

35. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Онтология надежности механических систем // Искусственный интеллект. - 2004. Институт проблем искусственного интеллекта НАН Украины (Донецк). № 3. С. 266-274.

36. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Кузнецов К.А.. Поддержка принятия решений на основе продукционного подхода при проведении экспертизы промышленной безопасности // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. №11. С. 28-34.

37. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Технология создания продукционных экспертных систем на основе модельных трансформаций / Под. ред. О.А. Николайчук. – Новосибирск: СО РАН. - 2019. 144 с. ISBN 978-5-7692-1646-6. DOI: 10.15372/TECHNOLOGY2019DNO

38. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The Workflow Component of the Knowledge-based Systems Development Platform // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings for the 2nd Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems. - 2019, Vol. 2463. P. 47-58. <http://ceur-ws.org/Vol-2463/>

Сведения об авторе

Берман Александр Фишелевич, профессор, главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения РАН (ИДСТУ СО РАН МНИВО), эксперт РАН, председатель Иркутского отделения Российского научного общества анализа риска, 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134, тел.: 8(3952)453039, 8(914)8925548, e-mail: bafbam@mail.ru

УДК: 551.345; 519.816

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАЛЕДЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Кандидат технических наук **Г.П. Стручкова**, **Н.С. Шеин**,
кандидат физ.-мат. наук **Т.А. Капитонова**

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Одним из негативных инженерно-геокриологическим процессов, оказывающих воздействие на нефтегазопроводы, проложенные в криолитозоне наряду с термокарстом, пучением, эрозией, солифлюкциями, заболоченностью, наличием подземных льдов и т.д. является наледеобразование и сопутствующие ему негативные процессы. Подобные воздействия приводят к тому, что в суровых климатических условиях напряженно-деформированное состояние металла трубопровода испытывает значительной степени изменения, что обуславливает предъявление повышенных требований к материалам, конструкциям и технологиям прокладки трубопроводных сетей.

На основе экспертного опроса и данных геотехнического мониторинга определены основные факторы, влияющие на процесс образования наледей и их воздействия на магистральные трубопроводы. Используя отобранные критерии, сформированы правила нечеткого вывода, позволяющего оценить степень воздействия наледей на функционирование магистрального трубопровода, определить приоритетные участки для своевременных профилактических мероприятий для минимизации их влияния, и снижения риска возникновения ЧС.

Ключевые слова: наледь, магистральные трубопроводы, сезонно-талый слой, нечеткий вывод, лингвистические переменные, база данных.

APPLICATION OF FUZZY MODELING METHODS TO ASSESS THE IMPACT OF ICING ON THE FUNCTIONING OF MAIN PIPELINES

Ph.D. (Tech.) *G.P. Struchkova, V.V. Timofeeva, N.S. Shein,*
Ph.D. (Phys.-Math.) *T.A. Kapitonova*

Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, SB RAS

One of the negative engineering-geocryological processes affecting oil and gas pipelines laid in the permafrost zone along with thermokarst, heaving, erosion, solifluction, bogging, the presence of underground ice, etc. is icing and the accompanying negative processes. Such impacts lead to the fact that in severe climatic conditions, the stress-strain state of the pipeline metal undergoes a significant degree of change, which leads to the presentation of increased requirements for materials, structures and technologies for laying pipeline networks.

Based on the expert survey and geotechnical monitoring data, the main factors affecting the formation of icing and their impact on main pipelines have been determined. Using the selected criteria, the rules of fuzzy inference were formed to assess the impact of icing on the functioning of the main pipeline, determine priority areas for timely preventive measures to minimize their impact, and reduce the risk of an emergency

Keywords: icings, main pipelines, seasonal melt layer, fuzzy inference, linguistic variables, database.

Воздействие наледеобразования и/или сопутствующих опасных инженерно-геокриологических процессов на сооружения линейной части магистрального газопровода оценивается исходя из температуры транспорта газа, принимающей отрицательные значения в холодный период года. При этом к негативным инженерно-геокриологическим процессам, оказывающим воздействие на трубопровод, относятся пучение грунтов обратной засыпки в траншее, избыточное и инъекционное льдовыделение в массиве, как грунтов обратной засыпки, так и вмещающих траншеею грунтов естественного сложения, а так же гидролакколиты, формирующиеся над газопроводом или на сопредельных с ним участках.

Развитие в зоне магистрального трубопровода (МГ) гидролакколитов может сопровождаться их взрывами, т.е. сотрясением примыкающих вмещающих трубопровод массивов грунтов, что необходимо иметь в виду и рассматривать их в качестве самых опасных явлений для всех без исключения наледных участков имеющихся на участке трассы от Чайядинского нефтегазоконденсатного месторождения ЧНГКМ до Сковородино. Это связано с тем, что гидролакколиты могут возникать на любом из участков наледеобразования на протяжении всего срока эксплуатации магистрального газопровода. Кроме этого, такие участки, где за счет транзита подземных вод в траншее будет осуществляться

поступление воды непосредственно к контакту промерзающих грунтов с трубой, так же являются особо опасными, поскольку на стенки трубы и сварные соединения будут передаваться напряжения, связанные с деформациями, развивающимися в массиве вмещающих трубопровод грунтов.

Наледь образуется при вытекании на поверхность грунта речных, подземных, снеговых или ледниковых вод, их распространения и последующего замерзания, как это проиллюстрировано на рис. 1. Наибольшее распространение наледи имеют в районах распространения многолетней мерзлоты, также они характерны для районов глубокого сезонного промерзания дневной поверхности. На интенсивность развития наледей влияют запасы подземных вод и водности предшествующего лета, глубины промерзания сезонно-талого слоя [1-3].



Рис. 1. Наледь, образовавшаяся на участке магистрального газопровода «Сила Сибири»

Наледи классифицируют по типу наледообразующих вод, происхождению, месту отложения, размерам, степени опасности, длительности существования и т.д. По типу наледообразующих вод различают наледи: 1) поверхностных вод (речных); 2) подземных вод (грунтовых вод рыхлой толщи, подземных вод глубоких горизонтов); 3) смешанных вод. По происхождению наледи разделяются на природные, которые возникают и развиваются в природных условиях, и техногенные, возникающие от нарушения водно-теплового режима водотоков и грунтов при дорожном строительстве. По месту отложения наледи разделяются на русловые, логовые, косогорные, откосные, террасовые, конусов выноса. По размерам – классифицируются на малые объемом до 1 тыс. м³; средние от 1 до 10 тыс. м³; большие от 10 до 100 тыс. м³; очень большие от 100 тыс. м³ до 1 млн. м³ и гигантские - более 1 млн. м³. По длительности существования наледи бывают: сезонные, стаивающие летом полностью, и многолетние, часть которых не успевает растаять летом и переходит на следующий зимний сезон [3].

По трассе МГ «Сила Сибири» на 23 наледоопасных и термокарстовых участках обустроены стационарные полигоны, оборудованные термометрическими и гидрогеологическими скважинами; грунтовыми реперами; сетью ледо-, снегомерных вех и геофизическими профилями. Сеть пунктов наблюдений охватывает, помимо контура воздействия МГ, фоновые условия, для выявления и интерпретации локальных деформационных

аномалий. Для установления генезиса подземных вод и, следовательно, динамики наледеобразования производятся гидрохимические исследования источников и водотоков.

С целью изучения влияния высоты снежного покрова на интенсивность развития и размеры наледи, а также определения доли участия твердых осадков в приросте наледей проводится снегосъемка. Измерения высоты снежного покрова проводятся на геофизических профилях, предназначенных для определения мощности льда. Наряду с изучением высоты снежного покрова определяется плотность снега.

Гидрологические наблюдения на гидрометрических створах производятся с целью выяснения особенностей формирования стока наледей, определения дебита источников, доли участия речных вод в формировании наледей. Гидрологические наблюдения на гидрометрических створах включают измерение расхода водотоков, ледового режима рек, уровня и температуры воды.

Известно, что появление факторов наледеобразования по окончании строительства наиболее вероятно при следующих условиях:

а) пересечение земляным полотном склонов, сложенных вечномерзлыми грунтами при устройстве широкой просеки;

б) наличие на склонах большого количества родников и заболоченности ("мокрые склоны");

в) недостаточное количество запроектированных косогорных водопропускных и перепускных сооружений;

г) подрезка водоносных слоев полувыемками и выемками при неполном сбросе воды (на склонах) в низовую сторону в морозный период и т.п.

Инженерными факторами наледеобразования могут являться сами искусственные сооружения, если ими затрудняется пропуск межледяного расхода воды, и особенно, если вода в них скапливается.

Наледи речных и подземных вод образуются поздней осенью и зимой при промерзании потока речных или грунтовых вод или разгрузке подземных вод. Когда в основании водотока залегает неглубоко водоупор в виде вечной мерзлоты или водонепроницаемых пород и живое сечение при промерзании сужается, поток становится напорным, вода через трещины изливается на поверхность и образует наледь.

Участок Аччыгый Леглегер организован как полигон для апробации новых методов изучения динамики формирования наледей с привлечением современных возможностей аппаратуры:

- летательного аппарата Геоскан-401 для ортофотосъемки наледного участка;
- применения тепловизионной съемки;
- комплексного использования георадиолокации и электротомографии.

Высокоточная фотосъемка наледного участка способствует построению топографического плана масштаба 1: 500-1:1000 с сечением горизонталей 0,5-1 м и отображению особенностей рельефа, видоизменяющихся под воздействием криогенных процессов.

По фотоснимкам с летательного аппарата Геоскан в комплексе с полевым обследованием объектов выявлены индикационные признаки проявления в ландшафте различных форм выхода источников подземных вод.

Многопрофильное георадиолокационное сканирование участка перехода МГ через р. Аччыгый Леглегер позволяет проследить временную динамику соотношения талых-мерзлых грунтов в поперечном разрезе. Особенно это важно в условиях трансформации русла реки и изменения естественного режима стока поверхностных вод, конфигурации подруслового талика и т.д., рис. 2,3.

В целях изучения опасности развития криогенных и других опасных инженерно-геологических процессов на рассматриваемом участке проводятся дополнительные геофизические исследования. Основные задачи при проведении геофизических исследова-

ний сводятся к установлению глубины промерзания горных пород под наледным покровом; уточнению структуры фильтрационного потока, формирующего наледь, внутри или под наледным телом; детализации геометрии гидролакколитов и сезонных бугров пучения грунта. А также к установлению глубины деятельного слоя под наледью; установлению глубины промерзания горных пород в пределах полосы отвода МГ; выяснению наличия зон фильтрации наледобразующих вод внутри или под газопроводом; выявлению участков разуплотнения горных пород, если таковые имеются [4,5].

Сеть профилей геофизических исследований определялась для каждого участка индивидуально. Общее правило конфигурирования профилей: шаг между профилями не более 50 м со сгущением – до 10 м, сеть профилей должна полностью перекрывать площадь развития наледи с выходом за ее пределы (в нормальное поле) не менее 20 м. Начало и конец каждого профиля закрепляется на местности временным репером. При производстве режимных исследований каждый последующий цикл наблюдений проводится по той же сети профилей, что и предыдущий (с расширением, при необходимости, площади распространения) [1].

Выполненные геофизические работы позволили получить исчерпывающую информацию о морфологии исследуемого объекта (например, наледи) и динамике его развития, а также обеспечить выделение всех необходимых для проводимого исследования инженерно-геологических, геокриологических и структурно-тектонических границ. Количество циклов геофизических исследований должно обеспечить полное изучение динамики процесса – от зарождения до затухания.



Рис. 2. Изолинии мощности наледи выполненные по данным георадиолокации на участке Аччыгый Лэглэгэр

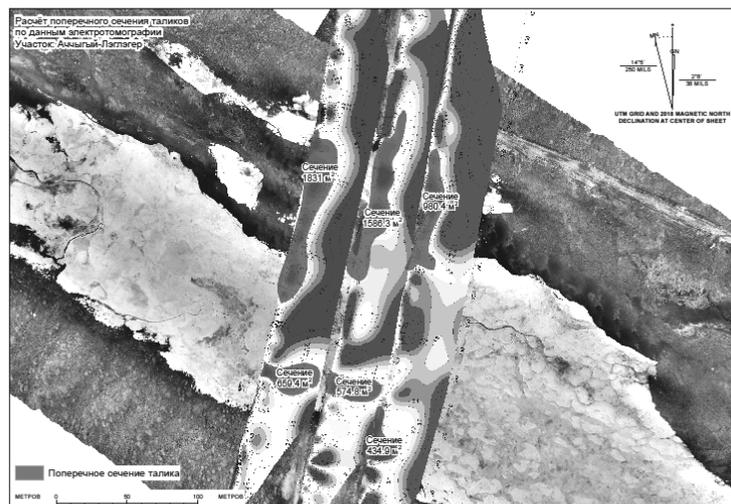


Рис. 3. Результаты геофизических исследований на участке Аччыгый Леглегер

Электротомография выполнялась по предварительно разбитой сети геофизических профилей. Зондирование производилось электроразведочной станцией «Скала-48», установка Шлюмберже. Расстояние между электродами 5 м. Максимальный разнос установки – 235 м, что обеспечивает изучение геологического разреза до глубины – 40 м. Условия заземления нормальные. Конструкция томографа «Скала-48» предусматривает контроль качества заземления исключая, таким образом, возможность получения ложной информации при некачественном заземлении. Для обеспечения непрерывности регистрации электрических свойств среды зондирование производилось с 50 % перекрытием соседних расстановок.

Георадиолокационные исследования выполнялись по предварительно разбитой сети геофизических профилей. Зондирование производится комплектом оборудования «ОКО-2» производства НПП «Логис». Антенный блок – АБ-250/700 обеспечивает высокую детальность исследований верхней части разреза и глубинность исследований до 8 м.

Тепловизионная аэросъёмка производилась с применением полётного комплекса «Геоскан-401». Возможность комплекса позволяет за один полёт получить тепловизионный план и ортофотоплан исследованного участка. Полёты выполнялись на высоте 50 м с курсовым перекрытием съёмки 70 % и боковым перекрытием съёмки 90 % – расстояние между профилями примерно 5 м. Для обеспечения информативности тепловизионных исследований полёты необходимо проводить или в холодные пасмурные дни или рано утром до восхода солнца.

Отслеживание уменьшения площади поперечного сечения водоносных таликовых зон позволит прогнозировать образование (или существование в природных условиях) напорных гидродинамических систем полузамкнутого типа (с подтоком воды).

Применение тепловизионной съёмки способствует выявлению наледообразующего источника на разных этапах (периодах) формирования наледи и принятию предупреждающих мер безопасной эксплуатации технических сооружений.

Традиционный метод изучения приращения мощности и объема наледи наземным способом и камеральная обработка данных существенно облегчается использованием георадиолокационного метода.

Для сбора, хранения и использования данных, полученных в результате геотехнического мониторинга линейных протяженных объектов, была создана база данных (БД). Основу базы данных составляет картографическая система. В качестве исходной информации для формирования БД используются материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и результаты их дешифрирования; данные наземных изыскательских и специальных работ, статистическая и природно-климатическая справочная информация; комплекс показателей, которые представляют собой разнородные, зависящие от многих факторов взаимосвязанные данные. Разнородность и неполнота входных данных об авариях и отказах, о текущем состоянии участков трубопровода является основной сложностью оценки риска.

Рассматривалась оценка возможности активизации геокриологических процессов на участке прохождения трубопровода и ранжирование участков трубопровода по данному показателю. Уровень риска наледеобразования на линейном участке магистрального трубопровода определяется совокупным влиянием ряда факторов. Каждый фактор риска по-разному влияет на общий уровень риска и для каждого фактора определяется его доля ответственности в общем уровне риска. Доля ответственности фактора риска определяется на основе анализа экспертной информации. В качестве факторов, влияющих на степень опасности наледеобразования из литературно-справочных данных и экспертного опроса, были определены следующие входные данные из БД геотехнического мониторинга: средняя температура воздуха, X–V месяцы, годовая; атмосферные годовые осадки, мм; мощность льда, м; площадь наледи, m^2 ; объём льда, тыс. m^3 ; расход воды, m^3/c ; наличие наледных бугров, уклон рельефа, типы грунтов, часть из которых были сгруппированы в укрупненные категории X1 – мощность льда, м; X2 – площадь льда, m^2 ; X3 – источники; X4 – грунты; X5 – наличие наледных бугров; X6 – расстояние от трубопровода до бугра, м; X7 – порядок долины реки.

Для оценки факторов риска были использованы системы нечеткого вывода по методу Мамдани в среде Fuzzy Logic MATLAB; выполнены основные этапы нечеткого вывода: 1) фаззификация входных параметров; 2) формирование базы правил системы нечеткого вывода; 3) агрегирование; 4) активизация подусловий в нечетких правилах продукций; 5) дефаззификация [6-9].

Множество используемых в системе правил, описание функций принадлежности лингвистических переменных, правила импликации и нечетких логических рассуждений, механизм агрегирования создают систему нечеткого вывода. База правил состоит из эмпирических (экспертных) знаний представленных в виде нечетких лингвистических выражений и необходима для преобразования входных переменных в выходные.

Критерием оценки опасности участка МТ в данной постановке является степень опасности возникновения и развития наледи. По результатам анализа экспертных данных и специальной литературы выделены 5 рангов интенсивности воздействия наледей на инженерные сооружения: катастрофический – воздействие определяется высокими скоростями процесса, образованием наледных бугров в радиусе менее 50 метров от трубопровода; сильно опасный – воздействие наледи проявляется при определенном сочетании климатических факторов (зимних температур, количества осадков в предшествующий летнее-осенний период, высоты снежного покрова) характеризуется высокими скоростями наледеобразования, наличием наледных бугров в радиусе менее 50 метров от трубопровода; опасный – скорости процесса и мощности наледеобразования средние, образование наледных бугров; средний – скорости процесса, площади и мощности наледеобразования средние, возможно образование бугров; слабый – небольшие скорости процесса, площади и мощности наледеобразования, наледные бугры не образуются [4].

Критерии определения наледной опасности участка трубопровода представлены в табл. 1.

Критерии ранжирования участков по степени наледной опасности

факторы	термы	Слабая (NO1)	Средняя (NO2)	Опасная (NO3)	Сильно опасная (NO4)	Катастрофическая (NO5)	Катастрофическая (NO5)	Катастрофическая (NO5)
1 Мощность льда h, м	H, (H1=1.0, H2=1.5, H3=2.0 H4=3.0)	H<H1	H<H2	H<H2	H1<H<H3	H1<H<H4	H3<H<H4	H2<H<H3
2 Площадь льда, м ²	S=W/ H, S1=5, S2=50, S3=100, S4=200, S5=300, S6=500, S7=700	S<S2	S3<S<S4	S1<S<S3	S2<S<S4	S2<S<S7	S5<S<S6	S>S6
3 Источники	I Надмерзлотные (NV), подмерзлотные (PM), русловой сток (RS), Несквозных таликов(NT), глубокого подмерзлотного стока(GPS), пластово-поровые воды таликов(PPT), ледоснеговые (LS)	I=LS	I=LS	I=PPT	I=GPS	I=RS	I=NT	I=NM I=PM
4 Грунты	G : пески -G1, супеси-G2, суглинки -G3 торф- G4	G=G2 или G=G1	G=G2 или G=G1	G=G2 или G=G3	G=G2 или G= G3	G=G2 или G= G3 или G=G4	G=G2 или G= G3 или G=G4	G=G2 или G= G3 или G=G4
5 Наличие наледных бугров	B(0.1)	B=0 или B-1 и R3	B=0 или B-1 и R3	B-1 и R2	B-1 и R1	B-1 и R1	B-1 и R2	B-1 и R2
6 Расстояние от трубы до бугра (больше 50 м)	R, R1(<50), R2(<100) R3(>100)							
7 Долины рек	DR Верховья долин(VD), Горные долины(GD), Долины 1 порядка(D1), Долины 2 порядка(D2), Долины 3 порядка(D3).	DR=VD	DR=GD	DR=D1	DR=D2 или DR=D3	DR=D1	DR=D1=D2	DR=D3

Используя экспертный опрос, построены функции принадлежности для термов. На рис. 4 представлены функции принадлежности для термов льдистости. База правила сформирована используя критерии ранжирования участков по степени опасности, полученные из анализа опроса экспертов, справочных и научно-методических материалов. Каждой выходной лингвистической переменной, согласно каждому правилу, назначено нечеткое подмножество.

Далее выполнялось агрегирование, определение степени истинности каждой лингвистической оценки по каждому из правил систем нечеткого вывода. Для нечеткого вывода использовался алгоритм Мамдани. Дефаззификация нечеткого множества осуществлялась по методу нахождения центра тяжести полученной фигуры. Величина фактора сте-

пени наледной опасности оценивалась по шкале от 0 до 5 баллов. В результате дефаззификации при рассмотрении примера на участке МГ Аччыгый Лэглэгэр, получено, что при следующих значениях факторов: мощность льда $h=2,6$ м; площадь льда $S=129482,3$ м²; источники – подмерзлотные стоки, грунты – супесь; наличие наледных бугров – да, расстояние от трубы до бугра $R < 50$ м, долины рек – 2 порядка, значение выходного фактора опасности наледного процесса будет равно 4,28 т.е. относится к катастрофически опасным наледным участкам, рис. 5.

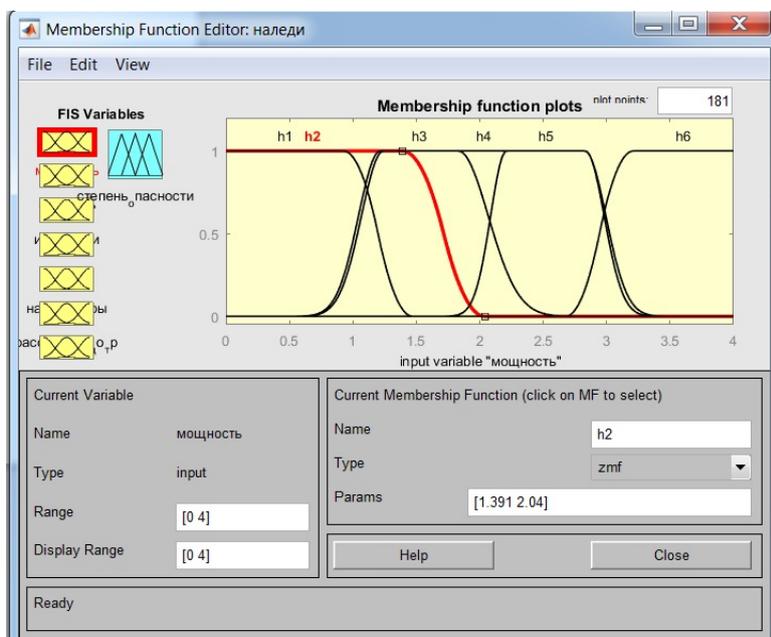


Рис. 4. Функции принадлежности переменной «мощность льда»

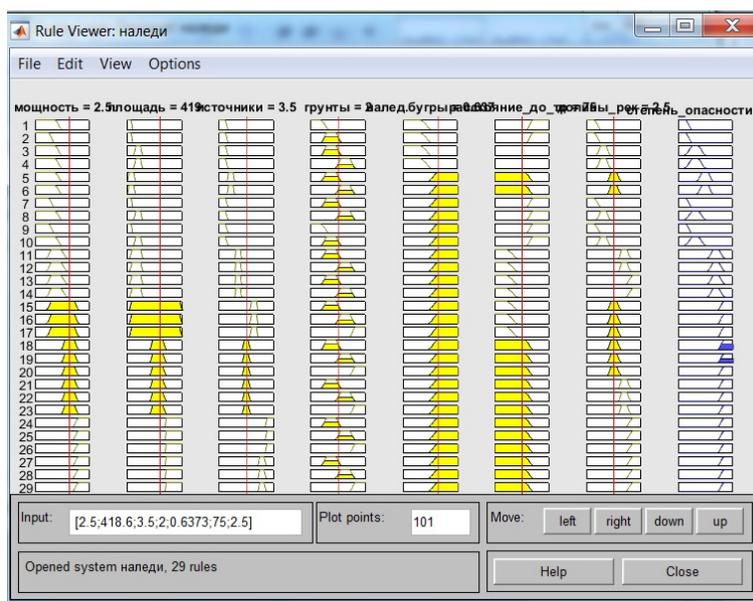


Рис. 5. Визуализация нечеткого вывода

Используя данный подход, были ранжированы участки МГ, представленные в табл. 2 по степени опасности процесса наледеобразования (с позиций оценки фактора как возможной причины аварии); с использованием геоинформационных систем, результаты представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

Исходные данные участков МГ с развитием процессов наледеобразования и оценка степени интенсивности воздействия на элементы МГ

Участок	Порядок долины	Источники	Мощность наледи, м.	Наледные бугры	Расстояние от трубы до бугра, м	Площадь наледи, м ²	Грунты	Степень опасности наледеобразования в баллах	Степень опасности процесса наледеобразования
Аччыгый Лэглэгэр	1-2	5-6 (PM)	2,6	есть	<50	129482,3	супесь	4,28	катастрофическая
Улахан Лэглэгэр	1-2	3-4 (NT)	1,3	есть	<50	74769,23	песок с примесью торфа	3,46	сильно опасная
Тит	1	3-4 (NT)	0,75	есть	<50	15600	супесь	3,2	сильно опасная
Эргэ	1-2	2-3	0,95	есть	>50	6063,158	слабозаторфованная супесь	2,5	опасная
Амунакта	1	4-5 RS	1,5	есть	<50	26208	среднезаторфованная супесь	4,	сильно опасная
Л.Бурухинский	1-2	3-4 (NT)	1	нет	–	10650	супесь	2,5	опасная
Луковка	1	3-4 (NT)	1,5	есть	<50	2520	супесь	3,4	сильно опасная
Малый Онон	1	3-4 (NT)	1,5	есть	<50	2609,333	супесь	2,8	опасная

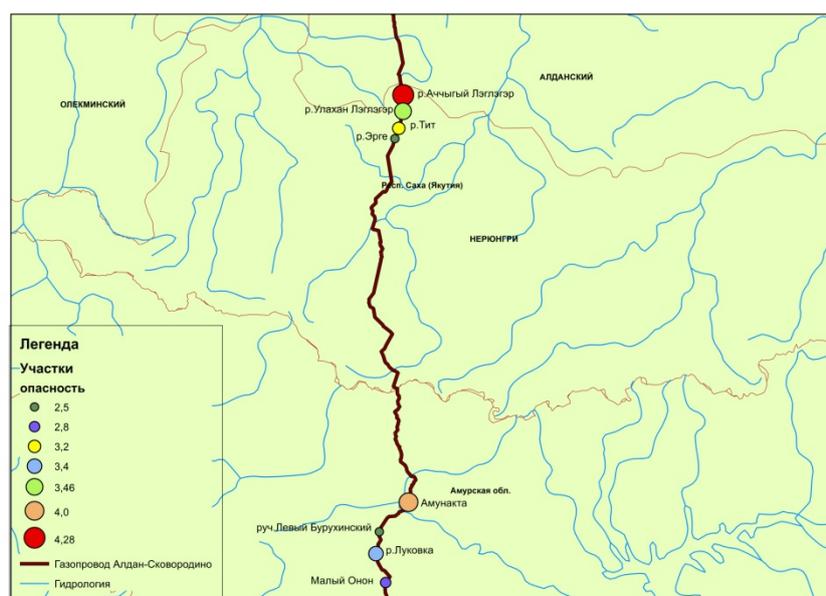


Рис. 6. Ранжирование участков магистрального трубопровода по степени опасности наледеобразования

Выводы

На основании литературно-справочных данных и экспертного опроса, используя данные из БД геотехнического мониторинга были определены основные факторы, влияющие на процесс наледеобразования и сформулированы критерии оценки опасности участка МТ по интенсивности воздействия наледей на инженерные сооружения. На основе полученных критериев опасности сформированы правила нечеткого вывода. Предложенный подход оценки опасности процесса наледеобразования на участках трубопровода с использованием нечетких моделей и технологий позволяет оценить степень интенсивности воздействия наледеобразования на элементы МГ на разных участках трубопровода и выбрать приоритетные участки для профилактических мер по снижению факторов риска. Тем не менее, данный подход является начальным этапом, так как взаимодействия подсистем природно-технической системы представляет собой сложный и многофакторный процесс, и требует разработки моделей взаимного влияния природных процессов и технических систем друг с другом в динамике с учетом изменения характеристик геологической среды, климатических факторов и технологических режимов. Модель должна учитывать не только формирование и развитие аварийных ситуаций, но и, используя геоинформационные технологии и мониторинг по аэрокосмическим данным, обеспечивать возможность прогноза, предупреждения и локализации последствий аварий в зависимости от условий окружающей среды. Состояние безопасности объектов магистральных трубопроводов в мерзлых грунтах во многом определяется своевременным проведением необходимых инженерных мероприятий, позволяющих сократить вероятность возникновения аварий или уменьшить тяжесть их последствий

Литература

1. Гриб Н.Н., Сясько А.А., Кузнецов П.Ю., Павлов С.С., Качаев А.В. Инженерно-геологический мониторинг особенностей развития и формирования наледи на участке нефтепроводной системы // Инженерная геология криолитозоны. – 2013. – № 3. – С.44-52.
2. Гриб Н.Н., Сясько А.А., Качаев А.В., Кузнецов П.Ю. Применение геофизических методов для выявления неблагоприятных инженерно-геологических условий на объекте горно-обогатительный комбинат на золото-сурьмяном месторождении «Сентачан» // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 4. – С. 133-140.
3. Гриб Н.Н., Сясько А.А. Современные технологии в геофизических исследованиях // Наука и техника в Якутии. – 2006. – 2 № 1(10). – С.17-20.
4. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Воздействие наледей на инженерные сооружения. Вестник ЗабГУ. – 2016. Т.22. № 10. – С.30-40.
5. Алексеев В.Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера Земли. 2017, т. XXI, № 6, С. 65–75.
6. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета. – 2000. – 352 с.
7. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. Наука. - 1986. – 497 с.
8. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И. Когнитивный подход в управлении // Проблемы управления – 2007. - № 3. – С. 2-8.
9. Штобва С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком. - 2007. - 288 с.

Сведения об авторах

Стручкова Галина Прокопьевна, - ведущий научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-05-05; +7 984 100 46 32 E-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

Шеин Николай Сергеевич - ведущий инженер Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-05-50, +7 914 276-19-14 E-mail: shnnc@yandex.ru

Капитонова Тамара Афанасьевна, - ученый секретарь Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-06-05; +7 964 417 53 57 E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

УДК: 681.586.5; 681.518.3

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-3

АНАЛИЗ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ТЕПЛОВИЗОРОМ

Доктор техн. наук М.Н. Петров, канд. техн. наук В.О. Колмаков
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (г. Красноярск, Россия)

В работе представлены результаты статистических наблюдений за температурой силовых трансформаторов тяговых подстанций на Красноярской железной дороге. В качестве измерителя использовался тепловизор.

Ключевые слова: безопасность движения, электропоезд, электродвигатель, силовой трансформатор, тяговая подстанция, перегрев, температурный режим, тепловизор.

ANALYSIS OF DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS OF TRACTION SUBSTATIONS BY THERMAL IMAGER

Dr (Tech) M.N. Petrov, Ph.D. (Tech.) V.O. Kolmakov
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution Higher Education "Irkutsk State University of Railway Engineering" (Krasnoyarsk, Russia)

This article presents the results of statistical observations of the temperature of power transformers of traction substations on the Krasnoyarsk railway. A thermal imager was used as a meter.

Keywords: traffic safety, electric train, electric motor, power transformer, traction substation, overheating, temperature mode, thermal imager.