# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ (ШУНГИТОВЫХ) ПОРОД



**П. А. РЯЗАНЦЕВ**, старший научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук, chthonian@yandex.ru

# **Р. В. САДОВНИЧИЙ**,

научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

## Введение

Малоглубинные методы сейсмической разведки традиционно используют для изучения верхней части разреза (ВЧР) как при инженерно-геологических изысканиях, так и для поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых [1]. Существуют отработанные методики, позволяющие определить состояние горного массива, например при добыче каменных строительных материалов открытым способом [2]. В свою очередь, перспективным направлением для развития сейсморазведки является поиск новых подходов для определения не только прочностных, но и технологических, минералогических и других показателей обследуемого сырья. Решить подобные задачи становится возможным путем использования высокоинформативных скоростных моделей, полученных на разных видах упругих волн.

Развитие подходов к исследованию высокоуглеродистых пород является важным геологическим направлением, что обусловлено, в том числе, их востребованностью при производстве новых материалов. Существует необходимость четкого определения минералогических и технологических свойств таких пород и выделение их типов уже на стадии поисков и разведки. В Республике Карелия известен ряд месторождений высокоуглеродистых (шунгитовых) пород, массовое содержание углерода (С<sub>масс</sub>) в которых составляет более 25 %. В силу уникального сочетания различных физико-химических свойств (высокая биологическая активность, химическая стойкость, электропроводность, адсорбционные, радиоэкранирующие и другие свойства) шунгитовое сырье является многоцелевым минеральным сырьем и может быть использовано в различных областях промышленности, в том числе и в области высоких технологий [3, 4]. На основе сейсморазведочных работ получены скоростные модели, позволяющие выявить включения интрузивных пород в продуктивной толще и оценить пространственную изменчивость шунгитовых пород.

Ключевые слова: шунгитовые породы, углерод, сейсмическая томография, скоростные модели, корреляция, продольные волны. DOI: 10.17580/azh.2019.03.12

В данной статье рассматривается опыт использования скоростных моделей, полученных методом сейсмотомографии для поиска геологических неоднородностей на месторождении шунгитовых пород. Кроме того, на основе комплексного сопоставления физических показателей и массового содержания углерода в шунгитовых породах оценены перспективы определения их природных типов в естественном залегании.

#### Характеристика объекта исследования

В настоящее время в Республике Карелия разведаны и разрабатывают несколько месторождений высокоуглеродистых шунгитовых пород (ШП), которые расположены в пределах Онежской палеопротерозойской структуры. наиболее крупным из которых является Максовское [5], которое расположено в 3 км к югу от пос. Толвуя (Медвежьегорский район) и приурочено к антиклинальной складке третьего порядка, проходящей по оси Толвуйской синклинали. Залежь разрабатывают открытым способом с 2001 г.: на начало разработки суммарные запасы высокоуглеродистых ШП составляли 33,4 млн т [6]. В разрезе месторождение имеет пластово-куполообразную форму с максимальной мощностью в центре 120 м, в горизонтальном сечении его форма эллипсоидальная размером 700×500 м (рис. 1), а кровля в значительной степени эродирована. Вмешающими породами являются алевролиты, доломиты, карбонатные и альбит-кремнистые туфы, малоуглеродистые шунгитовые породы [7]. Геологическое строение месторождения осложнено выходом в его центральной и западной частях нескольких долеритовых силлов, а в северной приосевой части развиты карбонатно-биотитовые калиевые метасоматиты по пепловым туфам, образующие купол диаметром 160 м и высотой 80 м [6].

В настоящее время существует ряд классификаций ШП, основными критериями в которых являются: содержание углерода, кремнезема и алюмосиликатов; предполагаемый способ накопления и характер распределения органического вещества; генезис, особенности залегания и минеральный состав, а также содержание определенных химических элементов, лимитируемых



# Рис. 1. План геологического строения (а) и разрезы Максовского месторождения (б) ([4]; в технической редакции авторов)

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – алевролиты; 3 – доломиты; 4 – туфы алевролитовые; 5 – туфы альбито кремнистые, малоуглеродистые шунгитовые породы; 6 – переслаивание туфов разного состава; 7 – карбонатные туфы; 8 – карбонатно-биотитовые метасоматиты; 9–14 – горизонты шунгитовых пород, соответственно девятый, восьмой, седьмой, шестой, пятый, четвертый; 15 – долериты; 16 – контур карьера (по состоянию на 2017 г.); 17 – буровые скважины; 18 – геофизические профили

промышленностью. В целом вопрос общей классификации и терминологии ШП, равно как и вопрос их генезиса, до сих пор окончательно не решен. Многие исследователи используют различные классификации и обозначения для одних и тех же пород [5, 7–11]. Одной из наиболее простых является классификация ШП, основанная на выделении трех природных типов по содержанию углерода: высокоуглеродистые (свыше 25 %), среднеуглеродистые (5–25 %) и малоуглеродистые (менее 5 %) [9]. Эта классификация и используется далее.

На Максовском месторождении ШП представлены преимущественно разновидностями массивной, прожилковой и брекчиевой текстуры. Для всех пород характерна афанитовая структура, матовый или графитовый блеск и раковистый излом. Химический состав ШП отличается широкими вариациями содержания углерода и кремнезема, суммарная концентрация которых в породах различной текстуры составляет 85–90 %. В пределах месторождения представлены преимущественно высокоуглеродистые разновидности ШП, тогда как малоуглеродистые разновидности локализованы главным образом в северо-западной части и по направлению к центру постепенно сменяются на средне- и высокоуглеродистые. Переход между типами ШП сопряжен с изменением соотношения доли кварца и шунгита на уровне микроструктуры [12].

Обобщение имеющегося материала по Максовскому месторождению позволяет сделать вывод о необходимости привлечения дополнительных технических средств для детальной оценки как имеющихся запасов ШП и их технологических свойств, так и геологических рисков, которые могут возникнуть при горной отработке.

### Методика и результаты исследования

Согласно результатам предшествующих исследований [9], плотность ШП увеличивается при уменьшении содержания в них углерода. Этот факт служит предпосылкой для изучения особенностей месторождений ШП с использованием геофизических методов, учитывающих плотностные показатели среды, в том числе малоглубинной сейсморазведки. Целью данного исследования являлось изучение возможности выявления пространственных неоднородностей Максовского месторождения высокоуглеродистых ШП с использованием метода сейсмической томографии. Пространственные неоднородности в данном случае могут быть связаны как с переменным содержанием углерода в породах, так и с наличием в теле месторождения интрузий долеритов.

Сейсмотомография основывается на базовых принципах метода преломленных волн (МПВ) и заключается в восстановлении скоростных характеристик среды по временам пробега упругой волны [1]. Путем регистрации колебаний в пунктах приема (ПП) упругой волны, продуцированной в пункте возбуждения (ПВ), можно восстановить график зависимости времени от расстояния (годограф), по которому вычисляется скорость прохождения волны в геологической среде. Система наблюдений при томографических работах подразумевает частое расположение ПП и ПВ, и, как следствие, это приводит к созданию множества сейсмических лучей. что обеспечивает «просвечивание» геологической среды, а геологические структуры и неоднородности проявляются в виде вариаций скоростей. В сейсморазведке могут использовать разные типы упругих волн, однако в рамках данного исследования определяли скорости продольных волн (V,). Обработка данных при использовании томографического подхода заключается в решении обратной кинематической задачи путем восстановления искомого скоростного разреза на основе последовательного подбора опорных математических моделей [13]. Как показывает практика, сейсмотомография обеспечивает достаточно точное описание геологических неоднородностей. особенно в условиях слабого контраста упругих свойств горных пород и градиентного изменения скоростей [14].

Основой для использования скоростных характеристик при изучении Максовского месторождения служит контрастность вмещающих осадочных пород и интрузивных долеритов в сравнении с ШП. Например, для долеритов характерны  $V_p = 3,6\div8,1$  км/с, туфов  $V_p = 2,4\div6,1$  км/с, доломитов  $V_p = 2,2\div6,6$  км/с [2]. Наряду с этим, так как скоростные свойства ШП детально изучены для первичного описания, использовали значения схожих пород (углеродистых сланцев и т. п.), где  $V_p = 1,7\div2,9$  км/с [2].



Опыт сейсморазведочных работ на высокоуглеродистых породах, в частности черных сланцах, можно найти в публикации [15], где показана эффективность сейсмотомографии при геологическом картировании сланцевой формации, скорости продольных волн для которой были определены около 3 км/с. Существует ряд успешных примеров выявления геологических неоднородностей и опасных процессов на основе скоростных моделей при исследовании угольных месторождений [16, 17].

Полевые сейсморазведочные наблюдения выполняли по отдельным профилям на уступах действующего карьера (см. рис. 1), расположение которых диктовалось текущей горнотехнической ситуацией. Запись выполнялась цифровой сейсморазведочной 24-канальной станцией «Лакколит X-M3» с косой на 24 вертикальных сейсмоприемниках, которые были расположены через 5 м. ПВ располагались вдоль косы на каждом приемнике, также дополнительно делали два выносных ПВ через 5 м на краях косы. Возбуждение сигнала проводилось падающим грузом (кувалдой) с десятью накоплениями. Для обработки выбирали наиболее представительные записи, на которых пикировались времена первых вступлений преломленных волн. На основе набора годографов, полученных в каждом ПП, подбирали гладкую скоростную модель, которая отражает литологическое строение и геологические неоднородности исследуемой среды.

Рассмотрим информативные возможности полученных скоростных моделей на примере двух субпараллельных профилей (**рис. 2**), один из которых проходил по верхнему уступу карьера с отметкой +50 м (профиль № 1), а второй – по нижнему технологическому горизонту +40 м (профиль № 2). На основе приведенных выше данных о скоростных характеристиках пород на первом этапе можно уверенно разделить ШП и силл долеритов. На профиле № 1 плотные и, как следствие, высокоскоростные долериты уверенно локализуются в центральной части на глубине 8–10 м и пикетах (ПК) 36–76. Также к областям влияния долеритов можно отнести и скоростную неоднородность на ПК 16–29.

На профиле № 2 также прослеживаются долериты, но так как высотная отметка располагается на 10 м ниже профиля № 1, интенсивность их влияния усиливается. Это приводит к формированию высокоскоростной области между ПК 15–100 и выявлению двух локальных максимумов на ПК 17–37 и 60–75. Наличие таких максимумов позволяет предположить сложную форму интрузивного тела долеритов. Увеличиваются и общие показатели



Рис. З. Карты распределения скоростей:

*а* – на горизонте +40 м (кружками указано содержание углерода в ШП); *б* – на горизонте +30 м с нанесенными скважинами

V<sub>p</sub> вследствие меньшего влияния природной и техногенной нарушенности, которая отмечается на вышележащих горизонтах.

Для выполнения комплексной интерпретации на основе совокупности скоростных моделей были получены карты распределения скоростей V<sub>p</sub> на глубинах +40 (**рис. 3**, *a*) и +30 м (см. рис. 3, *б*). Использование двух глубинных срезов диктовалось рядом геологических причин. Во-первых, верхний срез позволил выполнить сопоставление скоростей и результатов определения С<sub>масс</sub>, полученных по образцам, отобранным с поверхности. В свою очередь, нижний срез обеспечивает локализацию скоростных неоднородностей, сформированных геологическими неоднородностями – интрузиями долеритов и прослоями карбонатных туфов.

При детальном рассмотрении первой карты (см. рис. 3, *a*) уверенно выделяется зональность изучаемой площадки месторождения. Отмечается, что в северо-западной части преобладают относительно высокие значения  $V_p$  в интервале 1,3–2,8 км/с, тогда как в для остальной площади характерны  $V_p = 0,8 \div 1,6$  км/с. Выполняя пространственное сопоставление показателей содержания углерода в ШП, полученных по результатам геохимического анализа [12] со скоростными характеристиками, можно сделать вывод о приуроченности зон понижения  $V_p$  к участкам повышенного содержания углерода. В свою очередь, все ШП, относящиеся к среднеуглеродистому типу, попадают в области относительно высоких скоростей.

Наблюдаемая внутренняя дифференциация скоростей на исследуемой площади, не связанная с содержанием углерода, объясняется при изучении карты, полученной для горизонта +30 м (см. рис. 3, 6). По данным бурения, в интервале глубины 0-15 м в центральной части месторождения встречаются прослои долеритов, а на флангах на глубинах от 10 до 40 м – карбонатных туфов. Скважины, в которых присутствуют такие породы, были вынесены на карту скоростей. В итоге наблюдается хорошая корреляция скоростной аномалии (значения  $V_p = 3,5.4$  км/с), расположенной в южной части исследуемой области с силлом долеритов, тогда как фланговые аномалии на севере и востоке площади интерпретируются как области влияния слоя карбонатных туфов ( $V_n = 3,1.3,7$  км/с).

Дополнительным обоснованием для достигнутых результатов может служить кроссплоты корреляции физических параметров ШП с содержанием углерода, представленные на **рис. 4**. Комплексное сравнение показателей  $V_p$ , полученных на основе скоростных моделей (см. рис. 4, *a*), а также параметров, влияющих



Рис. 4. Корреляция содержания углерода в ШП и скоростей продольной волны, полученных на основе сейсмотомографических моделей (*a*), динамического модуля упругости (*б*) и плотности (*в*)

на скорость распространения упругой волны в массиве, а именно: динамического модуля упругости ШП (см. рис. 4, б) и плотности ШП (см. рис. 4, в), которые приводятся в [9], с С<sub>масс</sub>, показало наличие обратных взаимосвязей. Отмечается, что такие взаимосвязи могут иметь разный характер линии тренда, не обязательно линейный. По мнению авторов [9], это обусловлено не аддитивным характером упругих величин для компонентов ШП, а их зависимостью от композиции и межфазных границ вещества. В качестве аналога полученных корреляций можно рассмотреть исследования углеродсодержащих сланцев [18], где наблюдаются подобные зависимости. Также следует обратить внимание на относительно невысокую достоверность аппроксимации при сопоставлении  $V_{\rho}$  и С<sub>масс</sub>. Вероятнее всего это обусловлено недостаточной плотностью съемки и общими допусками при получении моделей.

#### Заключение

Проведенные исследования убедительно показали эффективность использования малоглубинной сейсморазведки при изучении углеродсодержащих пород. Полученные скоростные модели с достаточной точностью позволили описать геологическую неоднородность Максовского месторождения шунгитов. В пределах его северной части в продуктивной толще локализовано положение интрузивных долеритов, а также включения карбонатных туфов. Кроме того, установлена приуроченность скоростных характеристик шунгитовых пород к их природным типам. Выполненное сопоставление показало, что существует обратная связь между содержанием углерода и скоростью продольных упругих волн. При этом вопрос о характере зависимости остается дискуссионным.

Соответственно существует необходимость продолжения подобных исследований на более детальном уровне с привлечением лабораторных испытаний образцов. Кроме того, повысить информативность сейсморазведочных работ можно путем определения скоростей поперечных волн, а также изучения эффекта анизотропии упругих свойств горного массива. Применение такого комплексного подхода позволит перейти от качественной интерпретации, представленной в данной работе, к количественной, т. е. к определению типа ШП по содержанию углерода в естественном залегании. Дальнейшее развитие данного направления позволит выполнять подобные исследования и на других углеродсодержащих породах.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 213 Института геологии КарНЦ РАН.

#### Библиографический список

- Романов В. В. Инженерная сейсморазведка. М. : European Association of Geoscientists & Engineers, 2015. – 278 с.
- Якобашвили О. П. Сейсмические методы оценки состояния массива горных пород на карьерах. – М.: ИПКОН РАН, 1992. – 260 с.
- Rozhkova N. N., Sheka E. F. Shungite as loosely packed fractal nets of graphene-based quantum dots // International Journal of Smart and Nano Materials. 2014. Vol. 5. No. 1. URL: https://arxiv.org/ttp/arxiv/papers/1308/1308.0794.pdf (дата обращения: 19.09.2018).
- Chou N. H., Pierce N., Lei Y., Perea López N., Fujisawa K. et al. Carbon-rich shungite as a natural resource for efficient Li-ion battery electrodes // Carbon. 2018. Vol. 130. P. 105–111.
- Kovalevsky V., Shchiptsov V., Sadovnichy R. Unique natural carbon deposits of shungite rocks of Zazhogino ore field, Republic of Karelia, Russia // Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. – Albena, 2016. Book 1. Vol. 1. P. 673–679.
- Минерально-сырьевая база Республики Карелия / под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. – Петрозаводск : Карелия, 2006. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. – 356 с.
- Филиппов М. М., Голубев А. И., Медведев П. В. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения). – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 1994. – 208 с.
- Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2002. – 280 с.
- Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. – СПб.: BBM, 2008. – 220 с.
- Садовничий Р. В., Рожкова Н. Н. Минеральные ассоциации высокоуглеродистых шунгитовых пород Максовской залежи (Онежская структура) // Труды Карельского

научного центра Российской академии наук. Сер. Геология докембрия. 2014. № 1. С. 148–157.

- *Ткачук А. К., Степанов Д. В.* Разработка автономного невзрывного сейсмоисточника для проведения подземной сейсморазведки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. З. № 2. С. 198–201.
- Садовничий Р. В. Геолого-минералогические факторы изменчивости химического состава шунгитовых пород Максовского месторождения (Зажогинское рудное поле) // Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья : сб. ст. Х Российского семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2016. С. 113–118.
- 13. Ефимова Е. А. Сейсмическая томография. М. : МГУ, 2005. 129 с.
- Романов В. В. Интерпретация сейсмической томографии на примере изучения геологического строения оползневого склона // Разведка и охрана недр. 2015. № 3. С. 34–37.
- Baumann-Wilke M., Bauer K., Schovsbo N. H., Stiller M. P-wave traveltime tomography for a seismic characterization of black shales at shallow depth on Bornholm, Denmark // Geophysics. 2012. Vol. 77. Iss. 5. P. 53–60.
- Chen T., Wang X., Mukerji T. In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography // International Journal of Coal Geology. 2015. Vol. 149. P. 55–66.
- Сальников А. С., Канарейкин Б. А., Долгова С. В., Дунаева К. А., Сагайдачная О. М., Харламов А. С. Технология и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 74–88.
- Altowairqi Y., Rezaee R., Evans B., Urosevic M. Shale elastic property relationships as a function of total organic carbon content using synthetic samples // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 133. P. 392–400.

#### «GORNYI ZHURNAL», 2019, № 3, pp. 61–65 DOI: 10.17580/gzh.2019.03.12

#### Velocity models of seismic tomography for valuation of high-carbon (schungite) deposits

#### Information about authors

- P. A. Ryazantsev<sup>1</sup>, Senior Researcher, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, chthonian@yandex.ru R. V. Sadovnichii<sup>1</sup>, Researcher, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences
- <sup>1</sup>Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

#### Abstract

The article is focused on application of geophysical methods to studying and valuating deposits of high-carbon (schungite) rocks. The promising technique for the analysis of spatial heterogeneities in tock mass is seismic tomography—the well-reputed method in geological engineering survey. The background for site survey of schungite deposits is the velocity contrast of elastic waves between schungite and enclosing rocks. Moreover, antecedent researchers found the change in the density of schungite depending on carbon content.

The selected object for the study is Maksovo deposit situated in the center of the Republic of Karelia. It is a stratified dome in cross-section, with the maximum thickness in the middle. The basic rocks are predominantly high-carbon schungite varieties. Subsurface geology is complicated by outcrops of a few dolerite sills in the center and in the west of the deposit. Aiming to study the northern area of the deposit, 6 lines of seismic tomography are laid. In each line, the sources and receipts were arranged every 5 m. In each line, a smooth velocity model of P-waves ( $V_p$ ), reflective of spatial heterogeneity of rocks, is obtained. The models distinctly map a sill of dolerite with  $V_p = 36-8.1$  km/s and show velocity variability in schungite rocks with  $V_p$  ranging from 0.8 to 3.0 km/s. For the interpretation purposes, the velocity maps are built for the surface (level +40 m) and depth (level +30 m). These maps are compared with carbon weight content and drilling data. It is finally found that seismic tomography sufficiently accurately images geological variety of the deposit. As a results of the accomplished work, efficiency of the seismic tomography is actually tested in solving problems of geological mapping, as well as the possibility of determining types of schungite rocks based on carbon content using the velocity models is analyzed.

The study was carried out in the framework of R&D project No. 213 of the Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences.

Keywords: schungite rocks, carbon, seismic tomography, velocity models, correlation, P-waves.

#### References

- Romanov V. V. Engineering seismology. Moscow : European Association of Geoscientists & Engineers, 2015. 278 p.
- Yakobashvili O. P. Seismic mwethods of rock mass assessment in open pit mines. Moscow : IPKON RAN, 1992. 260 p.

- Rozhkova N. N., Sheka E. F. Shungite as loosely packed fractal nets of graphene-based quantum dots. International Journal of Smart and Nano Materials. 2014. Vol. 5, No. 1. Available at: https://arxiv. org/ftp/arxiv/papers/1308/1308.0794.pdf (accessed: 19.09.2018).
- Chou N. H., Pierce N., Lei Y., Perea López N., Fujisawa K. et al. Carbon-rich shungite as a natural resource for efficient Li-ion battery electrodes. *Carbon.* 2018. Vol. 130. pp. 105–111.
- Kovalevsky V., Shchiptsov V., Sadovnichy R. Unique natural carbon deposits of shungite rocks of Zazhogino ore field, Republic of Karelia, Russia. *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2016. Book 1, Vol. 1. pp. 673–679.
- Mikhailov V. P., Aminov V. N. (Eds.). Mineral and raw material base of the Republic Karelia. Petrozavodsk : Kareliya, 2006. Book 2: Non-metallic mineral resources. Underground waters and medical muds. 356 p.
- Filippov M. M., Golubev A. I., Medvedev P. V. Organic matter of shungite-bearing rocks of Karelia (genesis, evolution, methods of investigation). Petrozavodsk : KarlvTs RAN, 1994. 208 p.
- 8. Filippov M. M. Schungite-bearing rocks of the Onega structure. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2002. 280 p.
- Kalinin Yu. K., Kalinin A. I., Skorobogatov G. A. Shugites of Karelia for the application of new construction materials, chemical synthesis, gas cleaning, water treatment and medicine. Saint Petersburg: VVM, 2008. 220 p.
- Sadovnichiy R. V., Rozhkova N. N. The minerals associations of carbon-rich shungite rocks of the Maksovo deposit (the Onega structure). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii* nauk. Ser. Geologiya dokembriya. 2014. No. 1. pp. 148–157.
- Tkachuk A. K., Stepanov D. V. Self-contained non-explosive seismic source for underground seismic exploration. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016. Vol. 3, No. 2, pp. 198–201.
- 12. Sadovnichy R. V. Geological and mineralogical factors of variability of a chemical composition of shungit rocks of the Maksovo deposit (Zazhogino ore field). *Role of engineering mineralogy in final* production in mineral processing : Proceedings of X Russian Workship on Engineering Mineralogy. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2016. pp. 113–118.
- 13. Efimova E. A. Seismic tomography. Moscow : MGU, 2005. 129 p.
- Romanov V. V. Interpretation of seismic tomography for example study the geological structure of the landslide slope. *Razvedka i okhrana nedr.* 2015. No. 3, pp. 34–37.
- Baumann-Wilke M., Bauer K., Schovsbo N. H., Stiller M. P-wave traveltime tomography for a seismic characterization of black shales at shallow depth on Bornholm, Denmark. *Geophysics*. 2012. Vol. 77, Iss. 5. pp. 53–60.
- Chen T., Wang X., Mukerji T. In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography. *International Journal of Coal Geology*. 2015. Vol. 149. pp. 55–66.
- Salnikov A. S., Kanareikin B. A., Dolgova S. V., Dunaeva K. A., Sagaidachnaya O. M., Kharlamov A. S. Technology and results of seismic tomography using transmitted waves in coal mines in Kuzbass. *Tekhnologiya seismorazvedki*. 2012. No. 2 pp. 74–88.
- Altowairqi Y., Rezaee R., Evans B., Urosevic M. Shale elastic property relationships as a function of total organic carbon content using synthetic samples. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 133. pp. 392–400.

