

УДК 004.041

DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-1-168-177

## Методы нечеткой логики в георадарных задачах

Сугак В.Г.<sup>1</sup>, Михайлюк Е.А.<sup>2</sup>, Дубовицкий А.Н.<sup>1</sup>, Маматов Е.М.<sup>3</sup>, Маматов М.Е.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Геоэксперт»

Россия, 308034, Белгород, ул. Королева, д. 2а, к. 2, оф.608

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

<sup>3</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: mikhajlyuk.ea@reliab.tech

**Аннотация.** В статье представлен опыт обработки результатов георадарного зондирования мелового карьера методами нечеткой логики для выделения таких признаков сигналов, которые трудно осуществлять стандартными методами в силу «размытости» или нечеткости этих признаков. Данная методика позволяет выделить дополнительную полезную информацию, прогнозировать качество и более точно оценить состояние подповерхностной структуры участка, в данном случае, степень белизны мела. В основе предлагаемого сценария лежит разработка моделей и методов выделения параметров георадарных сигналов, в частности, их фазо-частотных спектров, позволяющих установить причинно-следственные связи, влияющие на качество принятия решения при наличии совокупности мешающих факторов, на основе использования алгебры нечеткой логики.

**Ключевые слова:** георадар, фазо-частотный спектр, меловой карьер, нечеткая логика, меловой карьер.

**Для цитирования:** Сугак В.Г., Михайлюк Е.А., Дубовицкий А.Н., Маматов Е.М., Маматов М.Е. 2021. Методы нечеткой логики в георадарных задачах. Экономика. Информатика, 48 (1): 168–177. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-1-168-177.

## Fuzzy logic methods in georadar applications

Vladimir G. Sugak<sup>1</sup>, Ekaterina A. Mikhajlyuk<sup>2</sup>, Alexander N. Dubovitskiy<sup>1</sup>,  
Evgeny M. Mamatov<sup>3</sup>, Mikhail E. Mamatov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>«Geoexpert», LLC

Russian Federation, 308034, Belgorod, Korolyova st, 2a, build. 2, office 608

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russian Federation, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46

<sup>3</sup>Belgorod National Research University

Russian Federation, 308015, Belgorod, Pobedy st, 85

E-mail: mikhajlyuk.ea@reliab.tech

**Abstract.** A theoretical justification for the development of a scenario for the subsurface structure state estimation of a chalk quarry site based on the results of GPR sounding is proposed, which allows predicting its quality, namely, the degree of whiteness. The proposed scenario is based on the development of models and methods for identifying parameters of GPR signals, in particular, their phase-frequency spectra, which make it possible to establish causal relationships that affect the quality of decision making in the presence of a combination of interfering factors. In this paper, for the first time, data on GPR sounding of a chalk quarry were obtained, showing the presence of stable signs for the selection of chalk areas with increased whiteness. Such a feature is the phase fluctuations of the reflected signals obtained at the cross-section with respect to the radiated polarization of the received signals. This requires a special antenna, in which the radiation of signals is carried out on the main polarization, and the reception is orthogonal to the radiated one. To obtain a clear conclusion about the probability of attributing the chalk



layer on the studied area of the chalk quarry to the categories of high, medium or ordinary whiteness, it is proposed to use an algorithm based on the theory of fuzzy logic.

**Key words:** georadar, phase-frequency spectrum, chalk quarry, fuzzy logic, chalk pit.

**For citation:** Sugak V.G., Mikhajlyuk E.A., Dubovitskiy A.N., Mamatov E.M., Mamatov M.E. 2021. Fuzzy logic methods in georadar applications. Economics. Information technologies, 48 (1): 168–177 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-1-168-177.

## Введение

Развитие информационных технологий на современном этапе позволяет извлекать существенно больше информации из данных измерений, полученных при проведении всевозможных изысканий в геофизике, чем это было ранее во времена, когда соответствующая аппаратура, методика проведения измерений и интерпретации результатов только разрабатывались.

Необходимость выделения дополнительной полезной информации из данных геофизических измерений диктует необходимость усложнять методы обработки получаемых сигналов для выделения в них таких признаков, обусловленных воздействием исследуемых объектов, которые трудно осуществлять стандартными методами в силу их «размытости» или нечеткости [Замятин, 2006].

В частности, в такой области геофизики, как георадарное зондирование, часто возникает необходимость оценивать возмущения параметров отраженных сигналов, вызванные воздействием исследуемых объектов, находящихся в подповерхностном пространстве, которые являются либо слабо выраженными, либо сопровождаются сопутствующими дополнительными факторами, связанными с воздействием различного рода аномалий структуры грунта [Золотарев, 2017, 2].

Рассмотрим указанные особенности обработки и выделения полезной информации на примере применения георадарного зондирования для обнаружения аномалий, связанных со степенью белизны природного карбоната кальция или мела, в меловом карьере «Мелстром», г. Белгород.

Использование мела в производстве в качестве наполнителя позволяет существенно снизить себестоимость готовой продукции и улучшить ее качество [Гурова, Коваленко]. Уровень белизны природного карбоната кальция, используемого за рубежом в качестве пигмента, составляет 90–95 % (по Эльрефо). Для наполнителя бумаги применяют природный карбонат кальция с белизной 85–95 % и выше. В бумажной промышленности используется измельченный природный карбонат кальция высокой степени дисперсности [Маскайкин, Федотов, Кирюшин, Масляев, 2019].

Поэтому контроль степени белизны мела при разработке меловых карьеров является очень актуальной и важной задачей.

## Методика

В работе впервые оценивается возможность использования специализированного георадара для определения качества мела, а именно степени его белизны, в слое от поверхности выработки до глубины в несколько метров на примере мелового карьера «Мелстром», г. Белгород. Данный меловой карьер является типовым для многих регионов России [Сергеев, Сидорова, 1950, Мощанский, 1975, Sugak, Dubovitsky, 2018]. В качестве георадара использовался экспериментальный макет радиолокатора подповерхностного зондирования со ступенчатым изменением несущей частоты в диапазоне 150–300 мГц, разработанный компанией «Геоэксперт», г. Белгород [Sugak, Sugak, 2010]. Антенна георадара позволяет излучать сигналы с выбранной поляризацией и принимать поочередно сигналы на согласованной и ортогональной к излучаемой поляризациях. В указанной антенне использовано электронное переключение двух взаимно перпендикулярных щелей

треугольной формы, прорезанных в металлическом корпусе с помощью электронного коммутатора, осуществляющего согласование волнового импеданса антенн с кабелем и переключение щелей антенны на прием или передачу. В результате антенна позволяет принимать и после обработки отраженных сигналов получать их полную поляризационную матрицу.

Так как в литературе отсутствует какая-либо информация об опыте применения георадара для решения указанной задачи, то методика изысканий и методы обработки сигналов разрабатывались практически с нуля.

Изыскания проводились на нескольких площадках мелового карьера «Мелстром», г. Белгород (рис. 1) размерами порядка 20x10 м, которые были отобраны его сотрудниками по результатам лабораторных измерений. Всего было выбрано 4 площадки (2 участка с мелом повышенной белизны, 1 участок с мелом средней белизны и 1 участок с обычным мелом), представленные на карте карьера (рис. 1).



Рис. 1. Карта мелового карьера

Fig. 1. Chalk pit map

Данные зондирования, полученные на указанных выше участках, сравнивались между собой и с данными, полученными в лаборатории мелового карьера по образцам, взятым в каждом исследуемом участке, для выявления характерных признаков в георадарных сигналах, которые могли бы в будущем лечь в основу технологии выявления мела повышенной белизны.

На каждой площадке зондирование проводилось в среднем по 4-м параллельным профилям движения георадара. В результате получались радиолокационные изображения сечения грунта по каждому из профилей. В дальнейшем для анализа использовались радиолокационные изображения фазовой структуры сигналов (рис. 1) по каждому из указанных профилей, так как только на них удавалось обнаружить признаки, позволяющие отличить участки с мелом повышенной белизны от других участков с нормальной и обычной белизной.

#### **Оценка возможности применения специализированного георадара для определения степени белизны мела**

Наибольшие отличительные признаки присутствия на исследуемом участке мела повышенной белизны выделяются на изображениях фазовой структуры отраженных сигналов (фазо-частотных спектров) – и только на ортогональной к излученной поляризации этих сигналов. Изображения фазовой структуры сигналов описывают поведение изолиний

фазо-частотного спектра отраженных сигналов [Яхьяева, 2012], в которых ось ординат соответствует глубине от поверхности грунта, ось абсцисс – дистанции, пройденной георадаром при движении по поверхности вдоль выбранного направления, а ряд квазипараллельных кривых – изолиний фазовой структуры сигналов, соответствующих пересечению фазо-частотного спектра отраженных сигналов нулевого значения фазы. По расстоянию между изолиниями и их флуктуациями можно судить о физических свойствах среды зондирования и аномалий в ней [Яхьяева, 2012].

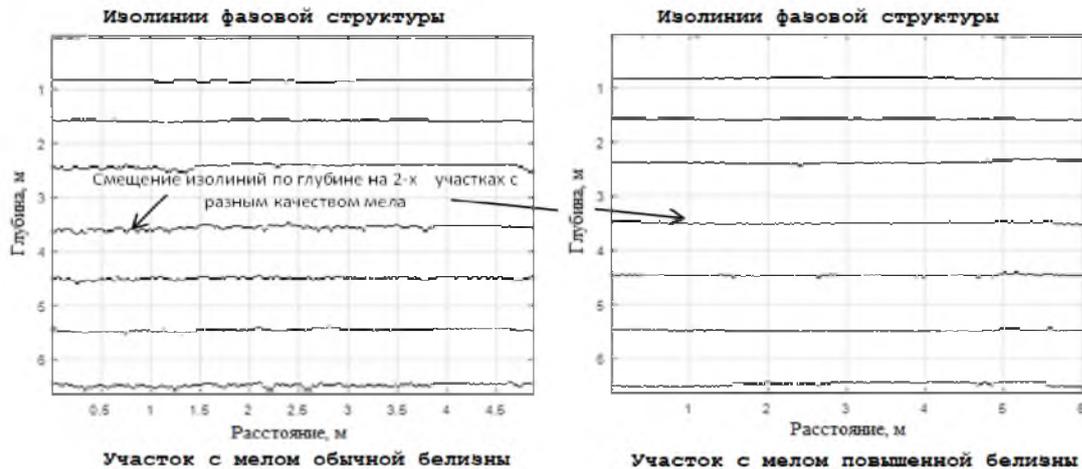


Рис. 2. Изображения фазовых структур на участке с мелом обычной белизны (левый рисунок) и с мелом повышенной белизны (правый рисунок)

Fig. 2. Images of phase structures in an area with chalk of normal whiteness (left figure) and with chalk of increased whiteness (right figure)

На основе полученных предварительных результатов, не вдаваясь в детали обработки сигналов, так как этот материал доступен в большей степени специалистам в области георадарного зондирования, удалось сделать следующие выводы: во-первых, наблюдаются отличия в фазовых структурах сигналов, проявляющиеся в том, что наличие фракций примесей материалов, отличных от чистого мела на участках с мелом обычной белизны, приводят к увеличению флуктуаций фазы сигналов (флуктуации глубины изолиний) в разных элементах объема мела по мере движения георадара вдоль выбранного профиля. Причем этот эффект проявляется на кроссовой к излученной поляризации отраженных сигналов, что требует применения специальных антенн, о которых сказано выше. Вывод иллюстрирует рис. 2, на котором приведены изолинии фазовой структуры отраженных сигналов (рисунки представляют изображения, полученные на 2-х разных профилях). По мере роста глубины наблюдается увеличение флуктуаций фазы отраженных сигналов, соответствующих второму участку с мелом обычного качества. Ось абсцисс соответствует точкам зондирования вдоль профиля движения георадара (всего было пройдено расстояние около 15–20 м). Видно, что флуктуации фазы сигналов накапливаются с глубиной и отличия начинают проявляться уже на глубине около 2–3 м. Во-вторых, указанный эффект наблюдался практически по всем профилям движения георадара на выбранных участках, что позволяет характеризовать его как устойчивый признак, по которому можно обнаруживать и отличать участки карьера с мелом разной степени белизны. Среднеквадратичные значения флуктуаций фазы, соответствующие третьей по счету изолинии фазовой структуры сигналов от поверхности по всем профилям движения на участке с мелом повышенной белизны (левые гистограммы) и участке с обычной белизной (правые гистограммы), приведены в таблице 1. Видно, что наблюдаются существенно большие (на 20–30 %) значения среднеквадратичных отклонений, соответствующих участку с мелом обычной белизны. Этот эффект можно использовать для разработки алгоритма автоматического обнаружения участков с мелом повышенной белизны без использования экспер-

ных оценок, проводимых оператором. В таблице 2 приведены наибольшие среднеквадратичные значения флуктуаций фазы 4-х первых от поверхности изолиний, начиная с глубины 1,3 м. Видно, что в целом наблюдаются существенно большие флуктуации этой фазы на участках с мелом обычной и средней белизны. Однако существуют отдельные профили на участках мела с повышенной белизной, на которых этот вывод не подтверждается. Является ли это следствием того, что на этих профилях наблюдаются существенные отклонения указанных признаков от предполагаемых или на этих участках существуют только локальные зоны с мелом повышенной белизны, пока выяснить не удалось вследствие отсутствия априорной информации.

Таблица 1  
Table 1

Среднеквадратичные значений флуктуаций третьей изолинии  
фазовой структуры сигналов по глубине  
Root mean square values of fluctuations of the third isoline  
of the phase structure of signals over depth

Номер профиля движения георадара на участке	Значение $\sigma$ , [м]	
	Участок с мелом повышенной белизны	Участок с мелом обычной белизны
1	0,076	0,1
2	0,087	0,1
3	0,083	0,104
4	0,089	0,11

Таблица 2  
Table 2

Наибольшие среднеквадратичные значения флуктуаций фазы 4-х первых изолиний  
The largest root mean square values of phase fluctuations of the first 4 isolines

Номер профиля движения георадара	Значение $\sigma$ , [м]			
	Участок с мелом повышенной белизны		Участок с мелом средней белизны	Участок с мелом обычной белизны
1	0,270	0,025	0,200	0,037
2	0,030	0,037	0,025	0,039
3	0,055	0,500	0,040	2,000
4	0,045	0,020	0,500	0,045

В-третьих, наблюдается также стабильное небольшое, порядка 10–20 см, смещение по глубине изолиний фазовой структуры на крессовой к излучаемой поляризации сигнала на участке с мелом средней и обычной белизны в сторону больших значений по сравнению с участком с мелом повышенной белизны. Этот результат также говорит в пользу модели, в которой предполагается, что в структуре мела обычной белизны присутствуют примеси, которые слегка увеличивают диэлектрическую проницаемость, что и приводит к смещению изолиний фазовой структуры по глубине на соответствующем участке. На рис. 2 показан этот эффект и указаны изолинии, на которых максимально наблюдается это смещение. Кроме того, видно также, что флуктуации фазы изолинии на участке с мелом обычной белизны больше соответствующих флуктуаций на участке с мелом повышенной белизны.

Таким образом, результаты зондирований хотя и показывают положительные тенденции в появлении таких характеристик сигналов, которые можно использовать для идентификации нужных аномалий структуры мела по глубине, но их проявления являются нечеткими. Выделять такие структурные признаки классическими методами обработки

сигналов, основанными, например, на применении метода максимального правдоподобия, не представляется возможным.

Поэтому представляет интерес применить методы обработки таких сигналов, основанные на алгоритмах нечеткой логики [Пегат, 2009].

### Использование элементов теории нечетких множеств для обоснования вывода о степени белизны мела по данным георадарного зондирования

Базовые понятия в теории нечетких множеств кратко сводятся к следующим [Григорьева, Гареева, Басыров, 2018]. Пусть  $E$  – универсальное множество,  $X$  – элемент  $E$ , а  $R$  – некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество  $A$  универсального множества  $E$ , элементы которого удовлетворяют свойству  $R$ , определяется как множество упорядоченных пар  $A = \{\mu_A(x)/x\}$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности (или просто функция принадлежности), принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве  $M$  (например,  $M = [0,1]$ ). Функция принадлежности  $\mu_A(x)$  указывает степень (уровень) принадлежности элемента  $X$  подмножеству  $A$ . Если  $M = \{0,1\}$ , то нечеткое подмножество  $A$  может рассматриваться как обычное или четкое множество. Нечеткое множество отличается от обычного тем, что для элементов  $X$  из подмножества  $E$  нет однозначного ответа (да – нет) относительно свойства  $R$ . В связи с этим нечеткое подмножество  $A$  универсального множества  $E$  определяется как множество упорядоченных пар.

Если полное множество, например,  $U$ , состоит из конечного числа элементов  $u_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , то нечеткое множество  $F$  можно представить в следующем виде:

$$F = \mu_A(X_1)/X_1 + \mu_A(X_2)/X_2 + \dots + \mu_A(X_n)/X_n, \quad (1)$$

где "+" означает не сложение, а, скорее, объединение: символ "/" показывает, что значение относится к элементу, следующему за ним (а не означает деление).

Над нечеткими множествами, как и над обычными, можно выполнять математические операции, например, такие как дополнение множества, объединение и пересечение множеств.

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме «если то» и функция принадлежности для соответствующих лингвистических терминов. При этом должны соблюдаться следующие условия:

1. Существует хотя бы одно правило для каждой лингвистической выходной переменной.
2. Для любого термина выходной переменной имеется хотя бы одно правило, в котором этот термин используется в качестве целевой части правила.
3. В противном случае имеет место база нечетких правил.

В данной работе использовался нечеткий логический вывод по алгоритму Мамдани [14] по нечеткой базе знаний по формуле:

$$F = \mu_A(X_1)/X_1 + \mu_A(X_2)/X_2 + \dots + \mu_A(X_n)/X_n, \quad (2)$$

в которой значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами. Тогда функцию принадлежности  $\mu_{jp}(x_i)$  входа нечеткому терму можно определить по следующей формуле

$$a_{i,jp} = \int_{x_{i,min}}^{x_{i,max}} \mu_{jp}(x_i) \setminus x_i. \quad (3)$$

В ходе обработки результатов зондирования рассматривался комплексный подход к формированию количественных показателей, характеризующих объект изысканий, заключающийся в использовании метода и правил нечеткой логики. Иными словами, необходимо было принимать решения при дешифрировании анализируемых данных с учетом косвенных признаков. Данная задача сводится к оптимальному поиску распознаваемых

элементов на изображении, их предварительной классификации с целью извлечения максимального количества дешифровочных признаков и определения соответствующих им количественных оценок. Принятие единственно правильного решения об обнаруживаемом объекте возможно, если в основе моделей при описании свойств объекта используется обоснованный выбор факторов возмущений с оценкой силы их максимального воздействия на объект. При анализе свойств и структуры аномалии иногда необходимо дополнительно учитывать влияние совокупности факторов, связанных с разными отраслями наук, такими как геофизика, биология, химия и пр. Все эти факторы описываются большим числом трудно определяемых переменных, взаимосвязи между которыми установить не всегда просто. Для решения таких задач приходится делать довольно сильные упрощающие допущения, формулируемые в указанных выше математических терминах.

В ходе обработки результатов зондирования было обнаружено влияние среднеквадратичных значений флуктуаций фазы из 4-х первых от поверхности изолиний, начиная с глубины 1,3 м на вывод о наличии участка мела с повышенной белизной. Каждому эксперту в процессе опроса предлагалось оценить с позиции исследователя принадлежность среднеквадратичного значения флуктуации изолиний фазовой структуры сигналов к тому или иному классу качества мела в отношении его белизны. Эксперты давали свою оценку для каждого такого класса по 10-балльной шкале (где 1 – min, 10 – max). Для перехода к универсальной шкале [0,1], все значения 10-балльной шкалы оценки ценности были разделены на максимальную оценку 10. Влияние наличия смещения по глубине изолиний фазовой структуры сигналов, соответствующих крессовой поляризации сигнала на участке с мелом повышенной белизны, пока не изучено полностью, поэтому на данном этапе этот признак пока не введен в функцию принадлежности.

В нечетком логическом выводе по алгоритму Мамдани [Григорьева, Гареева, Басыров, 2018] для перехода от нечеткого множества, заданного на универсальном множестве нечетких термов  $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  к нечеткому множеству, необходимо:

1. «Срезать» функции принадлежности  $\mu_{d_j(y)}$  на уровне  $\mu_{d_j(x)}$ ;
2. Объединить (агрегировать) полученные нечеткие множества. Математически это записывается следующим образом:

$$\tilde{y} = \text{agg}_{j=1,m} \left( \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} \min(\mu_{d_j(X), \mu_{d_j(Y)}) \right), \quad (4)$$

где *agg* – агрегирование нечетких множеств, которое наиболее часто реализуется операцией нахождения максимума.

Четкое значение выхода  $y$ , соответствующее входному вектору  $X^*$ , определяется в результате дефаззификации нечеткого множества. Наиболее часто применяется дефаззификация по методу центра тяжести:

$$y = \frac{\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} y \mu_{d_j(y)} dy}{\int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} \mu_{d_j(y)} dy}, \quad (5)$$

На рис. 3 показана графическая реализация алгоритма определения вероятности выявления участка с мелом повышенной белизны при полученном в результате измерений среднеквадратичной величины флуктуаций фазы равной 0,056 (предполагалось, что эта величина соответствует участку карьера с мелом повышенной белизны). В результате эта вероятность (центр тяжести результата дефаззификации) получилась равной 0,73, что дает основание подтвердить выводы о наличии мела повышенной белизны на этом участке.

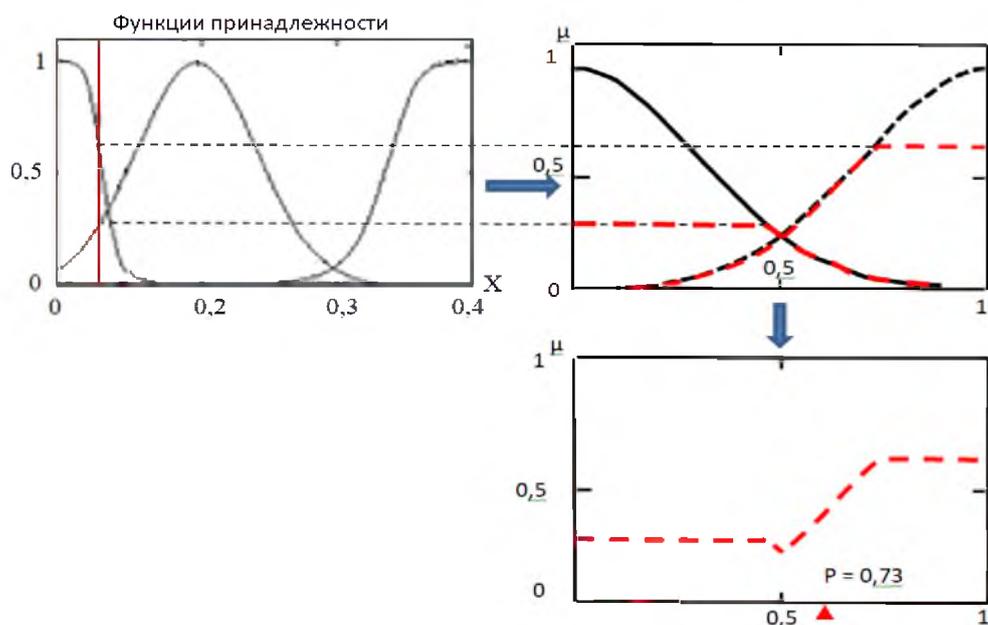


Рис. 3 Графическая интерпретация алгоритма Мамдани получения вероятности отнесения исследуемого участка к мелу, обладающему повышенной белизной

Fig. 3. Graphical interpretation of the Mamdani algorithm of obtaining the probability of assigning the studied area to a chalk with increased whiteness

### Выводы

В работе впервые получены данные по георадарному зондированию мелового карьера, показывающие наличие устойчивых признаков для выделения участков мела, обладающих повышенной белизной. В качестве такого признака выступают флуктуации фазы отраженных сигналов, полученные на крессовой по отношению к излучаемой поляризации принимаемых сигналов. Для этого требуется специальная антенна, в которой излучение сигналов осуществляется на основной поляризации, а прием – на ортогональной к излученной.

Для получения четкого вывода о величине вероятности отнесения слоя мела на исследуемом участке мелового карьера к категориям повышенной, средней или обычной белизны, предлагается использовать алгоритм, основанный на теории нечеткой логики.

### Список литературы

1. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. 2018. Основы нечеткой логики: Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и лабораторным работам. Набережные Челны: НЧИ КФУ. 42.
2. Замятин А.Л. 2006. Повышение информативности исследования геологической среды на основе георадарного зондирования: Горн. информ.-аналит. бюл. 6. 130–132.
3. Золотарев В.П. 2017. Современные тенденции развития георадарного оборудования: Инженерные изыскания. 12: 46–51.
4. Корсунов Н.И., Торопчин Д.А. 2016. Метод классификации изображений на основе кластеризации сложных объектов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. 23 (40): 100–104.
5. Маскайкин В.Н., Федотов Ю.Д., Кирюшин А.В., Масляев В.Н. 2019. Месторождения сырья для минеральных красителей на территории Мордовии: Современные проблемы территориального развития. (2).
6. Мощанский В.А. 1975. О микростроении и классификации мелов: Литология и полезные ископаемые. 3: 67–77.
7. Опыт применения георадарных технологий в дорожном хозяйстве. Режим доступа: [<https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56239/index.htm#i378430>].

8. Обзорная информация. Гурова А.В., Коваленко А.Н. Вся правда о меловых добавках. Режим доступа: [<https://alenmel.ru/stati/vsya-pravda-o-melovykh-dobavkakh>].
9. Пегат А. 2009. Нечеткое моделирование и управление. М.: Бином. Лаборатория знаний. 798.
10. Свойства и применение мела. Режим доступа: [[http://newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=5935](http://newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5935)]
11. Сергеев Е.М., Сидорова Г.А. 1950. К вопросу о составе и свойствах меловых толщин Воронежской области: Вестник МГУ. Серия физ. -мат. и ест. наук. 12: 133–143.
12. Яхъяева Г.Э. 2012. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие. 2 изд. М.: Интернет-Ун-т Информ. Технологий: Бином. Лаборатория знаний. 315.
13. Goodman I.R. 1982. Fuzzy sets as equivalence classes of random sets. Fuzzy Set and Possibility Theory: Recent Developments. New York-Oxford-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt, Pergamon Press. 327–343.
14. Sugak V.G., Dubovitsky A. N. 2018. Antenna Aperture Synthesis For SFCW GPR in a Medium with Frequency Dispersion of Radio-Waves Propagation Phase Velocity. 2018 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 185–187.
15. Sugak V.G., Sugak A.V. 2010. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. IEEE Trans. On Geoscience & Remote Sensing. (48): 1760–1767.

### References

1. Experience in the application of georadar technologies in the road sector. Access mode: [<https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56239/index.htm#i378430>].
2. Goodman I.R. 1982. Fuzzy sets as equivalence classes of random sets. Fuzzy Set and Possibility Theory: Recent Developments. New York-Oxford-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt, Pergamon Press. 327–343.
3. Grigorieva D.R., Gareeva G.A., Basyrov R.R. 2018. Foundations of fuzzy logic: Teaching aid for practical training and laboratory work. Naberezhnye Chelny: NCY KAZAN FEDERAL UNIVERSITY. 42.
4. Korsunov N.I., Toropchin D.A. 2016. Image classification method based on clustering of complex objects. Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies. 23 (40). 100–104.
5. Maskaikin V.N., Fedotov Yu.D., Kiryushin A.V., Maslyayev V.N. 2019. Deposits of raw materials for mineral dyes on the territory of Mordovia: Modern problems of territorial development. (2).
6. Moshansky V. 1975. A. About microstructure and classification of chalk: Lithology and useful minerals. 3. 67–77.
7. Overview information. Gurova A.V., Kovalenko A.N. The Whole truth about chalk's additives. Access mode: [<https://alenmel.ru/stati/vsya-pravda-o-melovykh-dobavkakh>].
8. Pegat A. 2009. Fuzzy Modeling and Control. Moscow: Binomial. Laboratory of Knowledge. 798.
9. Properties and application of chalk. - Access mode: [[http://newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=5935](http://newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5935)].
10. Sergeev E.M., Sidorova G.A. 1950. On the question of the composition and properties of chalk thicknesses of the Voronezh region: MSU Bulletin. Series of physical, mathematical and natural sciences. 12. 133–143.
11. Sugak V.G., Dubovitsky A.N. 2018. Antenna Aperture Synthesis For SFCW GPR in a Medium with Frequency Dispersion of Radio-Waves Propagation Phase Velocity. 2018 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 185–187.
12. Sugak V.G., Sugak A.V. 2010. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. IEEE Trans. On Geoscience & Remote Sensing. (48). 1760–1767.
13. Yakhyaeva G.E. 2012. Fuzzy Sets and Neural Networks: the Schoolbook. 2 ed., Moscow: Internet University of Information Technologies: Binomial. Laboratory of Knowledge. 315.
14. Zamyatin A.L. 2006. Increasing the information content of the study of the geological environment based on georadar probing: Mining information and analytical bulletin. 6. 130–132.
15. Zolotarev V.P. 2017. Modern trends in the development of georadar equipment: Engineering surveys. 12. 46–51.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Сугак Владимир Григорьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный консультант ООО «Геоэксперт», г. Белгород, Россия

**Михайлюк Екатерина Андреевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БГТУ им. В.Г. Шухова., доцент кафедры автоматизированных информационных систем управления СТИ НИТУ «МИСиС», г. Белгород, Россия

**Дубовицкий Александр Николаевич**, генеральный директор ООО «Геоэксперт», г. Белгород, Россия

**Маматов Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

**Маматов Михаил Евгеньевич**, студент Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Vladimir G. Sugak**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, a leading scientific advisor "Geoexpert" LLC, Belgorod, Russia

**Ekaterina A. Mikhajlyuk**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Automated Systems Software Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, National research technological University MISIS, Belgorod, Russia

**Alexander N. Dubovitskiy**, CEO, "Geoexpert", LLC. Belgorod, Russia

**Evgeny M. Mamatov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies Belgorod National Research University. Belgorod, Russia

**Mikhail E. Mamatov**, student of the Belgorod National Research University, Belgorod, Russia