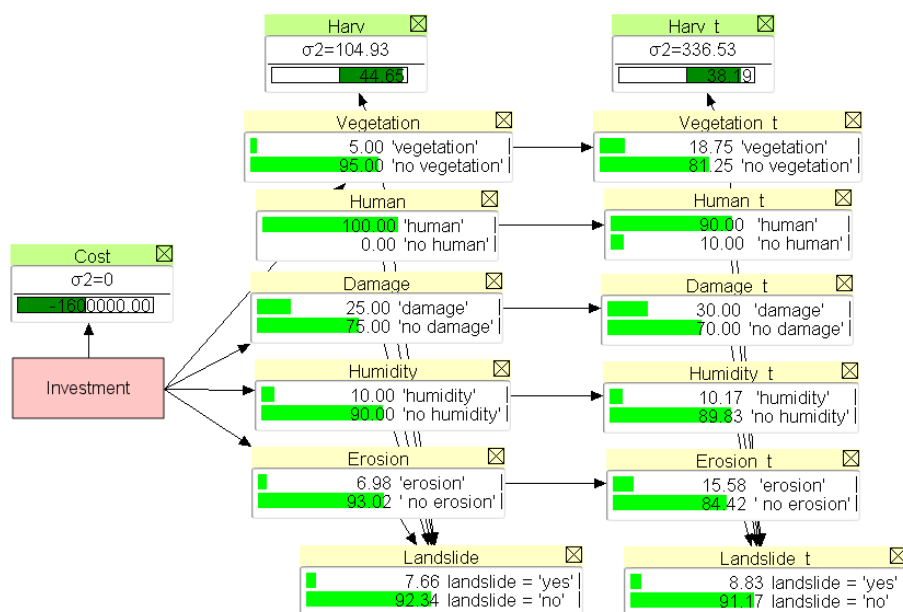


Рис. 9. Байесовская сеть доверия. Состояние 5

Fig. 9. Bayesian belief networks. State 5

Выводы

Высокая вероятность возникновения опасных факторов, влекущих за собой разрушение природоохранных систем и окружающих территорий, требует разработки мероприятий по управлению риском. Шкалирование риска может осуществляться в качественной шкале, которой можно поставить в соответствие количественную шкалу: недопустимый риск (вероятность возникновения опасных факторов и последствий свыше 0,7); допустимый риск (оправданный риск, не предусматривающий расходы на снижение в будущем от 0,5 до 0,7); толерантный риск (с которым общество живет, так как

гарантируются определенные выгоды, но с уверенностью, что он будет контролироваться, пересматриваться и, возможно, снижаться, – менее 0,5).

Полностью избавиться от риска при формировании и функционировании природоохранных систем и защите территорий от оползневых явлений невозможно, но благодаря вероятностной оценке наступления риска становится возможным управление риском, позволяющее снизить как вероятность, так и ожидаемый ущерб. В исследованиях для оценки оползневого риска было предложено и реализовано использование байесовской сети доверия.

Список использованных источников

1. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ: Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 367 с.
2. Семечкин А.Е. Системный анализ и системотехника. М.: SvS-Аргус, 2005. 536 с.
3. Ивонин В.М. Мелиоративные системы: основы общей теории // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 1. С. 119-140.
4. Безуглова Е.В. Оползневой риск транспортных природно-технических систем: Монография / Е.В. Безуглова, С.И. Матсий, В.В. Подтелков. Краснодар: КубГАУ, 2015. С. 124-140.
5. Кузнецов Е.В. Сельскохозяйственный мелиоративный комплекс для устойчивого развития агроландшафтов: Учебное пособие / Е.В. Кузнецов, А.Е. Хаджиди. СПб.: Лань, 2022. 300 с.

References

1. Peregudov F.I. Introduction to system analysis: A textbook for universities. Moscow: Higher School. 1989. 367 p.
2. Semechkin A.E. System analysis and system engineering. Moscow: SvS-Argus, 2005. 536 p.
3. Ivonin V.M. Meliorative systems: fundamentals of general theory // Melioration and hydraulic engineering. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 119-140.
4. Bezuglova E.V. Landslide risk of transport natural and technical systems: a monograph / E.V. Bezuglova, S.I. Matsi, V.V. Podtelkov. Krasnodar: KubGAU, 2015. pp. 124-140.
5. Kuznetsov E.V. Agricultural reclamation complex for sustainable development of agrolandscapes: a textbook / E.V. Kuznetsov, A.E. Khadjidi. St. Petersburg: Lan, 2022. 300 p.

6. Соложенцев Е.Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. Изд. 2-е. СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2006. 530 с.

7. Кацко Д.И. Вариативные подходы к оценке и управлению оползневым риском транспортных систем. / Д.И. Кацко, В.С. Маций / IV Международная научно-практическая молодежная конференция по геотехнике: сборник материалов / отв. ред. Я.А. Пронозин. Тюмень: ТИУ, 2018. С. 47-51.

8. HUGIN EXPERT. Web: The HUGIN Graphical User Interface – HUGIN GUI 9.5 documentation.

9. Сукар Л. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения: Пер. с англ. А.В. Снастина. М.: ДМК Пресс, 2021. 338 с.

10. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства: Учебное пособие. М.: Стройиздат, 1977. 320 с.

11. Костяков А.Н. Основы мелиорации. 6-е изд. М.: Сельхозиздат, 1960. 622 с.

12. Рекс Л.М. Системные исследования мелиоративных процессов и систем. М.: «Аслан», 1995. 192 с.

13. Зайдельман Ф.Р. Мелиорация почв: Учебник. Изд. 2-е. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.

14. Мелиорация земель: Учебник / Под ред. А.И. Голованова. СПб.: Изд-во «Лань», 2015. 816 с.

15. Increasing the efficiency of land use as a condition of ensuring sustainable development of rural areas / E. Artemova, G. Barsukova, D. Derevenets E3S Web of Conf., 510 (2024) 01042.

6. Solozhentsev E.D. Scenario-based logical and probabilistic risk management in business and technology. 2nd ed., St. Petersburg: Publishing House "Business Press", 2006. 530 p.

7. Katsko D.I. Variable approaches to the assessment and management of landslide risk of transport systems. / D.I. Katsko, V.S. Matsii. – IV International Scientific and Practical Youth Conference on Geotechnics: collection of materials / ed. by Ya.A. Pronozin. Tyumen: TIU, 2018. P. 47-51.

8. HUGIN EXPERT. Web: The HUGIN Graphical User Interface – HUGIN GUI 9.5 documentation.

9. Sukar L. Probabilistic graph models. Principles and applications / translated from English by A.V. Snastin. Moscow: DMK Press, 2021. 338 p.

10. Maslov N.N. Soil mechanics in construction practice. Textbook. Moscow: Stroyizdat, 1977. 320 p.

11. Kostyakov A.N. Fundamentals of land reclamation. 6th ed., Moscow: Agricultural Publishing House. 1960. 622 p.

12. Rex L.M. System research of meliorative processes and systems. Moscow: Aslan. 1995. 192 p.

13. Seidelman F.R. Soil reclamation. Textbook. 2nd ed. M.: Publishing House of Moscow State University, 1996. 382 p.

14. Land reclamation. Textbook. / Edited by A.I. Golovanova / St. Petersburg, publishing house "Lan". 2015. 816 p.

15. Improving the efficiency of land use as a condition for ensuring sustainable rural development / E. Artemova, G. Barsukova, D. Derevenets E3S Web Conference, 510 (2024) 01042.

Об авторе

Дмитрий Игоревич Кацко, аспирант факультета гидромелиорации; ORCID iD: 0009-0001-8484-159X; SPIN-код: 4928-1689; katsko99@mail.ru

Information about the authors

Dmitry I. Katsko, post graduate student of the faculty of hydro reclamation; ORCID ID: 0009-0001-8484-159X; SPIN-code: 4928-1689; katsko99@mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Кацко Д.И. выполнил теоретические и практические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

D.I. Katsko carried out theoretical and practical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. He has a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 14.01.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 12.03.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 12.03.2025