



Научная статья

УДК 550.83.016

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>



Петрофизическое обоснование возможности восстановления упруго-скоростных характеристик геологического разреза на основе данных электромагнитных зондирований

Иван Антонович Шелохов^a, Александр Валентинович Поспеев^b,
Игорь Владимирович Буддо^c

^a—Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

^cИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{a,c}Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шелохов Иван Антонович, sia@crust.irk.ru

Резюме. Геологический разрез Восточной и Западной Сибири (Россия) является крайне сложным объектом для изучения сейсморазведкой. Исследования, представленные в данной работе, были направлены на изучение петрофизической взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольной волны как основы для прогнозирования скоростной модели верхней части разреза на базе данных нестационарных электромагнитных зондирований. Путем численного моделирования петрофизических зависимостей были рассчитаны кривые зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны. Полученные результаты математического моделирования и полевых экспериментов подтверждают эффективность предложенной методики, позволяющей повысить точность восстановления геологической модели и достоверность прогноза. На основе полученных зависимостей были сделаны выводы о том, в каких геологических условиях возможен уверенный переход от геоэлектрических характеристик разреза к скоростным. Показано, что с применением предложенной технологии возможно надежное восстановление скоростной модели верхней части разреза. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования границ геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

Ключевые слова: электроразведка, петрофизическое моделирование, удельное электрическое сопротивление, скорость продольной волны, многолетнемерзлые породы, Западная Сибирь, Арктика

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-20009 (<https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). Проект № 22-17-20009 «Современные методы геофизических исследований для разработки и научного обоснования подходов к изучению внутреннего строения криолитозоны и поверхностных криогенных форм рельефа Арктики и их возможной связи с флюидодинамическими процессами» реализуется при поддержке Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Для цитирования: Шелохов И. А., Поспеев А. В., Буддо И. В. Петрофизическое обоснование возможности восстановления упруго-скоростных характеристик геологического разреза на основе данных электромагнитных зондирований // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 367–379. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>.

Original article

Petrophysical substantiation of geological section elastic-velocity property recovery potential based on TEM data

Ivan A. Shelokhov^a, Alexander V. Pospeev^b, Igor V. Buddo^c

^{a,c}Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^cScientific Center for the Study of the Arctic, Salekhard, Russia

Corresponding author: Ivan A. Shelokhov, sia@crust.irk.ru

Abstract. The geological section of Eastern and Western Siberia (Russia) is a very complicated object for seismic exploration. The research presented in the article is aimed at studying a petrophysical relation between electrical resistivity and



P-wave velocity, as a basis for predicting the velocity model of the upper part of the section based on TEM sounding. Having performed a numerical modeling of petrophysical function, the authors calculated the dependency curves of electrical resistivity on the P-wave velocity. The obtained results of mathematical modeling and field experiments have proved the effectiveness of the proposed methodology as it increases the accuracy of geological model construction and enhances prediction reliability. Based on the dependences obtained, conclusions were drawn about the geological conditions favorable for a steady transition of section geoelectric characteristics to the velocity ones. The proposed technology is shown to provide a reliable reconstruction of the velocity model of the upper part of the section. The use of the developed methodology allows to improve the quality of seismic data processing and increase the accuracy of geological section boundary mapping at minimum cost based on the nature of the problem under investigation.

Keywords: electrical prospecting, petrophysical modeling, electrical resistivity, P-wave velocity, permafrost, Western Siberia, Arctic

Funding: The study is funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-20009 (<https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). Project No. 22-17-20009 "Modern geophysical methods for the development and scientific substantiation of approaches to the study of the internal structure of the permafrost zone, Arctic surface cryogenic reliefs and their possible connection with fluid dynamic processes". The project is implemented with the support of the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

For citation: Shelokhov I. A., Pospeev A. V., Buddo I. V. Petrophysical substantiation of geological section elastic-velocity property recovery potential based on TEM data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):367-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-367-379>.

Введение

Современные сейсмические исследования для разведки нефти и газа не всегда позволяют получить достоверную информацию о скоростных характеристиках верхней части разреза ввиду особенностей приема сигнала и параметров возбуждения. Данный фактор напрямую влияет на качество конечной геологической модели месторождений, которые находятся в сложных поверхностных условиях. В рамках этого существует необходимость привлечения внешних источников информации о верхней части разреза там, где одних сейсмических исследований недостаточно¹ [1–5].

При интерпретации сейсмических данных для районов со сложными поверхностными условиями и неоднородным рельефом необходимо учитывать влияние этой особенности. Источником такого влияния являются аномалии скорости, сосредоточенные в приповерхностных областях относительно тонкой, но неоднородной толщины. Игнорирование влияния этих аномалий на форму отражающего горизонта может привести к ухудшению формы волны во всем временном диапазоне и значительной неопределенности при решении об-

ратных кинематических задач в сейсморазведке².

Материалы и методы исследования

Наиболее распространенная модель удельного электрического сопротивления (УЭС) была предложена Г. Е. Арчи [6, 7]. На основе этого было введено понятие параметра пористости, который представляет собой отношение УЭС породы к УЭС проводящего флюида, заполняющего поры (1):

$$P_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{fl}}, \quad (1)$$

где P_{Π} – параметр пористости; ρ_{Π} – УЭС породы; ρ_{fl} – УЭС насыщающего флюида.

Параметр пористости, в свою очередь, рассматривается как функция коэффициента пористости. Если поровые каналы образуют систему прямолинейных продольных проводников, то параметр пористости обратно пропорционален коэффициенту пористости³. Если структура токовых каналов более сложная (как наблюдается в природе), то расстояние, которое проходит ток относительно длины образца, увеличится, соответственно, возрастет и абсолютное значение степенного коэффициента в уравнении Арчи.

¹Шелухов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

²Там же.

³Там же.



Глиносодержащие породы характерны для относительно молодых терригенных образований, которые не претерпели значительной литификации в ходе своего геологического развития.

Слабосцементированные породы в данном случае имеют все шансы быть представлены в варианте смеси песка (с пористостью до 30–40 %) и глины. На проход тока воздействует совокупность большого объема проводимости, обусловленной перемещением ионов в песочной массе, а также поверхностной проводимости, которая является отличительной чертой глин. Первое условие отвечает закону Арчи, что допускает показатель извилистости от 1,05 вплоть до 1,15 в песке.

Взаимосвязь между сопротивлением и минерализацией поровой воды чистых глин более сложная. При низкой минерализации влияние оказывает поверхностная проводимость: она обеспечивает собственное УЭС глины порядка 2,5 Ом·м.

В ультрапресной воде, в том числе даже с малым объемом глинистого использованного материала, отмечается сопротивление, приблизительно равное сопротивлению чистой глины, деленному на процентное содержание глины в породе⁴. Сопротивление пород в некоторой степени зависит от структуры глины, заполняющей поры песка. На основе петрофизических данных А. А. Рыжов построил номограмму зависимости песчано-глинистой породы от минерализации порового флюида⁵ [8].

Вечная мерзлота – явление, встречающееся в северных регионах России и других государств очень часто. Оно обусловлено отрицательным балансом тепловой энергии. Ниже зоны сезонного влияния не хватает глубинного теплосодержания для поддержания положительных температур в течение всего года. В зависимости от климатического сезона она может простираться от дневной поверхности до основания вечной мерзлоты или быть покрыта слоем сезонного оттаивания, достигающим максимальной толщины в конце лета.

Переход воды в твердую фазу является решающим в отношении формирования значений УЭС. Чистый лед является изолятором, однако осадки, отложенные в пределах криолитозоны, даже если они очень толстые, полностью не промерзают. Капиллярная влага остается незамерзшей и дополнительно насыщается солевыми растворами, вымороженными из породы. Количество незамерзшей связанной воды уменьшается с ростом отрицательных температур и сильно зависит от структуры породы. Полное замерзание связанной воды достигается при температуре ниже -50 °С, но такая температура никогда не встречается на Земле. Влияние вновь образовавшегося льда на УЭС также зависит от степени заполнения льдом поровых пространств в породе. Если внутри них остаются проводящие мостики (массивные криоструктуры), то увеличение сопротивления не так велико. Когда лед становится основным заполнителем (шлировая криотекстура), проводящие мостики разрушаются и сопротивление стремится к УЭС льда.

Изменение УЭС при промерзании не является постепенным, а имеет градиентный характер. Ниже глубины сезонных колебаний температуры градиент времени стабилен, но выше нее УЭС значительно изменяется в зависимости от наличия и толщины сезонно-талого слоя. Отличительной особенностью распределения УЭС песчано-глинистых отложений является сохранение связи между сопротивлением грубодисперсных и тонкодисперсных осадков.

Для кристаллических пород увеличение УЭС вследствие замерзания меньше, чем для осадочных пород. Из-за малой естественной пористости соотношение свободной и связанной воды намного меньше, чем в осадочных породах. В связи с этим УЭС кристаллических пород при промерзании увеличивается не более, чем в 10 раз [9].

Рассмотрим петрофизическую модель упругих свойств. Эмпирическое соотношение скорости и пористости для пористых сред,

⁴ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

⁵ Там же.



заполненных минерализованными флюидом, в 1956 г. предложили М. Р. Дж. Уайли и др. (2):

$$\frac{1}{V} = \frac{1-\phi}{V_{ma}} + \phi/V_{fl}, \quad (2)$$

где V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде [10–13].

Это отношение часто выражают в интервальном времени пробега, называя «уравнением среднего времени»⁶.

При применении данной зависимости необходимо учитывать многочисленные допущения и условия. Независимо от этого, многие авторы предлагают ввести эмпирические поправки для глинистости и смешанной литологии, поскольку они активно используются, когда допущения нарушаются.

Для конкретизации эмпирического уравнения Уайли Л. Л. Раймером с соавторами было предложено соотношение скорости – пористости^{7,8} (3):

$$V = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_{fl}, \quad (3)$$

где V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде.

Также из этого соотношения следует, что (4–6):

$$V = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_{fl}, \quad (4)$$

$$\phi < 37 \%; \quad \frac{1}{V} = \frac{(0.47-\phi)}{(0.1V_{37})} + \frac{(0.37-\phi)}{(0.1V_{47})}, \quad (5)$$

$$37 < \phi < 47 \%; \quad \frac{1}{V} = \frac{(0.47-\phi)}{(0.1V_{37})} + \frac{(0.37-\phi)}{(0.1V_{47})}, \quad (6)$$

$$37 < \phi < 47 \%.$$

Здесь V – скорость в объеме породы; ϕ – коэффициент пористости; V_{ma} – скорость в матрице породы; V_{fl} – скорость в насыщающем флюиде; V_{37} – скорость, рассчитанная для пород с пористостью менее 37 %; V_{47} – скорость, рассчитанная для пород с пористостью более 47 %^{9,10}.

Уравнение (6) имеет схожесть с уравнением среднего по А. Ройсу и используется для расчета скоростей в породах с промежуточной пористостью. Оно выводится путем интерполяции из первых двух (4, 5)¹¹ [14, 15].

Эмпирические преобразования часто не только ценны для получения прямых оценок свойств горных пород, но и выявляют функциональные связи между переменными. Например, можно определить относительное изменение P - и S -волн, вызванное изменением объема пор или содержания глины¹².

Д. Х. Хан с соавторами вывели эмпирические зависимости между скоростью, пористостью и содержанием глины C с помощью ультразвуковых измерений 75 образцов сцементированного песчаника¹³. Измерения проводились при различных значениях эффективного давления и водонасыщения [5, 16]. Рассмотрим некоторые результаты измерений при максимальном и минимальном давлении. Преобразования Хана таковы (7–9):

– для песчаников:

$$40 \text{ МПа } V_p = 6,08 - 8,03\phi \quad V_s = 4,06 - 6,28\phi; \quad (7)$$

– для глинистых песчаников:

$$40 \text{ МПа } V_p = 5,59 - 6,93\phi - 2,18C \quad V_s = 3,52 - 4,91\phi - 1,89C, \quad (8)$$

⁶ Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

⁷ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

⁸ Sheriff R. E. Encyclopedic dictionary of applied geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2002. 429 p.

⁹ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹⁰ Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹¹ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹² Шелохов И. А. Комплексование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹³ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.



$$5 \text{ МПа } V_p = 5,26 - 7,08\phi - 2,02C \quad V_s = 3,16 - 4,77\phi - 1,64C. \quad (9)$$

Здесь V_p – скорость продольной волны; ϕ – коэффициент пористости; C – константа.

Если принять 1 МПа = 145 psi и градиент эффективного давления = 0,5 psi/фут, измерения при 40 и 5 МПа будут соответствовать глубинам приблизительно 3600 и 450 м.

Можно сделать несколько выводов относительно рассматриваемых плотных песчаников:

- зависимость скорости от глубины менее выражена для хорошо сцементированных, чем для несцементированных песчаников;

- с увеличением пористости и объема глины скорость уменьшается примерно в 2,5 раза;

- при увеличении пористости или объемной доли глины коэффициент Пуассона увеличивается;

- коэффициент Пуассона уменьшается с глубиной.

Д. Х. Хан заметил одно интересное петрофизическое свойство чистого песчаника – это стало возможным благодаря разделению набора данных на несколько категорий [5]. Уравнение для чистого песчаника было выведено с использованием только 10 образцов, однако для получения уравнения для глинистого песчаника использовались все образцы, включая образцы чистого песчаника. Приведенное выше уравнение для песчаника не включает компонент глины. Тем не менее скорость чистого песчаника также может быть рассчитана с помощью уравнения для глинистого песчаника при содержании глины $C = 0$ ¹⁴.

Рассчитанный коэффициент Пуассона может отличаться в зависимости от того, какое уравнение используется. Авторы указывают на петрофизическое значение этой разницы следующим образом: «...очень малые объемы глины (1 % или несколько объемных процентов) значительно снижают модуль упругости

песчаника». Это снижение более выражено для модуля сдвига, чем для модуля объемного сжатия. В типичном классическом бассейне большинство песчаниковых формаций содержит небольшое количество глины. В связи с этим чистый песчаник должен иметь значительно сниженный коэффициент Пуассона по сравнению с окружающим глинистым песчанником^{15,16}.

Основные дисперсные пористые влагонасыщенные породы в оттаявшем состоянии располагаются в следующем порядке: песок, суглинки, супесь, глина, песчаник, мергель, мел и известняк (в порядке возрастания скорости распространения продольных упругих волн). Эти породы характеризуются определенным диапазоном значений скорости продольной волны в зависимости от содержания влаги, структуры и текстуры, и, хотя они могут частично перекрываться, приведенный выше ряд выделяется очень четко. В случае мерзлых пород такая классификация не может быть построена без учета влияния температуры, содержания льда и напряженного состояния, иначе породы разного состава были бы неразличимы даже по средним значениям скорости¹⁷. Решающим фактором является температура породы, поэтому можно построить классификацию скоростей мерзлой породы, чтобы охарактеризовать разнообразие свойств в зависимости от состава породы. На рис. 1 представлена классификация в определенном диапазоне температур, полученная в результате обобщения экспериментальных данных. Как видно из диаграммы, в замороженном состоянии по абсолютному значению скорости продольной упругой волны можно выделить только чистый кварцевый песок, насыщенный водой, при температуре ниже -2...-3 °С. Другие песчано-глинистые и карбонатные породы могут быть охарактеризованы теми же значениями скорости продольной волны.

¹⁴ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹⁵ Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media. New York: Cambridge university press, 2009. 511 p.

¹⁶ Шелохов И. А. Комплексирование геофизических методов для прогноза скоростной модели части разреза: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2021. 103 с.

¹⁷ Там же.

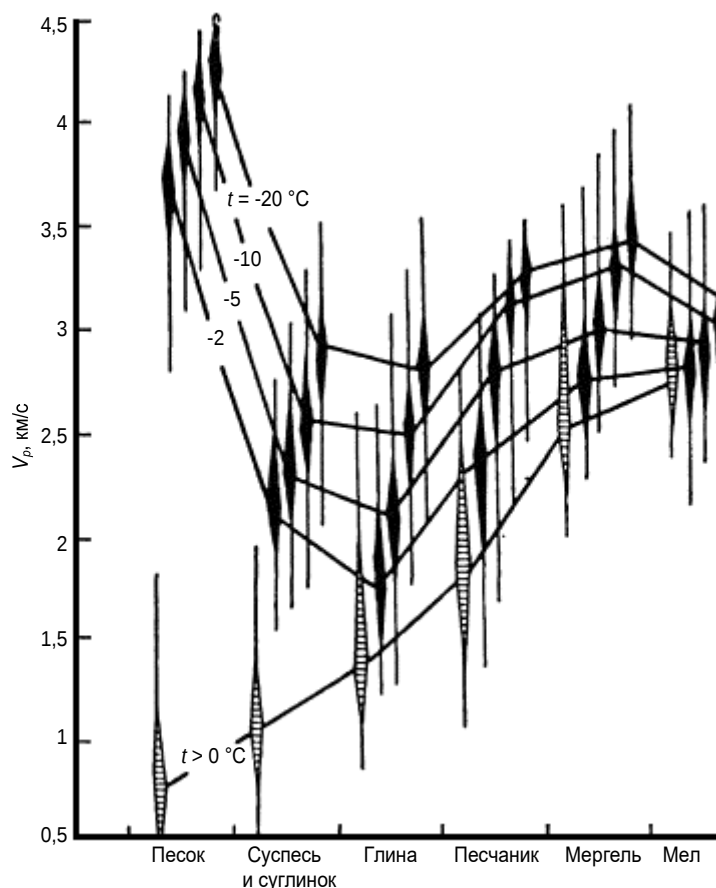


Рис. 1. Диаграмма распределения пород разного литологического состава по скорости продольной волны [17]

Fig. 1. Distribution diagram of rocks of different lithological composition by P-wave velocity [17]

Несмотря на вышеизложенное, рассматривая эти породы при определенной отрицательной температуре, мы обнаруживаем, что они в среднем достаточно четко и стабильно разделяются при значении скорости.

Таким образом, распределение значений скорости продольной волны для влажных пород в замороженном состоянии значительно отличается от их распределения в оттаявшем состоянии (см. рис. 1), что может быть связано с различными фазовыми переходами между водой и льдом в породах с различной дисперсностью и составом пород [17, 18].

Результаты исследования и их обсуждение

Для перехода от геоэлектрических к акустическим свойствам пород можно использовать эмпирические зависимости. В 1951 г. Л. Фаустом впервые была опубликована связь между УЭС и скоростью продольных волн [18]. Актуальность исследования заключалась

в том, что для решения структурной задачи необходимо было рассчитать карту средних скоростей продольных сейсмических волн.

При подборе параметров модели была получена следующая эмпирическая зависимость (10):

$$v = \alpha(ZT)^{\frac{1}{6}}, \quad (10)$$

где v – скорость продольной волны; α – константа; Z – глубина залегания; T – возраст пород изучаемого разреза.

Согласно данным, представленным в данной работе, ошибка в расчете скорости распространения продольных волн по приведенной выше зависимости составила 2–5 %.

Результаты расчетов скоростей, в которых учитывалось влияние литологии, в 1953 г. описал также Л. Фауст [18]. Для учета литологии использовались данные электрического каротажа. В эксперименте значения скоростей продольных волн, полученные по сейсмическим данным, сравнивались со значени-



ями УЭС породы. В результате анализа была получена формула (11):

$$v = \alpha(ZR)^{\frac{1}{6}}, \quad (11)$$

где v – скорость продольной волны; α – константа; Z – глубина залегания; R – УЭС пласта.

Оценка погрешности прогноза скорости по данному уравнению составила 1–2,5 % [19].

С целью обоснования наличия связи между скоростью продольной волны и УЭС для различных геологических условий было выполнено петрофизическое моделирование.

В моделировании рассмотрены такие условия, как:

1. Песчаник при 100 % водонасыщенности, флюид пресный;
2. Песчаник при 100 % водонасыщенности, флюид минерализованный;
3. Глинистый песчаник, пористый при 100 % водонасыщенности, флюид пресный;
4. Глинистый песчаник, пористый при 100 % водонасыщенности, флюид минерализованный;
5. Песчаник крупнозернистый мерзлый;
6. Глинистый разрез, мерзлый.

Из условий 1–4 в качестве исходных данных использовались средние данные по соле-

ности, УЭС пластовой воды и температуре в условиях Восточной Сибири (Ангара-Ленской ступени). Для условий 5 и 6 моделировались породы, типичные для Западно-Сибирского разреза: глина, песчаник, супесь и суглинок.

Первый случай – это чистый песчаник, насыщенный пресноводным флюидом. В расчетах использовалась модель Арчи для УЭС, и модели Уайли и Гарднера для скорости продольной волны.

Минерализация составила 1 г/л. Скорость продольных волн в матрице – 4000 м/с, скорость продольной волны во флюиде – 1460 м/с. УЭС в матрице – 1000 Ом·м, УЭС во флюиде – 20 Ом·м. Вариативным параметром для данной модели являлась пористость, которая менялась от 0,1 до 0,3.

В этой ситуации четко видна корреляция между УЭС и скоростью продольной волны (рис. 2).

Второй случай – песчаник, насыщенный минерализованным флюидом. В расчетах использовалась модель Арчи для УЭС и модели Уайли и Раймера – Хант – Гарднера для скорости продольной волны.

Минерализация составила 300 г/л. Скорость в матрице – 4000 м/с, скорость продоль-

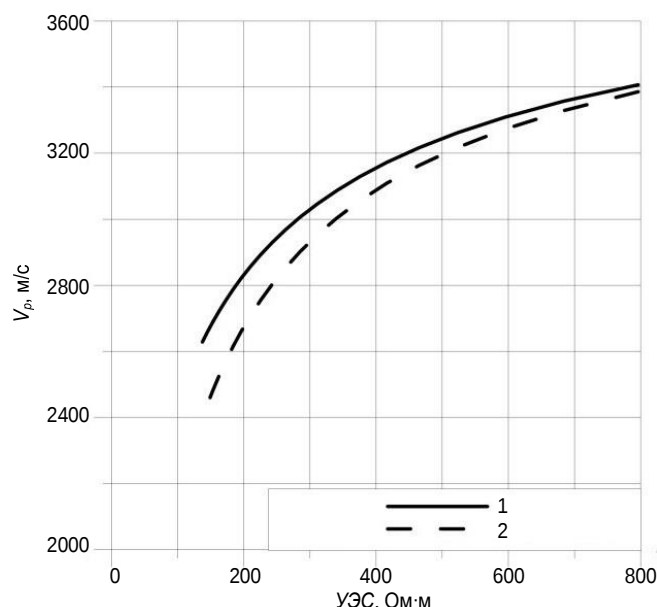


Рис. 2. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для пресного флюида:

1 – Арчи – Уайли; 2 – Арчи – Гарднера

Fig. 2. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for fresh fluid:

1 – Archie – Wyllie; 2 – Archie – Gardner



ной волны во флюиде – 1300 м/с, УЭС в матрице – 1000 Ом·м, УЭС во флюиде – 0,9 Ом·м. Вариативным параметром для данной модели также являлась пористость, которая менялась от 0,1 до 0,3.

Устойчивая связь между УЭС и скоростью продольных волн вновь обнаружена и для случая с минерализованным флюидом (рис. 3).

Немаловажное значение имеет песчано-глинистая модель. В расчетах использовалась модель Рыжова для УЭС и модель Хана для расчета скорости продольной волны.

Минерализация составляла 1 г/л. Скорость в матрице – 4000 м/с, скорость продольной волны во флюиде – 1460 м/с. УЭС снималось с палетки для конкретной величины газонасыщенности. Вариативным параметром для данной модели являлся коэффициент глинистости, который менялся от 0 до 1.

Видно, что в данной ситуации наблюдается стабильная связь между УЭС и скоростью продольной волны (рис. 4).

На следующем этапе в модели менялась минерализация, которая составила 300 г/л.

Для песчано-глинистых пород, насыщенных минерализующими флюидами, наблюдается большая изменчивость (до 50 %) в зави-

симости скорости от УЭС. Этот факт указывает на то, что стабильность восстановления скорости по УЭС быстро снижается с увеличением минерализации (рис. 5).

Поскольку модель мерзлого участка является преобладающей в большей части исследуемого региона, расчеты модели проводились и для нее.

Для мерзлых участков моделирование проводилось по эмпирической зависимости Боголюбова для УЭС и зависимости Джурика для скорости продольной волны. Моделировались случаи с объемной глинистостью $K_{эл} = 1$, $K_{эл} = 0,3$ и $K_{эл} = 0$. Диапазон температур составлял от 0 до -8°C (рис. 6).

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. В песчанике, насыщенном пресным и минерализованным флюидом, существует стабильная связь между скоростью продольных волн и УЭС, что говорит о том, что скорость может быть восстановлена из УЭС с высокой степенью достоверности в данном типе поперечного сечения.

2. Существует также стабильная связь между УЭС и скоростью продольных волн в случае песчано-глинистых разрезов, насыщенных пресноводными флюидами.

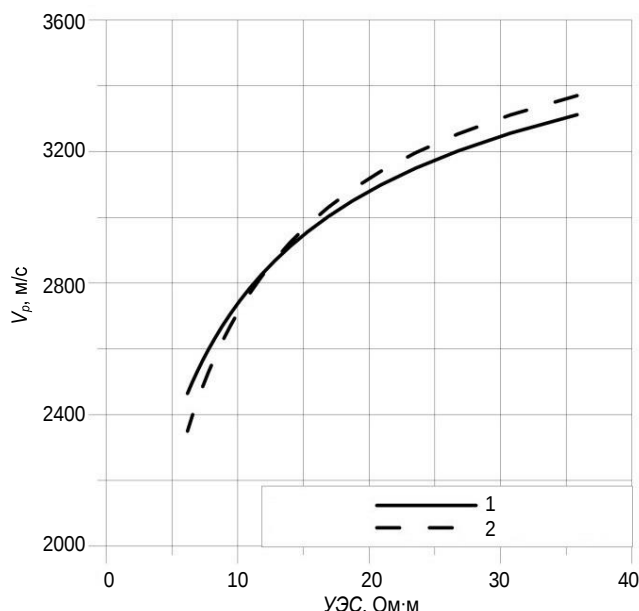


Рис. 3. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для минерализованного флюида:

1 – Арчи – Уайлли; 2 – Арчи – Гарднера

Fig. 3. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for mineralized fluid:

1 – Archie – Wyllie; 2 – Archie – Gardner

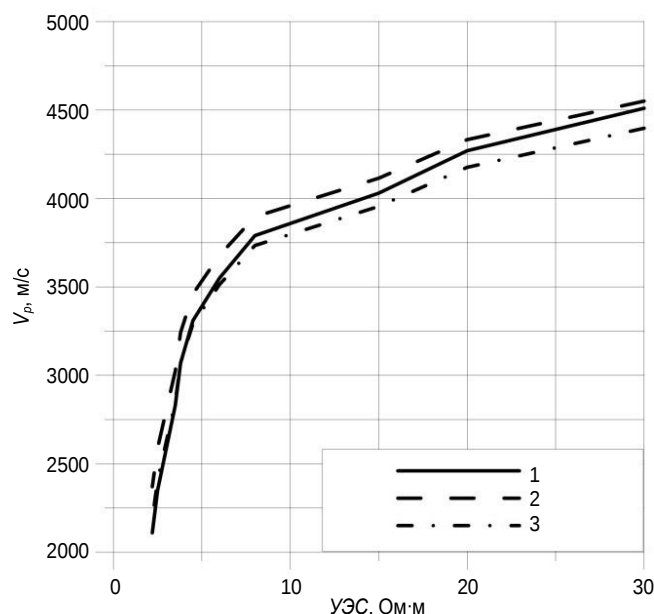


Рис. 4. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для пресного флюида:

1 – Рыжова – Тосайи; 2 – Рыжова – Хана; 3 – Рыжова – Кастаньи

Fig. 4. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for fresh fluid:

1 – Ryzhov – Tosayi; 2 – Ryzhov – Han; 3 – Ryzhov – Castagny

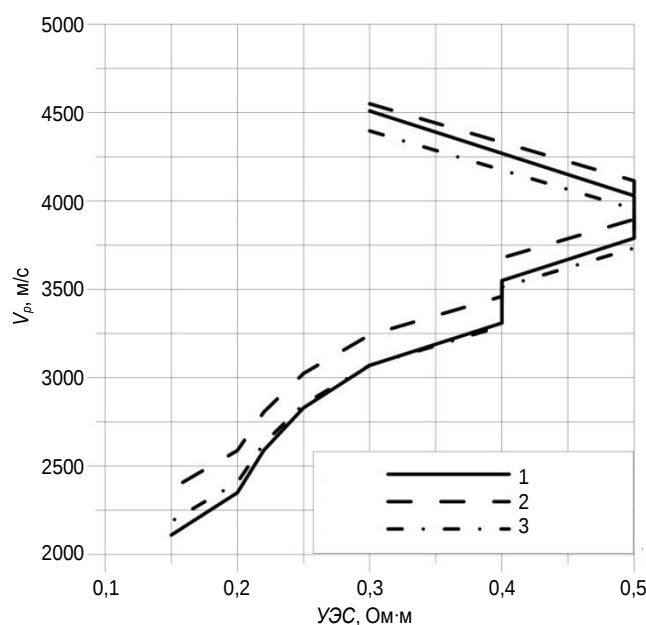


Рис. 5. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны для минерализованного флюида:

1 – Рыжова – Тосайи; 2 – Рыжова – Хана; 3 – Рыжова – Кастаньи

Fig. 5. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity for mineralized fluid:

1 – Ryzhov – Tosayi; 2 – Ryzhov – Han; 3 – Ryzhov – Castagny

3. В случае песчано-глинистых пластов, насыщенных минерализованными флюидами, наблюдается высокая изменчивость (до 50 %) во взаимосвязи между УЭС и скоростью продольных волн. Этот факт говорит о том, что стабильность восстановления скорости по

УЭС быстро уменьшается с увеличением минерализации.

4. Для мерзлого разреза связь скорости продольных волн и УЭС также очень высока, что указывает на применимость подхода к этому типу разрезов.

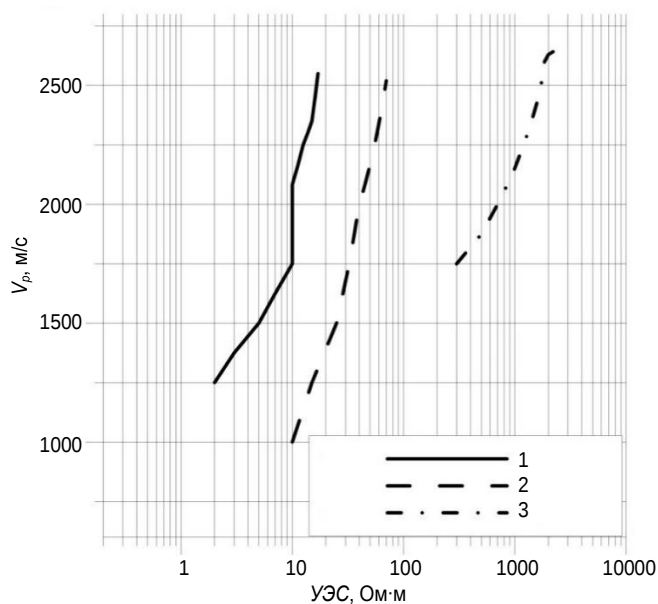


Рис. 6. Модель зависимости удельного электрического сопротивления от скорости продольной волны мерзлого разреза:

1 – $K_{эл} = 1$ (глины); 2 – $K_{эл} = 0,3$ (суглинки); $K_{эл} = 0$ (песчаник)

Fig. 6. Dependence model of electrical resistivity on P-wave velocity of the frozen section:

1 – $K_{cl} = 1$ (clay); 2 – $K_{cl} = 0.3$ (loam); $K_{cl} = 0$ (sandstone)

Закключение

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сказать, что в чистом песчанике, насыщенном пресной и минерализованной водой, наблюдается довольно высокая и стабильная корреляция между скоростью продольных волн и УЭС, что указывает на то, что скорость может быть восстановлена из УЭС с высокой степенью достоверности в данном типе разреза.

В песчано-глинистых разрезах, насыщенных пресными флюидами, наблюдается стабильная связь между УЭС и скоростью продольных волн.

Помимо прочего, для песчано-глинистых пластов, насыщенных минерализованными флюидами, наблюдается высокая изменчивость (до 50 %) во взаимосвязи между УЭС и скоростью продольных волн. Этот факт указывает на то, что стабильность восстановления скорости по УЭС быстро уменьшается с увеличением минерализации.

В мерзлом разрезе связь скорости про-

дольных волн и УЭС также очень высока, что указывает на применимость подхода к этому типу разрезов.

Связь между УЭС и скоростью продольных волн настолько чувствительна к изменениям в литологии (данный факт подтверждается синтетическими и экспериментальными данными), что ее невозможно описать с помощью одной корреляционной функции. В то же время использование нескольких зависимостей одновременно делает процесс пере-счета очень сложным и может способствовать увеличению ошибок.

В рамках данной работы подтверждено теоретическое обоснование предложенного метода. В будущем авторами планируется проведение серии экспериментов с реальными данными.

Эмпирическое уравнение, такое как уравнение Фауста, включающее коэффициенты, зависящие от литологии, значительно упростит процесс преобразования электрических свойств в акустические.

Список источников

1. Шелохов И. А., Буддо И. В., Смирнов А. С. Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2018. № 1-2. С. 58–68.

2. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure // First Break. 2018. Vol. 36. Iss. 10. P. 47–51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>.



3. Пат. № 2722861, Российская Федерация. Способ расчета статических поправок / И. А. Шелохов, И. В. Буддо, А. С. Смирнов, М. В. Шарлов, Ю. А. Агафонов. Заявл. 09.07.2019; опублик. 04.06.2020.

4. Шарлов М. В., Буддо И. В., Мисюркева Н. В., Шелохов И. А., Агафонов Ю. А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой Fastsnap // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. № 2. С. 8–23.

5. Шелохов И. А., Буддо И. В., Смирнов А. С., Пьянков А. А., Татянин Н. В. Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной и Западной Сибири. Георесурсы. 2021. Т. 23. № 3. С. 60–72. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>.

6. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Transactions of the AIME. 1942. Vol. 146. Iss. 1. P. 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

7. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.

8. Рыжов А. А., Судоплатов А. Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр: сб. ст. М.: Изд-во ВИЭМС, 1990. С. 27–41.

9. Поспеев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Шарлов М. В., Компаниец С. В., Токарева О. В. [и др.]. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.

10. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media //

Geophysics. 1956. Vol. 21. Iss. 1. P. 41–70. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438217>.

11. Wyllie M. R. J., Gregory A. R. Formation factors of unconsolidated porous media: influence of particle shape and effect of cementation // Journal of Petroleum Technology. 1953. Vol. 5. Iss. 4. P. SPE-223-G. <https://doi.org/10.2118/223-G>.

12. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner G. H. F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media // Geophysics. 1958. Vol. 23. Iss. 3. P. 459–493. <https://doi.org/10.1190/1.1438493>.

13. Wyllie M. R. J., Gardner G. H. F., Gregory A. R. Studies of elastic wave attenuation in porous media // Geophysics. 1963. Vol. 27. Iss. 5. P. 569–589. <https://doi.org/10.1190/1.1439063>.

14. Sheriff R., Geldart L. Exploration seismology. New York: Cambridge University Press, 1995. 622 p.

15. Sheriff R. E. Inferring stratigraphy from seismic data // AAPG Bulletin. 1976. Vol. 60. Iss. 4. P. 528–542. <https://doi.org/10.1306/83D923F7-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

16. Han D.-H., Nu A., Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones // Geophysics. 1986. Vol. 51. Iss. 11. P. 2093–2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>.

17. Джурик В. И., Лещиков Ф. Н. Экспериментальные исследования сейсмических свойств мерзлых грунтов // Доклады и сообщения: Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск, 1973. Вып. 6. С. 64–68.

18. Faust L. Y. A velocity function including lithologic variation // Geophysics. 1953. Vol. 18. Iss. 2. P. 271–288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>.

19. Зайцев С. А., Сысоев А. П. Прогнозирование скоростной модели по данным ГИС // Технологии сейсморазведки. 2016. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2016-4-56-60>.

References

1. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S. An approach to restoring the velocity characteristics of the upper part of the section based on the data from non-stationary electromagnetic soundings. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2018;1-2:58-68. (In Russ.).

2. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. *First Break*. 2018;36(10):47-51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>.

3. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Sharlov M. V., Agafonov Yu. A. *Static corrections calculation method*. Patent RF, no. 2722861; 2020. (In Russ.).

4. Sharlov M. V., Buddo I. V., Misjurkeeva N. V., Shelokhov I. A., Agafonov Ju. A. Experience of effective study of the upper part of the section by near-field transient electromagnetic sounding method with fastsnap system. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*. 2017;2:8-23. (In Russ.).

5. Shelokhov I. A., Buddo I. V., Smirnov A. S., Piyankov A. A., Tatiyanin N. V. Shallow velocity model from the transient electromagnetic method data: results of application in Eastern and Western Siberia. *Georesursy = Georesources*. 2021;23(3):60-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>.

6. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME. 1942;146(1):54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

7. Dakhnov V. N. *Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks*. Moscow: Nedra; 1985. 310 p. (In Russ.).

8. Ryzhov A. A., Sudoplatov A. D. Calculation of sandy-clay rock specific electrical conductivity and use of functional dependencies in solving hydrogeological problems. In: *Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt v oblasti geologii i razvedki neдр = Scientific and technical achievements and advanced experience in the field of geology and subsoil exploration*. Moscow: All-Union Institute of Economics of Mineral Resources and Geological Exploration; 1990, p. 27–41. (In Russ.).

9. Pospeev A. V., Buddo I. V., Agafonov Yu. A., Sharlov M. V., Kompaniets S. V., Tokareva O. V., et al. *Modern practical electrical exploration*. Novosibirsk: Geo; 2018. 231 p. (In Russ.).

10. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner L. W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media.



Geophysics. 1956;21(1):41-70. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438217>.

11. Wyllie M. R. J., Gregory A. R. Formation factors of unconsolidated porous media: influence of particle shape and effect of cementation. *Journal of Petroleum Technology*. 1953;5(4):SPE-223-G. <https://doi.org/10.2118/223-G>.

12. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., Gardner G. H. F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics*. 1958;23(3):459-493. <https://doi.org/10.1190/1.1438493>.

13. Wyllie M. R. J., Gardner G. H. F., Gregory A. R. Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics*. 1963;27(5):569-589. <https://doi.org/10.1190/1.1439063>.

14. Sheriff R., Geldart L. *Exploration seismology*. New York: Cambridge University Press; 1995. 622 p.

15. Sheriff R. E. Inferring stratigraphy from seismic

data. *AAPG Bulletin*. 1976;60(4):528-542. <https://doi.org/10.1306/83D923F7-16C7-11D7-8645000102C1865D>.

16. Han D.-H., Nu A., Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*. 1986;51(11):2093-2107. <https://doi.org/10.1190/1.1442062>.

17. Dzhurik V. I., Leshchikov F. N. Experimental studies of seismic properties of frozen soils. In: *Doklady i soobshcheniya: Mezhdunar. konf. po merzlotovedeniyu = Reports and contributions: International conference on permafrost studies*. Yakutsk; 1973, iss. 6, p. 64-68. (In Russ.).

18. Faust L. Y. A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*. 1953;18(2):271-288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>.

19. Zaytsev S. A., Sysoev A. P. Log data based velocity model prognosis. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2016;4: 56-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2016-4-56-60>.

Информация об авторах / Information about the authors



Шелохов Иван Антонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник Лаборатории комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
Научный центр изучения Арктики,
ведущий научный сотрудник,
г. Салехард, Россия,
sia@crust.irk.ru.

Ivan A. Shelokhov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Junior Researcher of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Scientific Center for the Study of the Arctic,
Leading Researcher,
Salekhard, Russia,
sia@crust.irk.ru.



Поспеев Александр Валентинович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Лаборатории геологии нефти и газа,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
avp@crust.irk.ru.

Alexander V. Pospeev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Leading Researcher of the Oil and Gas Laboratory,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
avp@crust.irk.ru.



Буддо Игорь Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ведущий научный сотрудник,
Научный центр изучения Арктики,



г. Салехард, Россия,
biv@crust.irk.ru.
Igor V. Buddo,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Integrated Geophysics,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Associate Professor of the Department of Applied Geology,
Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Scientific Center for the Study of the Arctic,
Salekhard, Russia,
Leading Researcher,
biv@crust.irk.ru.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 07.09.2022; approved after reviewing 11.10.2022; accepted for publication 14.11.2022.