

Кабанов Е.И. (Санкт-Петербургский горный университет, аспирант кафедры безопасности производств, e-mail: iznmsu@gmail.com)

Коршунов Г.И. (Санкт-Петербургский горный университет, зав. кафедрой безопасности производств, д.т.н., профессор)

Пихконен Л.В. (Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы, зав. кафедрой горноспасательного дела и взрывобезопасности, к.т.н.)

Родионов В.А. (Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы, профессор кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности, к.т.н., доцент)

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ РИСКА ВЗРЫВОВ МЕТАНА И ПЫЛИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

Работа посвящена созданию способа комплексной оценки риска взрывов метана и пыли на угольных шахтах для реализации риск-ориентированного подхода при организации надзорной деятельности, а также для решения задач информационного обеспечения процедуры принятия управленческих решений, направленных на снижение вероятности возникновения взрывов метана и пыли в подземных выработках угольных шахт. Указаны предпосылки перехода к динамической модели риск-ориентированного подхода. Приведены данные о динамике изменения коэффициента смертельного травматизма при подземной добыче угля за последние 10 лет. Предложена модель экспертной системы на основе нечеткой логики для проведения оценки риска в условиях информационной неопределенности исходных данных, обусловленной неполнотой и отсутствием достоверной информации о статистических характеристиках влияния факторов риска на уровень безопасности природно-технической системы. Разработана структурная схема экспертной системы на основе проведенного анализа материалов расследования случаев взрывов метана и пыли, произошедших на угольных шахтах России в 2006-2016 гг. Описаны параметры, используемые в модели в качестве входных данных. Сформирована база знаний нечеткого логического вывода Мамдани с применением вычислительной среды MATLAB Fuzzy Logic Toolbox для учета влияния комплекса горно-геологических, технических и субъективных факторов на риск возникновения взрывов. Полученная модель позволяет проводить ранжирование участков

угольных шахт по уровням риска возникновения взрывов, что было доказано на примере обработки выборки исходных данных. Показано, что разработанная модель может быть интегрирована в многофункциональные системы безопасности для оценки риска возникновения аварий различных видов в условиях эксплуатации динамического объекта в режиме реального времени.

Ключевые слова: угольная шахта, авария, подземные взрывы, оценка риска, риск-ориентированный подход, экспертная система, модель нечеткого логического вывода.

Kabanov E.I. (Saint-Petersburg Mining University, Ph.D student of the Safety Department, e-mail: iznmsu@gmail.com)

Korshunov G.I. (Saint-Petersburg Mining University, Head of the Safety Department, D. Eng. Sc., Professor)

Pihkonen L.V. (Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Head of the Mine Rescue and Explosion Safety Department, Ph.D)

Rodionov V.A. (Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Professor of the Mine Rescue and Explosion Safety Department, Ph.D.)

UDC 622.86:614.83

## **DEVELOPMENT OF THE EXPERT SYSTEM MODEL BASED ON FUZZY LOGIC FOR ASSESSMENT OF METHANE AND DUST EXPLOSIONS RISK IN COAL MINES**

The paper is devoted to the creation of methane and dust explosion risk assessment method for coal mines for implementation of the risk-oriented approach at the organization of supervisory activities. And also for solving the information support problems at managerial decisions making procedures, which aimed to reducing the probability of methane and dust explosions in underground workings of coal mines. The premises for transition to the dynamic model of the risk-oriented approach are indicated. The information about dynamics of fatal injuries coefficient for underground coal mining for the last 10 years is provided. The of expert system model, based on fuzzy logic, is proposed. The model is designed for risk assessment in condition of information uncertainty in case of incompleteness or lack of reliable information about the impact of risk factors on the mine safety level. On the basis of the investigation of accidents materials in Russia in 2006-2016, the structural scheme of the expert system was created. Input parameters of model are described. The Mamdani's fuzzy logic inference knowledge base was created with using of a MATLAB Fuzzy Logic Toolbox computing

environment for taking into account the influence of a complex of geological, technical and subjective factors on the risk of methane and dust explosions. The developed model allows to rank the coal mine sites according to the explosions risk levels, which was proved by processing of the initial data sample. The developed model can be integrated into multifunctional safety systems to assess the risk of various types accidents in real time.

Keywords: coal mine, accident, underground explosions, risk assessment, risk-oriented approach, expert system, fuzzy logical inference model.

В целях обеспечения безопасности на угольных шахтах и своевременного принятия мер, позволяющих компенсировать влияние опасных факторов, в настоящее время активно внедряется концепция риск-ориентированного подхода. В его основе лежит принцип своевременной идентификации опасностей и оценки производственных рисков [1]. Концепция риск-ориентированного подхода в отношении опасных производственных объектов (далее – ОПО) внедряется Ростехнадзором с 2014 года для дифференцирования надзорной деятельности с учетом степени риска и масштаба возможных последствий аварий.

На первых этапах внедрения концепции была установлена статическая модель, в рамках которой периодичность плановых проверок устанавливалась в зависимости от класса опасности объекта. В ближайшее время Ростехнадзор осуществит переход к динамической модели контроля объектов, при которой риски аварий на каждом отдельном предприятии будут оцениваться с учетом индивидуальных показателей, характеризующих горно-геологические и горнотехнические условия подземной добычи. При этом формируется актуальность разработки метода комплексной оценки риска аварий на угольных шахтах, отражающего отраслевую специфику и удовлетворяющего Рекомендациям по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО [2].

Наиболее опасным видом аварии на угольных шахтах являются взрывы метановоздушных и пылевоздушных смесей (далее МВС и ПВС соотв.) в подземных выработках, на долю которых в период 2006-2016 гг. приходятся 49 % человеческих жертв среди персонала. На рис.1 показано, что общая тенденция к снижению смертельного травматизма при подземной добыче угля нарушается рядом крупных аварий, произошедших по причине взрывов МВС и ПВС. Расчетные значения индивидуального риска гибели за указанный период, в соответствии с критериями отнесения объектов государственного надзора к категориям риска [3], свидетельствуют о его чрезвычайно высоком уровне. Соответственно, внедрение динамической модели комплексной оценки риска в отношении анализа опасности взрывов МВС и ПВС на угольных шахтах является

первостепенной задачей. Это позволит сосредоточить ресурсы надзорных органов и хозяйствующих субъектов в отношении наиболее опасных объектов и повысить эффективность мероприятий, направленных на снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций.

В настоящее время Ростехнадзор реализует мероприятия по созданию систем дистанционного мониторинга технологических процессов на ОПО с применением современных информационных технологий. Для осуществления качественного перехода к динамической модели риск-ориентированного подхода необходимо в рамках этих систем реализовывать алгоритмы комплексного анализа рисков, продуцирующие интегральные показатели опасности, и позволяющие оперативно регистрировать критические состояния систем для заблаговременного принятия мер по минимизации рисков.

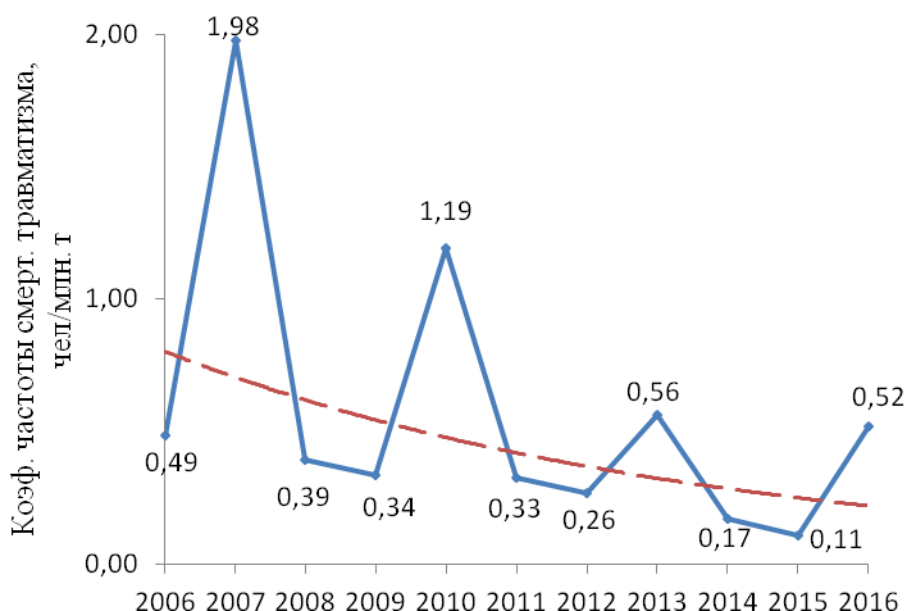


Рисунок 1 – Динамика коэффициента частоты смертельного травматизма при подземной добыче угля в 2006-2016 гг.

Для информационной полноты такого анализа следует учитывать все факторы, влияющие на уровень риска возникновения аварии. При этом необходимо определение влияния отдельных факторов на вероятностные характеристики процессов, приводящих к авариям, что является затруднительным ввиду отсутствия необходимой базы статистических данных о наблюдениях и как следствие — высокой степени информационной неопределенности процедуры оценки риска. Анализ международного опыта показывает, что в случае недостаточного объема данных о вероятностных свойствах проявления опасностей с высокой степенью эффективности используются

экспертные системы, сформированные на основе базы управляющих правил нечеткого логического вывода. Управляющие правила нечеткого логического вывода представляют собой формальное представление эмпирических знаний экспертов в исследуемой области. Ряд исследований [4-6 и др.] свидетельствуют о значительном потенциале использования экспертных систем нечеткого логического вывода в задачах анализа опасностей и оценки риска аварий при эксплуатации подземных сооружений и ОПО. Для создания модели экспертной системы оценки риска необходимо:

- задание входных параметров в виде лингвистических переменных (нечетких чисел), отражающих возможное состояние исследуемых факторов;
- определение набора логических правил с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода, определяющих взаимосвязь между входными и выходными параметрами (условиями и заключениями в виде IF (X is “ $x_1$ ”) AND (Y is “ $y_1$ ”) THEN (Z is “ $z_1$ ”));
- формирование структуры модели, определяющей очередность выполнения алгоритмов нечеткого вывода в отношении последовательности учета входных и выходных параметров.

Выходными параметрами в таких моделях являются количественные результаты комплексной оценки риска возникновения аварии, полученные с учетом анализа всех возможных сценариев реализации нежелательного события, заложенных в структуру модели. При этом анализируемые параметры могут быть заданы в виде дискретных и непрерывных переменных, а так же в виде признакового описания.

Структура модели состоит из упорядоченных элементов, описанных нечеткими числами, взаимодействие между которыми устанавливается набором соответствующих правил нечеткого вывода. При формировании экспертной системы основной задачей являлось выявление скрытых закономерностей в совокупности однотипных объектов, отражающих влияние параметров фактора риска на уровень опасности возникновения аварии. Выполнение данной задачи осуществляется при использовании ресурса экспертных групп, что позволяет минимизировать уровень неопределенности при комплексной оценке риска возникновения аварий.

В отечественной практике оценки рисков взрывов МВС и ПВС на угольных шахтах существует пример, подтверждающий эффективность использования экспертной системы нечеткой логики, построенной на основе искусственно-заданных данных [7]. Для создания модели оценки риска взрывов МВС и ПВС, построенной на основе фактических данных, был проведен анализ Актов расследований аварий, произошедших на угольных шахтах России в 2006-2016 гг. В результате установлен перечень основных факторов, под

влиянием которых формировались условия возникновения взрывов. В соответствии с принципами построения графической модели анализа риска [8], указанные факторы были положены в основу структуры, представленной на рис. 2. При построении модели отдельно учитывались факторы, влияющие на риск образования взрывоопасной среды и риск образования источника высокотемпературного импульса, поскольку эти события являются независимыми.

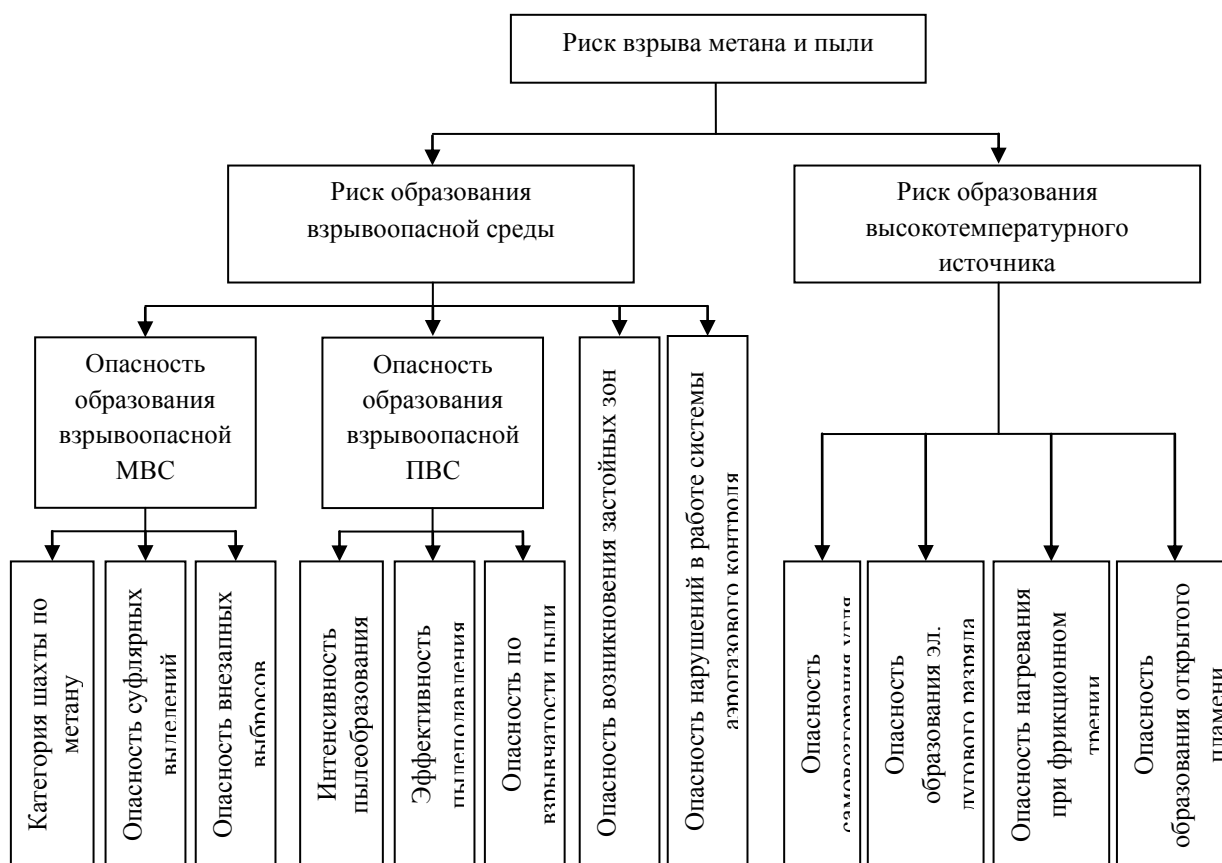


Рисунок 2 – Структура модели оценки риска взрывов МВС и ПВС в угольных шахтах.

При создании базы правил нечеткого вывода эксперты учитывали усредненные значения частот возникновения взрывов МВС и ПВС на шахтах, полученные по результатам апостериорного анализа материалов расследования аварий на угольных шахтах России в 2006-2016 гг. Указанные частоты отражают результат воздействия большого числа факторов, отдельный вклад которых невозможно оценить в виду отсутствия базы статистических наблюдений. Однако они могут быть использованы в целях информационного обеспечения процедуры формирования экспертной системы наряду с эмпирическими знаниями экспертов.

Для реализации нечетких логических операций использован алгоритм Мамдани [9]. Лингвистические переменные описаны набором трапециевидных нечетких чисел,

построенных на 01-носителе в соответствии с лингвистическими уровнями риска, приведенными в [10].

Для задания исходных данных эксперты использовали результаты:

- категорирования шахт и пластов (категория шахты по метану, опасность суффлярных выделений, опасность пластов по внезапным выбросам, опасность пластов по взрывчатости пыли, опасность пластов по самовозгоранию);
- оценки технологических процессов на участке (интенсивность пылеобразования и эффективность пылеподавления);
- оценки состояния системы вентиляции и воздухообеспеченности участков (опасность возникновения застойных зон);
- анализа состояния систем аэрогазового контроля на участке и возможности вмешательства в ее работу (опасность нарушений в работе системы аэрогазового контроля),
- ревизии состояния взрывобезопасности используемого электрооборудования и защиты от фрикционного искрения исполнительных органов комбайнов (опасность образования эл. дугового разряда и опасность нагревания при фрикционном трении);
- оценки уровня трудовой дисциплины на шахте (опасность образования открытого пламени и др.).

Реализация модели выполнялась в вычислительной среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox (рис. 3), которая позволяет визуализировать используемые лингвистические переменные и производить нечеткие вычисления с возможностью дополнения и корректировки базы нечетких логических правил [11].

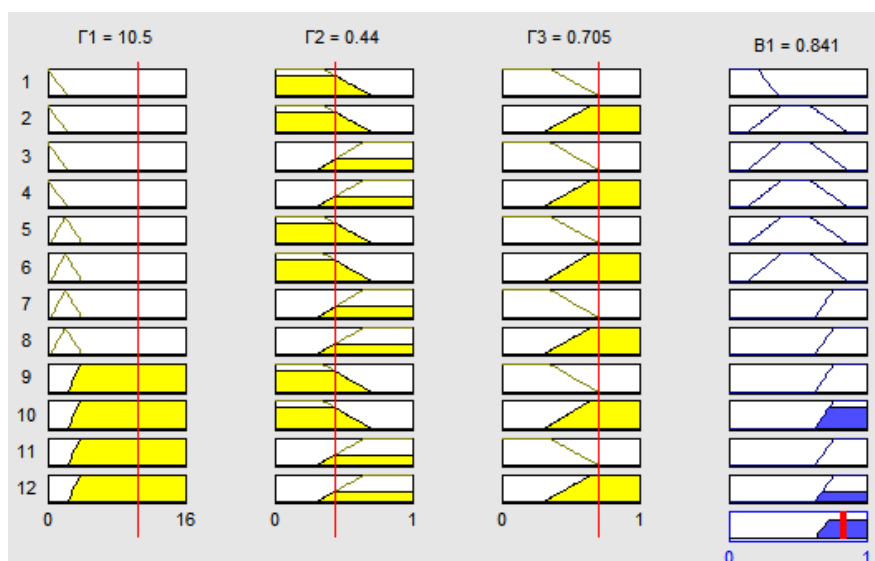


Рисунок 3 – Нечеткий логический вывод модели оценки риска в среде MATLAB.

Работоспособность модели оценки риска взрывов МВС и ПВС была показана на примере обработки выборки исходных данных, характеризующих условия эксплуатации четырех различных участков подземных выработок угольных шахт (табл. 1), где Н, С, и В – термины обозначения уровни опасности «Низкая», «Средняя» и «Высокая» соответственно.

Таблица 1 – Входные параметры и результаты оценки риска взрывов МВС и ПВС

| Параметр                        | Участок 1    | Участок 2    | Участок 3    | Участок 4    |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Категория по газу               | II           | III          | Сверхкат.    | Сверхкат.    |
| Опасность суфлярных выделений   | Н            | В            | В            | В            |
| Опасность внезапных выбросов    | Н            | С            | В            | В            |
| Интенсивность пылеобразования   | Н            | С            | В            | В            |
| Эффективность пылеподавления    | В            | С            | В            | С            |
| Опасность по взрывчатости пыли  | Н            | В            | В            | В            |
| Опасность возн-я. застойных зон | Н            | С            | С            | В            |
| Опасность нарушений АГК         | Н            | Н            | С            | В            |
| Опасность самовозгорания        | Н            | Н            | В            | В            |
| Опасность дугового разряда      | Н            | С            | С            | В            |
| Опасность фрикц. трения         | Н            | Н            | С            | В            |
| Опасность откp. пламени         | Н            | Н            | Н            | В            |
| <b>Риск взрыва</b>              | <b>0,322</b> | <b>0,637</b> | <b>0,805</b> | <b>0,921</b> |

Результаты проведенной оценки (табл. 1) демонстрируют, что модель позволяет производить ранжирование участков по уровням риска взрывов МВС и ПВС. Участки, имеющие явные нарушения условий безопасности, обладают наибольшими значениями показателя риска. Это свидетельствует о возможности применения разработанной экспертной системы для дифференцирования надзорной деятельности с учетом степени риска в рамках динамической модели риск-ориентированного подхода. При этом риск взрыва на шахте будет равен наибольшему значению риска, полученному при анализе всех участков.

Следующим этапом научной работы является интеграция разработанной модели в структуру многофункциональных систем безопасности для проведения мониторинга в режиме реального времени и выполнения прогноза опасных ситуаций, актуальность которого указана в [12]. В этих целях необходимо определение алгоритмов сбора и обработки входных данных, получаемых от датчиков *in situ* с получением комплексного показателя риска на выходе. Данный методический подход может быть применен для оценки риска возникновения аварийных ситуаций различных видов, что создает предпосылки к созданию системы комплексной оценки состояния безопасности шахт в режиме реального времени.



## Литература

1. Рыков, А.М. Риск-ориентированный подход в обеспечении безопасности угольных шахт [Текст] / А.М. Рыков, Ли Хи Ун, Ю.М. Филатов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 73-76.
2. Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [Текст] : Приказ Ростехнадзора от 11.04.2016 N 144 // Консультант-Плюс : справ.-правовая система.
3. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации [Текст] : постановление правительства РФ от 17.08.2016 г. № 806 // Собрание Законодательства. – 2016. – № 35. – Ст. 5326.
4. Javadi, M. Fuzzy Bayesian Network Model for Roof Fall Risk Analysis in Underground Coal Mines [Text] / M. Javadi, G. Saeedi, K. Shahriar // Journal of Applied Sciences. – 2017. – Vol. 17. – P. 103-115.
5. Abdolreza, Y.C. Proposing a new methodology based on fuzzy logic for tunnelling risk assessment [Text] / Y.C. Abdolreza // Journal of Civil Engineering and Management. – 2014. – Vol. 20. – P. 82-94.
6. Markowski, A.S. Application of fuzzy logic to explosion risk assessment [Text] / A.S. Markowski, M.S. Mannan, A. Kotynia etc. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2011. – Vol. 24. – P. 780-790.
7. Домрачев, А.Н. Использование аппарата нейронных сетей и нечеткой логики при оценке вероятности взрыва пылеметановоздушной смеси [Текст] / А.Н. Домрачев, Д.Ю. Палеев, Ю.М. Говорухин и др. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С. 40-43.
8. Немчинов, Д.В. Оценка риска аварий с использованием экспертных систем [Текст] / Д.В. Немчинов // Вестник АГТУ. – 2007. – С. 40-45.
9. Mamdani, E.H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller [Text] / International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – P. 1-13.
10. Коршунов, Г.И. Разработка методики оценки рисков аварий на угольных шахтах с учетом конкретных горно-геологических условий [Текст] / Г.И. Коршунов, О.И. Казанин, М.Л. Рудаков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. С. 375-382.

11. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. –288 с

12. Протокол заседания Научно-технического совета Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №3 от 30.08.2016 г. [Электронный ресурс] Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – [М], 2016. – Режим доступа: URL: [http://www.gosnadzor.ru/about\\_gosnadzor/structure/coordinating/nts/reshiniya-soveta](http://www.gosnadzor.ru/about_gosnadzor/structure/coordinating/nts/reshiniya-soveta) (дата обращения 08.07.2017).