

ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ

КУЗНЕЦОВ П. Ю., ГРИБ Н. Н.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с созданием информационной основы для планирования эксплуатации месторождения горным предприятием на основе данных о неоднородности и пространственной изменчивости углеводородных пород, полученных посредством обработки результатов детальной разведки месторождения. На примере Эльгинского каменноугольного месторождения разработан подход к оценке неоднородности и пространственной изменчивости физико-механических свойств углеводородных пород, основанный на расчете величины относительной энтропии. Предложенный способ оценки неоднородности физико-механических свойств позволяет реализовать возможность принятия планового решения о необходимости выделения самостоятельных горнотехнологических комплексов для повышения эффективности ведения эксплуатационных работ на месторождении. Способ оценки пространственной изменчивости позволяет выделить на площади месторождения обособленные объекты, которые стоит характеризовать индивидуальными наборами показателей физико-механических свойств при принятии плановых решений, ориентированных на эффективную эксплуатацию угольного месторождения. Представлены результаты оценки пространственной изменчивости физико-механических свойств углеводородных пород участка первоочередной отработки Эльгинского каменноугольного месторождения в виде построенной комплексной карты величины интенсивности изменчивости.

Ключевые слова: углеводородные породы; физико-механические свойства пород; пространственная изменчивость; неоднородность свойств горных пород; относительная энтропия; интенсивность изменчивости; комплексная карта интенсивности изменчивости.

Инженерно-геологическое изучение угольных месторождений посредством бурения геологоразведочных скважин ориентировано на решение задач, возникающих при составлении проектов разработки угольных месторождений, и актуальных вопросов технического и технологического характера разработки месторождения [1, 2].

В современной практике на территории Российской Федерации вопрос об уровне изученности инженерно-геологических условий угольных месторождений решается в соответствии с требованиями нормативного документа – Методического пособия по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом [1]. Согласно данному нормативному документу, количество инженерно-геологических скважин, необходимых для достаточного изучения инженерно-геологических условий месторождения, зависит от группы и подгруппы сложности геологического строе-

Кузнецов Павел Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры горного дела. 678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: kuznetsov.pavel.yu@gmail.com

Гриб Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, профессор кафедры горного дела. 678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16, Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: grib@nfygu.ru

ния месторождения и пространственного распространения многолетней мерзлоты по его площади. В рассматриваемом нормативном документе [1] указано, что при проведении инженерно-геологических изысканий после завершения детальной разведки количество проектируемых дополнительных инженерно-геологических скважин должно быть сведено к минимуму.

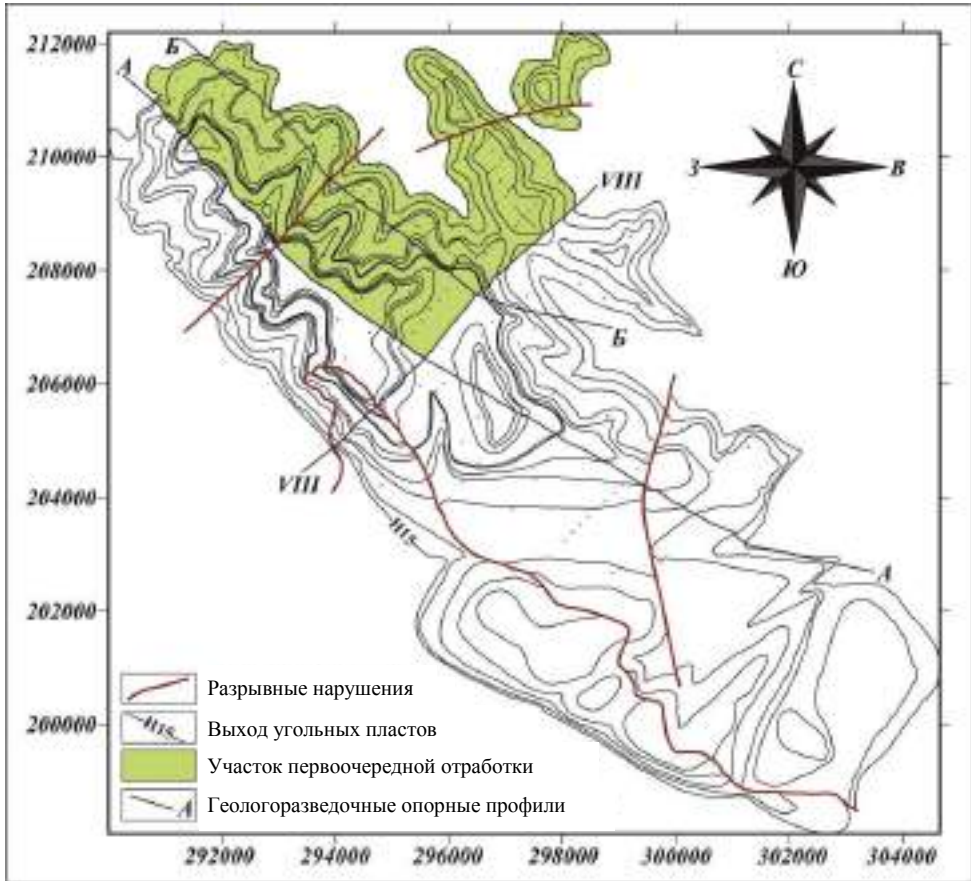


Рис. 1. Участок первоочередной отработки Эльгинского каменноугольного месторождения

Опираясь на изложенные требования, а также современные тенденции развития угольной промышленности, ориентированные на обеспечение повышения эффективности и безопасности эксплуатации угольных месторождений, можно отметить и рост требований к самому процессу планирования эксплуатации месторождения горным предприятием [3].

На основе нормативных документов [1, 2] предлагается при разработке концепции эксплуатации угольных месторождений в качестве основы для планирования горных работ применять результаты оценки неоднородности и пространственной изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород. Данный подход позволит более детально подойти к планированию горных работ и обеспечить оперативность принятия решений технологического характера на стадии эксплуатации угольного месторождения.

Объект исследования и исходные данные. Первично в качестве объекта исследований для оценки неоднородности и пространственной изменчивости физико-механических свойств было рассмотрено Эльгинское каменноугольное место-

рождение Южно-Якутского бассейна. Анализируя с точки зрения изученности физико-механических свойств отчетные материалы о результатах детальной разведки Эльгинского каменноугольного месторождения [4] и результаты прогнозирования физико-механических углевмещающих пород, представленные в работе [5], стоит отметить, что имеющиеся данные о физико-механических свойствах углевмещающих пород в большей части отнесены к участку первоочередной отработки месторождения. Данная асимметрия в расположении геологоразведочных скважин как основного источника данных о физико-механических свойствах углевмещающих пород была предопределена еще на стадии проектирования детальной разведки, что связано с большим сроком эксплуатации Эльгинского каменноугольного месторождения и стремлением обеспечить наиболее полное изучение площади, отведенной для первой очереди ввода в эксплуатацию месторождения [4].

Учитывая это, авторами было принято решение выделить в качестве объекта исследования участок первоочередной отработки (рис. 1). Данный участок стоит рассматривать как опорный, с возможностью его последующего расширения на всю площадь месторождения посредством обработки данных геофизических исследований скважин детальной разведки по методике прогнозирования физико-механических свойств углевмещающих пород, представленной в работе [5].

Участок первоочередной отработки (рис. 1) ограничен в пространстве опорным профилем $A-A$ и профилем $VIII-VIII$ и представляет собой площадь, простирающуюся от точки пересечения профилей в северо-западном направлении. Рассматриваемый участок разведан по неравномерной геологоразведочной сети с размерностью 250×500 м при ее сгущении в северном направлении от профиля $B-B$ до размерности $100-150 \times 250-300$ м (площадь вскрытия месторождения). Период разработки данного участка определяется временным интервалом в 40–50 лет [4].

Исходными данными для реализации оценки пространственной изменчивости и неоднородности рассматриваемого участка послужили результаты прогнозирования физико-механических свойств углевмещающих пород по данным геофизических исследований скважин, расположенных на участке первоочередной отработки [5]. В статье рассмотрены такие показатели физико-механических свойств углевмещающих пород, как предел прочности на одноосное сжатие; предел прочности на одноосное растяжение; истинная плотность.

Оценка неоднородности показателей физико-механических свойств углевмещающих пород. Для оценки неоднородности физико-механических свойств углевмещающих пород в рассматриваемом случае предлагается использовать величину относительной энтропии, эффективность применения которой для оценки неоднородности месторождений в достаточной степени хорошо представлена в работах [6, 7]. Формула для расчета величины относительной энтропии имеет вид:

$$H_{отн}^{area} = \frac{-\sum_{i=1}^{i=n} p_i \cdot \ln(p_i)}{\ln(n)} \cdot 100 \% = \frac{H}{H_{max}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $H_{отн}^{area}$ – относительная энтропия, %; $H_{max} = \ln(n)$ – максимальная энтропия, нит; H – энтропия, нит; n – число анализируемых классов (геологических компонентов, признаков, параметров, показателей), задействованных в исследовании; p_i – доля i -го компонента (значения геологических компонентов, признаков, параметров, показателей) в системе.

Расчет величины относительной энтропии производился по всей площади рассматриваемого участка месторождения, для каждого рассматриваемого физико-механического свойства в отдельности, с учетом выделения классов для расчета по формуле Стерджесса и ограничением шага интервала класса. Ограничение шага интервала класса связано со значимостью изменения физико-механического свойства породы при ведении технологических расчетов при эксплуатации горного предприятия [8, 9]: предел прочности на одноосное сжатие – 10 МПа; предел прочности на одноосное растяжение – 1 МПа; истинная плотность – 0,1 т/м³.

Установление класса неоднородности участка первоочередной отработки по физико-механическим свойствам углевмещающих пород производилось в соответствии с классификацией, представленной в табл. 1 [7].

Таблица 1

Классификация геологических объектов и их свойств по неоднородности

Показатель качества угля (класс)	Значение относительной энтропии, %	
	от	до
Весьма однородный	0	22,0
Однородный	22,1	38,0
Неоднородный	38,1	55,0
Весьма неоднородный	55,1	100

На основании установления класса неоднородности физико-механических свойств углевмещающих пород при детализации планов ведения горных работ и производства технологических расчетов на стадии эксплуатации месторождения можно рекомендовать разделение углевмещающего массива на отдельные горно-технологические комплексы для классов «неоднородный» и «весьма неоднородный». Для классов «весьма однородный» и «однородный» рекомендуется углевмещающий массив рассматривать как единый горнотехнологический комплекс.

Результаты расчета значений величины относительной энтропии как меры неоднородности рассматриваемых физико-механических свойств представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета значений величины относительной энтропии как меры неоднородности по физико-механическим свойствам углевмещающих пород Эльгинского месторождения

Показатель физико-механических свойств углевмещающих пород	Значение относительной энтропии ($H_{от}^{area}$ – общая неоднородность), %	Характеристика физико-механических свойств углевмещающих пород (класс неоднородности)
Предел прочности пород на одноосное сжатие	87,10	Весьма неоднородный
Предел прочности пород на одноосное растяжение	80,89	Весьма неоднородный
Истинная плотность	57,38	Весьма неоднородный

Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что все рассматриваемые в данной статье физико-механические свойства углевмещающих пород относятся к классу весьма неоднородных. При этом наибольшая величина неоднородности присуща прочностным показателям физико-механических свойств углевмещающих пород. Установленное обстоятельство свидетельствует о том, что при плани-

ровании горных и эксплуатационно-разведочных работ на площади Эльгинского каменноугольного месторождения необходимо предусмотреть вариативность принимаемых решений с учетом всего диапазона колебания изменений физико-механических свойств пород и возможность разделения углепородного массива на отдельные горнотехнологические комплексы.

Оценка пространственной изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород. Величина, принимаемая в качестве характеристики пространственной изменчивости физико-механических свойств пород, должна обеспечивать возможность дифференцирования исследуемого месторождения на участки с различной интенсивностью изменения физико-механических свойств. В качестве такой величины предлагается использовать величину интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород, рассчитываемую по формуле:

$$I_{izm} = \frac{H_{om}^{skv}}{H_{om}^{area}},$$

где H_{om}^{skv} – относительная энтропия, определенная для скважины, %; H_{om}^{area} – неоднородность исследуемой площади, определенная по формуле (1), %.

При расчете величины интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород (I_{izm}) необходимо придерживаться следующих принципов расчета:

- расчет неоднородности (H_{om}^{area}) исследуемой площади осуществляется по всей совокупности имеющихся данных о физико-механических свойствах углевмещающих пород по каждому свойству в отдельности;
- расчет величин относительной энтропии (H_{om}^{skv}) ведется в отдельности для каждой скважины в пределах классов, определенных для всей совокупности данных, принятых при расчете неоднородности исследуемой площади (H_{om}^{area});
- расчет величины интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород (I_{izm}) осуществляется для каждой скважины и выражается в относительных единицах.

При оценке пространственной изменчивости исследуемого участка через величину интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород необходимо произвести группировку результатов расчетов исходя из следующих принципов:

1. Величина интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород меньше 1 ($I_{izm} < 1$) – *участок исследуемой площади характеризуется пониженным значением интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород.*

2. Величина интенсивности изменения физико-механических свойств углевмещающих пород больше или равна 1 ($I_{izm} \geq 1$) – *участок исследуемой площади характеризуется повышенным значением интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород.*

Результаты расчета величины интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород удобно интерпретировать на основе графической обработки посредством построения карт интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород по каждому исследуемому свойству в отдельности. При этом для разработки общей концепции планирования эксплуатации месторождения наиболее удобными будут являться комплексные карты интенсивности изменчивости физико-механических свойств по площади исследуемого месторождения. Построение карт данного типа

осуществляется путем наложения (совмещения) карт интенсивности изменчивости, полученных для каждого физико-механического свойства углевмещающих пород в отдельности. На рис. 2 представлена комплексная карта интенсивности изменчивости рассмотренных физико-механических свойств углевмещающих пород участка первоочередной отработки Эльгинского месторождения.

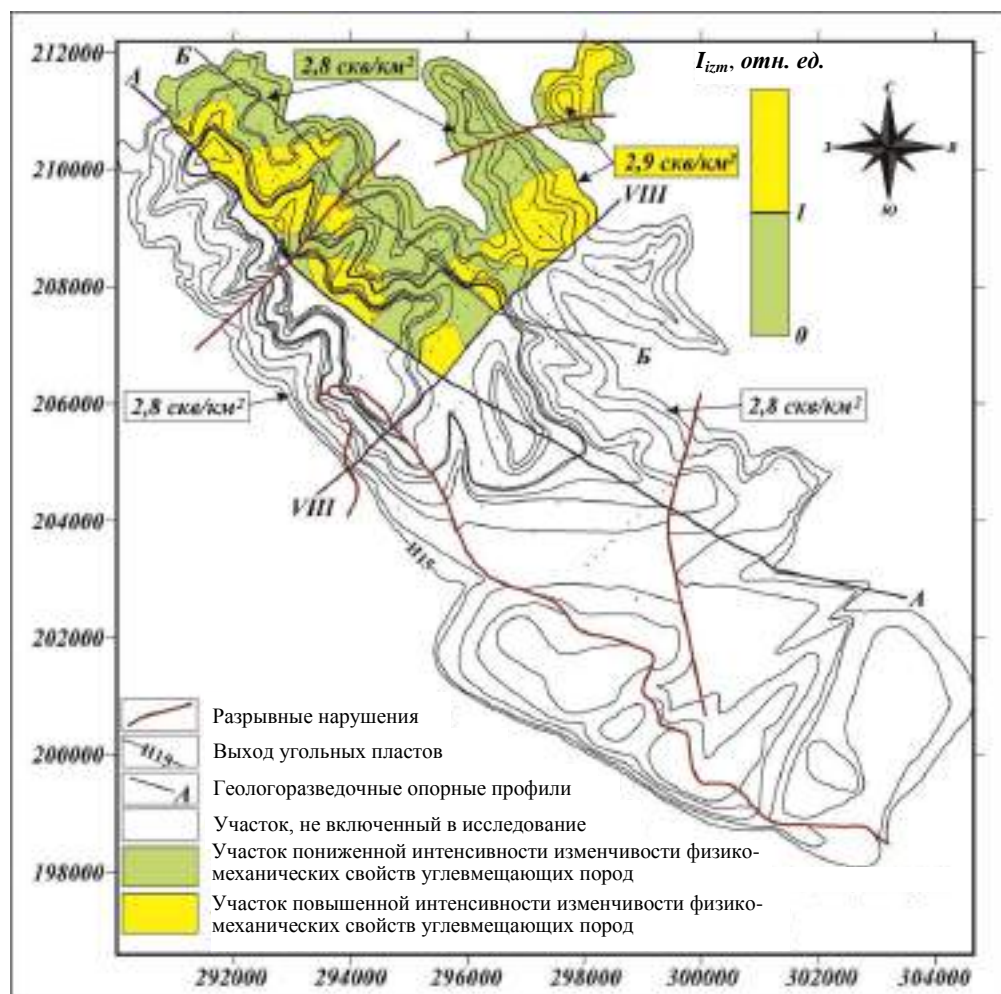


Рис. 2. Комплексная карта интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород участка первоочередной отработки Эльгинского месторождения

Анализируя результаты, представленные на комплексной карте интенсивности изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород участка первоочередной отработки Эльгинского месторождения, можно отметить, что предложенный подход к оценке пространственной изменчивости свойств углевмещающих пород позволяет выделять на площади исследования самостоятельные участки, которые характеризуются повышенной и пониженной интенсивностью изменчивости физико-механических свойств пород.

Выделенные участки с повышенной и пониженной интенсивностью в концепции планирования ведения горных работ и эксплуатационно-разведочных работ должны рассматриваться как самостоятельные объекты с индивидуальными физико-механическими характеристиками в пределах площади исследования.

В качестве ключевых моментов, определяющих важную роль рассмотренного в статье подхода к оценке неоднородности и пространственной изменчивости физико-механических свойств углевмещающих пород при планировании эксплуатации угольного месторождения, стоит выделить следующие:

– предложенный способ оценки неоднородности позволяет подойти к рассмотрению углепородного массива с точки зрения выделения в нем отдельных горно-технологических комплексов, для которых будут приниматься самостоятельные технологические решения;

– предложенный способ оценки пространственной изменчивости позволяет выделить на площади месторождения обособленные объекты, которые стоит характеризовать индивидуальными показателями физико-механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом. Л.: Недра, 1986. 113 с.
2. Инструкция и методические рекомендации по изучению инженерно-геологических свойств боковых пород и прогнозу их устойчивости на угольных месторождениях (по данным разведки) / сост. Г. Г. Скорцов, Л. А. Соколовская, Б. В. Смирнов. М.: ВСЕГИНГЕО, 1980. 94 с.
3. Уголь России. М.: Принтлето, 2017. 264 с.
4. Отчет о результатах детальной разведки Северо-западного участка Эльгинского каменноугольного месторождения в Токинском угленосном районе Южно-Якутского бассейна за 1991–1996 гг.: в 3 т. / исп. Поляков Н. П., Павлик М. И., Гриб Н. Н. [и др.]. Чутьман: Южякутгеология, 1996. Т. 1. 367 с.
5. Гриб Н. Н., Кузнецов П. Ю. Прогнозирование физико-механических свойств углевмещающих пород на основе данных геофизических исследований скважин и математического аппарата Марковской нелинейной статистики // Уголь. 2018. № 1. С. 68–73.
6. Гриб Н. Н., Кузнецов П. Ю. Оценка изученности показателей качества угля Эльгинского месторождения // Уголь. 2016. № 9. С. 72–77.
7. Кузнецов П. Ю., Гриб Н. Н., Скоморошко Ю. Н. Оценка неоднородности и пространственной изменчивости показателей качества углей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 47–54.
8. Открытые горные работы: справочник / К. Н. Трубецкой [и др.]. М.: Горное бюро, 1994. 590 с.
9. Кузнецов П. Ю. Оценка пространственной изменчивости свойств массива горных пород для оптимизации сети инженерно-геологических скважин при разведке угольных месторождений (на примере Эльгинского месторождения): дис. ... канд. геол.-минер. наук. Нерюнгри, 2005. 236 с.

Поступила в редакцию 27 февраля 2018 года

ASSESSMENT OF HETEROGENEITY AND SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF COAL-BEARING STRATA ON THE BASIS OF RELATIVE ENTROPY VALUE

Kuznetsov P. Iu., Grib N. N. – Technical Institute (branch) of Ammosov North-Eastern Federal University, Neryungri, the Russian Federation. E-mail: kuznetsov.pavel.yu@gmail.com

The article considers the problems connected with the creation of informational basis for the planning of field development by a mining enterprise on the basis of the data on the heterogeneity and spatial variability of coal-bearing strata, acquired by means of processing the results of the detailed mineral exploration. By the example of Elginsky coal mine, an approach to the assessment of the heterogeneity and spatial variability of physical-mechanical properties of coal-bearing strata is worked out, based on the calculation of relative entropy value. The suggested method of assessing the heterogeneity of physical-mechanical properties allows realizing the possibility of making systematic solution on the need of distinguishing independent mining-technological complexes to improve the efficiency of actual mining of a field. The method of assessing spatial variability allows singling out separate facilities at the area of a field, which should be characterized by individual sets of indices of physical-mechanical properties when making systematic solutions focused on efficient coal mine development. The results of assessing spatial variability of physical-mechanical properties of coal-bearing strata are introduced at the first-priority section of Elginsky coal mine in the form of the aggregate map of variability intensity value.

Key words: coal-bearing strata; physical-mechanical properties of rock; spatial variability; heterogeneity of rock properties; relative entropy; variability intensity; aggregate map of variability intensity.

REFERENCES

1. *Metodicheskoe posobie po izucheniiu inzhenerno-geologicheskikh uslovii ugo'nykh mestorozhdenii, podlezhashchikh razrabotke otkrytym sposobom* [Guidance manual on the examination of engineering-geological conditions of coal deposits subject to opencast mining]. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 113 p.

2. *Instruktsiia i metodicheskie rekomendatsii po izucheniiu inzhenerno-geologicheskikh svoystv bokovykh porod i prognozu ikh ustoychivosti na ugol'nykh mestorozhdeniiakh (po dannym razvedki) / sost. G. G. Skortsov, L. A. Sokolovskaia, B. V. Smirnov* [Instructions and methodological recommendations on the examination of engineering-geological properties of lateral rock and the forecast of their stability at coal deposits (according to the exploration data). Edited by G. G. Skortsov, L. A. Sokolovskaia, B. V. Smirnov]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1980. 94 p.
 3. *Ugol' Rossii* [Coal of Russia]. Moscow, Printleto Publ., 2017. 264 p.
 4. Poliakov N. P., Pavlik M. I., Grib N. N., and others. *Otchet o rezul'tatakh detal'noi razvedki Severo-zapadnogo uchastka El'ginskogo kamennougol'nogo mestorozhdeniia v Tokinskom ugleosnom raione luzhno-lakutskogo basseina za 1991–1996 gg.: v 3 t.* [Report on the results of the detailed exploration of the northwestern section of Elginsky coal mine in Tokinsky coal district of the South Yakut basin for 1991–1996: in 3 books]. Chulman, Iuzhiakutgeologiya Publ., 1996, vol. 1. 367 p.
 5. Grib N. N., Kuznetsov P. Iu. [Forecasting physical-mechanical properties of coal-bearing strata on the basis of the data from geophysical works of wells and mathematical apparatus of Markov nonlinear statistics]. *Ugol' – Coal*, 2018, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.)
 6. Grib N. N., Kuznetsov P. Iu. [Assessment of the state of knowledge of coal quality indices of Elginsky mine]. *Ugol' – Coal*, 2016, no. 9, pp. 72–77. (In Russ.)
 7. Kuznetsov P. Iu., Grib N. N., Skomoroshko Iu. N. [Assessment of heterogeneity and spatial variability of coal quality indices]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2017, no. 3, pp. 47–54. (In Russ.)
 8. Trubetskoi K. N., and others. *Otkrytye gornye raboty: spravochnik* [Reference book “Opencast Mining”]. Moscow, Gornoe biuro Publ., 1994. 590 p.
 9. Kuznetsov P. Iu. *Otsenka prostranstvennoi izmenchivosti svoystv massiva gornykh porod dlia optimizatsii seti inzhenerno-geologicheskikh skvazhin pri razvedke ugol'nykh mestorozhdenii (na primere El'ginskogo mestorozhdeniia): dis. kand. geol.-miner. nauk* [Assessment of spatial variability of rock massif properties for the optimization of the network of engineering-geological wells when prospecting coal deposits (by the example of Elginsky mine). Cand. geol.-miner. sci. diss.]. Neryungri, 2005. 236 p.
-