ISSN 2712-8008
Том / Volume 22 №3 2022
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2022

Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

О.О. Лебедева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29)

Analysis and preparation of initial data for building a geological and geomechanical model of the area at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit

Olesya O. Lebedeva

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 22.04.2022. Принята / Accepted: 18.11.2022. Опубликована / Published: 22.12.2022

Ключевые слова:
междушахтный целик, геофизические исследование скважин, скорость продольной волны, модуль упругости, предел прочности на сжатие, геолого-геомеханическая модель, водозащитная толща, Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей.

Многолетний опыт разработки калийных месторождений, в частности Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС), показал, что самым неблагоприятным и пагубным последствием является затопление всего шахтного поля или его участка. Как правило, причиной затоплений является формирование и развитие техногенных водопроводящих трещин или развитие существующих трещин в массиве, которые чаще всего приурочены к зонам с ослабленными физико-механическими свойствами. Наиболее подробное распределение свойств можно получить, построив геолого-геомеханическую модель. Для создания такой модели необходимо проанализировать существующие факторы, влияющие на состояние массива горных пород и выработок, а также обозначить и подготовить необходимые исходные данные. К основным влияющим факторам следует отнести геологические особенности строения Соликамской впадины, различные техногенные события, которые проявили себя в связи с отработкой промышленных запасов месторождения, физико-механические свойства вмещающих пород и продуктивных пластов, а также развитие горных работ и их текущее положение. Опыт геомеханического анализа произошедших техногенных аварий на территории ВКМКС показывает, что наиболее сильным влияющим фактором являются физико-механические свойства пород водозащитной толщи. Получить надежное распределение данных параметров в массиве и в продуктивных пластах пытаются, прежде всего, комбинированием геофизических и геомеханических методов. В рамках данной статьи предлагается комплексирование геологических, геофизических и геомеханических подходов при создании геолого-геомеханической модели участка водозащитной толщи. В качестве исходных данных используется геологическое описание колонок скважин, геофизические исследования в скважинах, физико-механические свойства пород. Обработка имеющихся данных по скважинам позволяет создать трехмерную модель распределения скорости продольной волны, в свою очередь, статистические зависимости для двух основных параметров физико-механических свойств (модуль упругости и предел прочности на сжатие) от скорости продольной волны позволяют получить значения данных свойств в любой точке модели, на основе которой в дальнейшем производится моделирование напряженно-деформированного состояния и прогноз состояния массива горных пород и выработок.

Keywords:
inter-shaft pillar, geophysical well survey, longitudinal wave velocity, elasticity modulus, compressive strength, geological and geomechanical model, water-protective strata, Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit.

Many years of experience in the development of potash deposits, in particular the Verkhnekamennoye potassium-magnesium salt deposit, has shown that the most unfavorable and detrimental consequence is the flooding of the entire mine field or its section. As a rule, the cause of flooding is the formation and development of technogenic water-conducting cracks or the development of existing cracks in the massif, which are most often associated with zones with weakened physical and mechanical properties. The most detailed distribution of properties can be obtained by creating a geological and geomechanical model. To create such a model, it is necessary to analyze the existing factors that affect the state of the rock mass and workings, as well as identify and prepare the necessary initial data. The main influencing factors include the geological features of the structure of the Solikamsk depression, various technogenic events that have manifested themselves in connection with the development of the industrial reserves of the deposit, the physical and mechanical properties of host rocks and productive strata, as well as the development of mining operations and their current situation. The experience of geomechanical analysis of man-made accidents that have occurred on the territory of the Verkhnekamennoye potassium-magnesium salt deposit showed that the most powerful influencing factor was the physical and mechanical properties of the rocks of the water-protective strata. To obtain a reliable distribution of these parameters in the massif and in productive layers, usually try, first of all, by combining geophysical and geomechanical methods. Within the framework of this article, it was proposed to integrate geological, geophysical and geomechanical approaches when creating a geological and geomechanical model of a water-protective stratum section. As initial data, the geological description of well cores, geophysical surveys in wells, physical and mechanical properties of rocks were used. The processing of available data on wells allowed creating a three-dimensional model of the distribution of the longitudinal wave velocity, in turn, the statistical dependences for the two main parameters of physical and mechanical properties (modulus of elasticity and compressive strength) on the velocity of the longitudinal wave make it possible to obtain the values of these properties at any point in the model , on the basis of which the simulation of the stress-strain state and the forecast of the state of the rock mass and workings are further carried out.

© **Лебедева Олеся Олеговна** (ID Scopus: 57217631759) – младший научный сотрудник кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 (982) 245 67 86, e-mail: lesli.lebedeva@gmail.com).

© **Olesya O. Lebedeva** (Author ID in Scopus: 57217631759) – Junior Researcher at the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 (982) 245 67 86, e-mail: lesli.lebedeva@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Лебедева О.О. Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей// Недропользование. – 2022. – Т.22, №3. – С.139–143. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5

Please cite this article in English as:
Lebedeva O.O. Analysis and preparation of initial data for building a geological and geomechanical model of the area at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.3, pp.139-143. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5

Введение

Распределение физико-механических свойств пород в водозащитной толще (ВЗТ) на ВКМКС является наиболее неопределенным параметром при решении задач численного моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ при различных параметрах системы разработки. В настоящее время имеются многочисленные попытки получить картину распределения геомеханических характеристик с помощью геофизических методов [1–6]. Однако данные методики не позволяют установить количественную связь между получаемыми геофизическими параметрами и геомеханическими характеристиками массива пород ВЗТ. А прямое использование упруго-прочностных характеристик пород также не позволяет даже приблизительно решить проблему построения распределения данных характеристик в массиве, так как в данном случае исследователь оперирует точечными значениями [7–10].

В рамках данной статьи представлено построение геолого-геомеханической модели участка ВЗТ в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 – СКРУ-3 (рис. 1), основанное на комплексировании геофизических данных, полученных при бурении солеразведочных скважин и геомеханических данных, полученных при испытаниях физико-механических свойств образцов соляных пород.

Исходные данные, необходимые для построения геолого-геомеханической модели

Основная идея построение геолого-геомеханической модели участка какого-либо месторождения, ориентированной на последующее геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния анализируемого участка при отработке его запасов, заключается в получении реального распределения геомеханических характеристик в породах ВЗТ и продуктивных пластах [11–14]. Отметим, что такой подход уже давно используется при разработке месторождений углеводородов и только в последнее время начинает применяться при разработке месторождений твердых полезных ископаемых [15–25]. В связи с этим в качестве исходных данных, необходимых для построения модели, были использованы геологическое описание колонок скважин, геофизические исследования в скважинах (ГИС), в том числе в нефтяных, которые пробурены на территории ВКМКС, и корреляционные зависимости между физико-механическими свойствами пород, слагающих массив, и распределенными геофизическими параметрами, прежде всего скоростью волны.

Геологическое описание колонок скважин. Выборка состоит из 33 скважин. Каждая скважина была проанализирована отдельно. Обработка данных геологического описания показала, что не все скважины пробурены до маркирующей глины, многие вскрывают лишь переходную пачку, в связи с чем не могут быть использованы для построения геолого-геомеханической модели.

Данные ГИС. Наибольший интерес представляет акустический каротаж (АК), гамма-каротаж (ГК), нейтронный гамма-каротаж (НГК). Из рассматриваемых скважин данные ГИС имеются только по 23 скважинам. Преимущественно был проведен ГК, как правило, на всю глубину скважин. Стоит отметить, что только в двух скважинах есть данные АК – № 234с и 1036. На примере скважины № 234с можно увидеть, что исследования были проведены в достаточно ограниченном интервале (в пределах глубины 150–175 м). На рис. 2 представлен пример распределения скорости продольной волны в скважине – V_p, соответствующее распределение прочности в исследованном интервале, полученное на основе зависимости – UCS, а также распределение прочности по стволу скважины, выгруженное из модели, – UCS_3D.

Свойства пород, слагающие массив. Из физико-механических свойств пород, слагающих массив, наиболее распространен такой параметр, как прочность породы, которую определяют по результатам испытания пород на одноосное или трехосное сжатие специалистами ГИ УрО РАН. Как правило, породы испытывают в одноосных условиях. В рамках создания геолого-геомеханической модели были проведены специальные испытания на установке ПИК-УИДК/ПЛ (ФГАОУ ВО ПНИПУ) по определению связи геомеханических характеристик соляных пород с геофизическими характеристиками геологического разреза, в частности со скоростью продольной и поперечной волн. Полученные зависимости, использованные при создании геолого-геомеханической модели [15–33], будут показаны ниже.

Построение геолого-геомеханической модели

Построение геолого-геомеханической модели осуществлялось в программе IRAP RMS. Итоговая геологическая модель содержит 10 млн ячеек, способ разбиения – пропорциональный. Средний размер элемента по вертикали 0,25 м, по горизонтали – 50 м.

С привлечением информации по соляным и нефтяным скважинам появилась возможность построить трехмерную модель распределения основного параметра – скорости пробега продольной волны V_p в районе целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 – СКРУ-3.

Данные АК имелись лишь в ограниченных интервалах, в связи с чем была произведена интерполяция АК на весь куб трехмерной модели. На рис. 3 представлен пример межскважинной корреляции горизонтов в геологической модели.

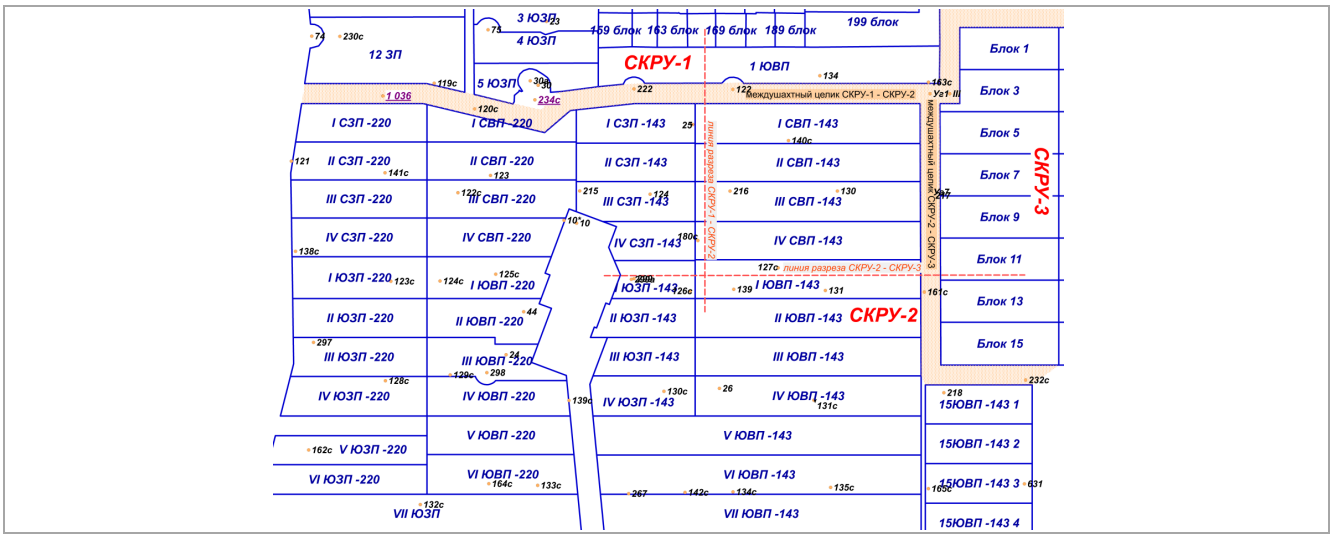

Рис. 1. Расположение шахтных полей

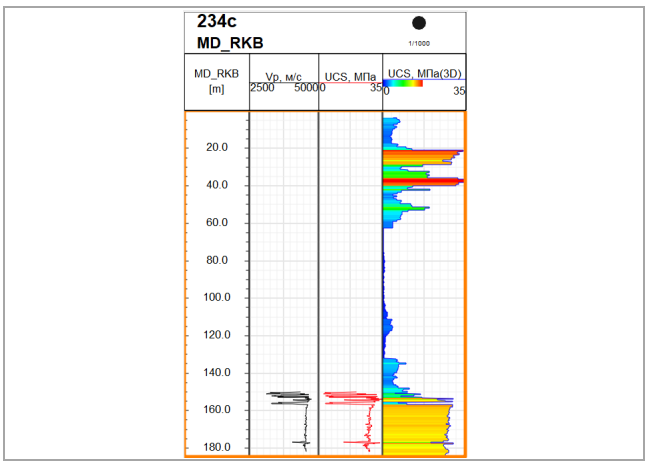

Рис. 2. Пример интерпретации данных акустического каротажа и полученное распределение прочности по стволу скважины

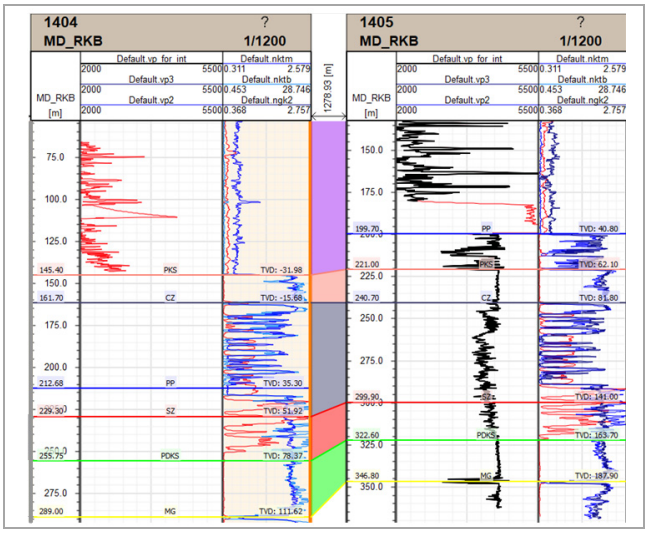

Рис. 3. Пример межскважинной корреляции горизонтов в геологической модели

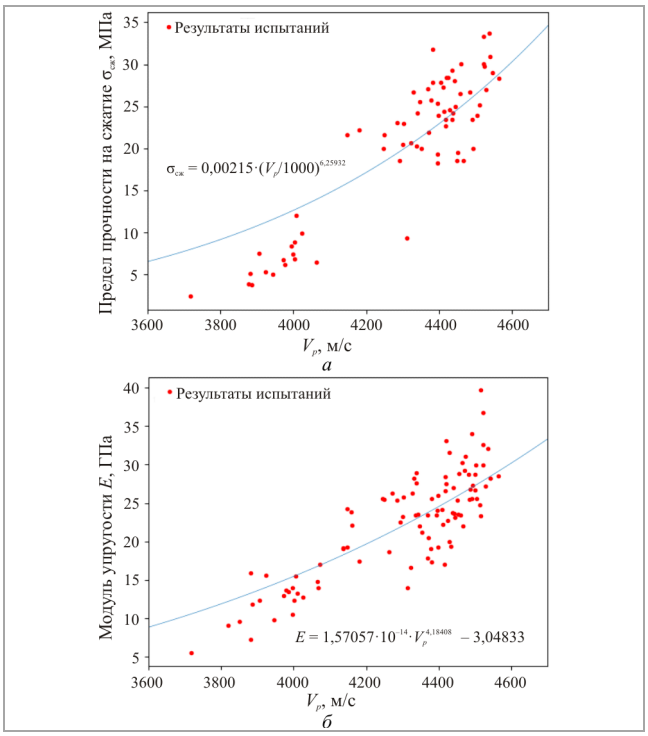

Рис. 4. Результаты испытаний ПНИПУ: *а* – зависимость предела прочности на сжатие от скорости продольной волны по [11–14, 17]; *б* – зависимость модуля упругости от скорости продольной волны

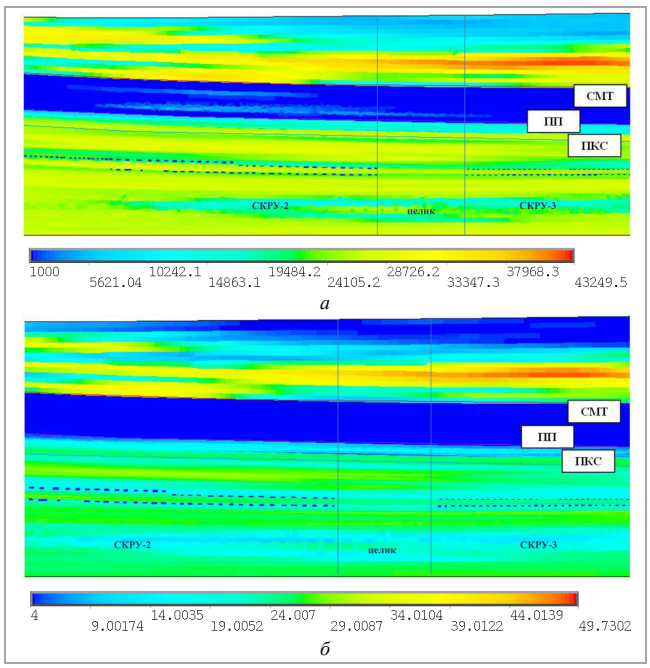

Рис. 5. Район междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3: *а* – распределение модуля упругости вдоль расчетного разреза; *б* – распределение предела прочности на сжатие вдоль расчетного разреза

Распространение параметра производилось методами геостатистики, в частности методом Крайгинга в совокупности с методом условного моделирования для воссоздания естественной изменчивости моделируемого параметра. Подбор параметров осуществлялся на основе вариограмного анализа после нормализации данных.

Созданная модель позволяет получить распределение упругих и прочностных свойств на основе статистических зависимостей между скоростью продольной волны и такими параметрами, как модуль упругости и предел прочности на сжатие (рис. 4).

В результате были построены геомеханические разрезы распределения модуля упругости (рис. 5, *а*) и предела прочности (рис. 5, *б*) вдоль характерных профильных линий в районе междушахтных целиков. В дальнейшем по данным разрезам будет выполнено геомеханическое моделирование НДС массива пород ВЗТ и самих целиков. В качестве примера приведен разрез вдоль целика между шахтными полями СКРУ-2 – СКРУ-3.

Заключение

Анализ и прогноз состояния массива горных пород невозможен без качественной геолого-геомеханической модели. Для построения такой модели требуется предварительный анализ и подготовка исходных данных, поскольку учет факторов влияния и включение в модель нужной информации в дальнейшем определяют результат моделирования в целом и, соответственно, последующего прогноза.

В качестве исходных данных, необходимых для построения модели, было использовано геологическое описание колонок скважин, геофизические исследования в скважинах, физико-механические свойства пород.

На основе исходных данных была построена трехмерная модель распределения скорости пробега продольной волны в районе интересующих целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 – СКРУ-3. На основе статистических зависимостей двух основных показателей физико-механических свойств – модуля упругости и пределах прочности – от скорости продольной волны были получены распределения этих свойств для построенной модели. Были выбраны характерные разрезы, вдоль которых в дальнейшем будет произведено моделирование НДС массива пород ВЗТ и самих целиков.

Библиографический список

1. Сейсморазведочные исследования водозащитной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей / И.А. Санфиров, А.И. Бабкин, Г.Ю. Прийма, А.Г. Ярославцев, А.М. Пригара, К.Б. Фатькин // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 45–48.
2. Малоглубинные геофизические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей / И.А. Санфиров, Ю.И. Степанов, К.Б. Фатькин, И.Ю. Герасимова, А.И. Никифорова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2013. – № 6. – С. 71–77.
3. Sanfirov I.A., Babkin A.I., Baybakova T.V. Seismic CDP profiling in wells // 13TH conference and exhibition on engineering geophysics. Engineering Geophysics. – 2007.
4. Integrated Interpretation of Ground-Based and Mine Seismic Surveys in The Potash Deposit Areas with a Complicated Geological Structure / A.I. Nikiforova, I.A. Sanfirov, V.M. Nezdanov, R.A. Bogdanov // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152109
5. Царев Р.И. Обоснование выбора модели геологической среды при решении прямой задачи сейсморазведки МОВ ОГТ на ВКМС // Геофизика. – 2018. – No. 5. – С. 18–23.
6. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС / А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина // ГИАБ. – 2019. – № 4. – С. 121–13.
7. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей / ГИ УрО РАН. – СПб. – Пермь, 2014. – 130 с.
8. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей» / ГИ УрО РАН. – СПб. – Пермь, 2014. – 66 с.
9. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие для вузов. – Пермь: ПГТУ, 2008. – 199 с.
10. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород. – Свердловск: Изд-во УрО РАН, 1996. – 180 с.
11. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation / Yu. Kashnikov, A. Ermashov, D. Shustov, D. Khvostantcev // EUROCK 2018: Geomechanics And Geodynamics Of Rock Masses. – 2018. – Vol. 2. – P. 1425–1430.
12. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259–267.
13. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей / Ю.А. Кашников, А.О. Ермашов, Д.В. Шустов, О.О. Лебедева // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1 (128). – С. 39–45.
14. Kashnikov Yu.A., Shustov D.V., Ermashov A.O. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies // EUROCK 2021: Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice 20-25 September. – Turin, Italy, 2021.
15. Геолого-геомеханическая модель Астраханского газоконденсатного месторождения / Ю.А. Кашников, С.В. Гладышев [и др.] // Газовая промышленность. – 2012. – № 3. – С. 29–33.
16. 3D geological geomechanical reservoir modeling for the purposes of oil and gas field development optimization / D.V. Shustov, Yu.A. Kashnikov, S.G. Ashikhmin, A.E. Kukhtinskiy // EUROCK 2018: Geomechanics And Geodynamics Of Rock Masses. – 2018. – Vol. 2. – P. 1425–1430.
17. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. – Cambridge. University Press, 2007. – P. 449.
18. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Горная книга, 2019. – 496 с.
19. Various effect of faults on mechanical earth models: A case study of integrated study / S. Khatibi, M. Ostadhassan, A. Aghajanpour, Yu. Kovaleva, R. A. Mohammed // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. – Taylor & Francis Group. – London, 2018. – P. 1395–1399.
20. Plumb R.A. Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks // SPE/ISRM 28022. In: Proc. Eurock '94. Delft, Netherlands, 29–31 August 1994. – 1994. – P. 13–20.
21. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks / C. Chang, M.D. Zoback [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2006. – Vol. 51. – P. 223–237.
22. Sone H. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs: Phd thesis. – 2012.
23. Cuervo S., Adachi J., Lombardo E. Integration of 1D and 3D Mechanical Earth Models in oil shale plays. An example from the Vaca Muerta Formation (Argentina) // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA, 2018.
24. Шустов Д.В., Кашников Ю.А. Разработка геолого-геомеханической модели участка Юрубчено-Тохомского месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 4. – С. 26–31.
25. Геомеханические характеристики терригенных продуктивных объектов нефтяных месторождений Западного Урала / Ю.А. Кашников, Д.В. Шустов, А.Э. Кухтинский, С.А. Кондратьев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 32–35.
26. Чертенков М.В., Рузин Л.М. Предпосылки для комплексного использования стандартного каротажа и акустических исследований с целью прогноза коэффициента Пуассона. // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 16–18.
27. Barree R. A Composite Determination of Mechanical Rock Properties for Stimulation Design (What to do When You Don't Have a Sonic Log) // SPE 108139 presented at the 2007 SPE Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium. – Denver, Colorado, U.S.A. – 2007.
28. Eissa E.A., Kazi A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks // Int. J. Rock Mech. – 1988. – Vol. 25. – P. 479–482.
29. Petroleum Related Rock Mechanics / E. Fiaer, R.M. Holt, P. Horsrud [et al.] – 2 ND Edition. – Elsevier, 2008. – P. 391–434.
30. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 10 с.
31. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 19 с.
32. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 10 с.
33. Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model. – Ernst & Sohn Verlag, 2014. – 876 s.
34. Ermashov A.O., Lebedeva O.O., Rysin A.I. The analysis of interbed stability with mathematical modeling methods // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. – 2020. – Vol. 1. – P. 173–182. DOI: 10.1201/9781003014577-22
35. Барях А.А. Комплексное геофизическое исследование потенциально-опасных участков ВЗТ на подработанных и перспективных площадях. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009.
36. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.
37. Косков В.Н. Интерпретация данных ГИС на базе системно-структурного подхода: учеб. пособие – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2012. – 140 с.
38. Костицын В.И., Хмелевской В.К. Геофизика: учебник / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2018. – 428 с.
39. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – М.: EPSILONPLUS, 2013. – 2-е изд. – 371 с.
40. Кудряшов А.И. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края: Энциклопедия. – М.: Красная площадь, 2006. – 464 с.
41. Малышева М.Г., Вендельштейн Б.Ю., Тузов В.П. Обработка и интерпретация материалов геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1990. – 312 с.
42. Анализ аварийной ситуации на Втором Соликамском руднике / Г.И. Ермаков, В.И. Фоминых, А.Е. Красноштейн [и др.] // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: тез. докл. междунар. симп. – Пермь: УрО РАН, 1995. – С. 47–48.
43. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. д.г.-м.н. Н.М. Джиноридзе. – Соликамск: ОГУП Соликамск, типография, 2000. – 400 с.
44. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / А.И. Кудряшов, В.Е. Васюков, Г.С. Фон-дер-лаасс [и др.]; под науч. ред. А.И. Кудряшова. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. – 194 с.
45. Сашурин А.Д. Геомеханика в горном деле: фундаментальные и прикладные исследования // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 29–32.

References

1. Sanfirov I.A., Babkin A.I., Priima G.Iu., Iaroslavtsev A.G., Prigara A.M., Fat'kin K.B. Seismorazvedochnye issledovaniia vodozashchitnoi tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Seismic exploration of the water-protective strata of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2008, no. 10, pp. 45p48.
2. Sanfirov I.A., Stepanov Iu.I., Fat'kin K.B., Gerasimova I.Iu., Nikiforova A.I. Maloglubinnye geofizicheskie issledovaniia na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliinykh solei [Shallow geophysical surveys at the Verkhnekamskoye potash deposit]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2013, no. 6, pp. 71-77.
3. Sanfirov I.A., Babkin A.I., Baybakova T.V. Seismic CDP profiling in wells. *13TH conference and exhibition on engineering geophysics. Engineering Geophysics*, 2017. Volume 2017, pp.1-10. DOI: 10.3997/2214-4609.201700420
4. Nikiforova A.I., Sanfirov I.A., Nezdanov V.M., Bogdanov R.A. Integrated Interpretation of Ground-Based and Mine Seismic Surveys in the Potash Deposit Areas with a Complicated Geological Structure. *Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021*, 2021, vol. 2021, pp. 1-7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152109
5. Tsarev R.I. Obosnovanie vybora modeli geologicheskoi sredy pri reshenii priamoi zadachi seismorazvedki MOV OGT na VKMS [The rationale for selecting the geological environment model in the seismic CDP survey forward solution on the Verkhnekamskoye salt deposit]. *Geofizika*, 2018, no. 5, pp. 18-23.
6. Zhukov A.A., Prigara A.M., Tsarev R.I., Shustkina I.Iu. Sposob shakhtnoi seismorazvedki dlia izucheniia osobennostei geologicheskogo stroeniia VKMS [Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit]. *GIAB*, 2019, no. 4, pp. 121-136. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136
7. Ukazaniia po zashchite rudnikov ot zatopleniia i okhrane podrabatyvaemykh ob"ektov na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliino-magnievykh solei [Guidelines for the protection of mines from flooding and the protection of undermined facilities at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit]. Saint Petersburg, Perm': GI UrO RAN, 2014, 130 p.
8. Metodicheskie rekomendatsii k "Ukazaniiam po zashchite rudnikov ot zatopleniia i okhrane podrabatyvaemykh ob"ektov na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliino-magnievykh solei" [Guidelines for the "Guidelines for the protection of mines from flooding and the protection of undermined facilities at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit"]. Saint Petersburg, Perm': GI UrO RAN, 2014, 66 p.
9. Bariakh A.A., Asanov V.A., Pan'kov I.L. Fiziko-mekhanicheskie svoistva solianykh porod Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Physical and mechanical properties of salt rocks of the Verkhnekamskoye potassium deposit]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 199 p.
10. Bariakh A.A., Konstantinova S.A., Asanov V.A. Deformirovanie solianykh porod [Deformation of salt rocks]. Sverdlovsk: UrO RAN, 1996,180 p.
11. Kashnikov Yu., Ermashov A., Shustov D., Khvostantcev D. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation. *EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*, 2018, vol. 2, pp. 1425-1430.
12. Kashnikov Iu.A., Ermashov A.O., Efimov A.A. Geologo-geomekhanicheskaia model' uchastka Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Geological and Geomechanical Model of the Verkhnekamsk Potash Deposit Site]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2019, vol. 237, pp. 259-267. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.259
13. Kashnikov Iu.A., Ermashov A.O., Shustov D.V., Lebedeva O.O. Sozdanie geologo-geomekhanicheskoi modeli Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [The creation of a geological and geomechanical model of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Marksheiderskii vestnik*, 2019, no. 1 (128), pp. 39-45.
14. Kashnikov Yu.A., Shustov D.V., Ermashov A.O. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies. *EUROCK 2021: Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice 20-25 September*. Turin, Italy, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/833/1/012084

15. Kashnikov Iu.A., Gladyshev S.V. et al. Geologo-geomekhanicheskaia model' Astrakhanskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniia [Geological and geomechanical model of the Astrakhan gas condensate field]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2012, no. 3, pp. 29-33.
16. Shustov D.V., Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Kukhtinskiy A.E. 3D geological geomechanical reservoir modeling for the purposes of oil and gas field development optimization. *EUROCK 2018: Geomechanics And Geodynamics Of Rock Masses*, 2018, vol. 2, pp. 1425-1430.
17. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge. University Press, 2007, 449 p.
18. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G. Mekhanika gornykh porod pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ia [Rock mechanics in the development of hydrocarbon deposits]. Moscow: Gornaia kniga, 2019, 496 p.
19. Khatibi S., Ostadhassan M., Aghajanpour A., Kovaleva Yu., Mohammed R.A. Various effect of faults on mechanical earth models: A case study of integrated study. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. Taylor & Francis Group. London, 2018, pp. 1395-1399.
20. Plumb R.A. Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks. *SPE/ISRM 28022. In: Proc. Eurock '94. Delft, Netherlands, 29-31 August 1994*, 1994, pp. 13-20. DOI: 10.2118/28022-MS
21. Chang C., Zoback M.D. et al. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, vol. 51, pp. 223-237. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.01.003
22. Sone H. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs: Ph D. thesis, 2012.
23. Cuervo S., Adachi J., Lombardo E. Integration of 1D and 3D Mechanical Earth Models in oil shale plays. An example from the Vaca Muerta Formation (Argentina). *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA*, 2018.
24. Shustov D.V., Kashnikov Iu.A. Razrabotka geologo-geomekhanicheskoi modeli uchastka Iurubcheno-Tokhomskogo mestorozhdeniia [Development of geological-geomechanical model of some part of Urubcheno-Tokhomskoe oil field]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2015, no. 4, pp. 26-31.
25. Kashnikov Iu.A., Shustov D.V., Kukhtinskii A.E., Kondrat'ev S.A. Geomekhanicheskie kharakteristiki terrigennykh produktivnykh ob"ektov neftianykh mestorozhdenii Zapadnogo Urala [Geomechanical properties of the terrigenous reservoirs in the oil fields of Western Ural]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2017, no. 4, pp. 32-35. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-4-32-35
26. Chertenkov M.V., Ruzin L.M. Predposylki dlia kompleksnogo ispol'zovaniia standartnogo karotazha i akusticheskikh issledovanii s tsel'iu prognoza koeffitsienta Puassona [Prerequisites to complex use of standard and acoustic logging for the forecast of a Poisson's ratio]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2017, no. 1, pp. 16-18.
27. Barree R. A Composite Determination of Mechanical Rock Properties for Stimulation Design (What to do When You Don't Have a Sonic Log). SPE *108139 presented at the 2007 SPE Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium*. Denver, Colorado, U.S.A, 2007. DOI: 10.2118/108139-MS
28. Eissa E.A., Kazi A. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *Int. J. Rock Mech.*, 1988, vol. 25, pp. 479-482. DOI: 10.1016/0148-9062(88)90987-4
29. Fiaer E., Holt R.M., Horsrud P. et al. Petroleum Related Rock Mechanics. 2 ND Edition. Elsevier, 2008, pp. 391-434.
30. GOST 21153.2-84. Porody gornye. Metody opredeleniia predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [GOST 21153.2-84. Rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 10 p.
31. GOST 28985-91. Porody gornye. Metody opredeleniia deformatsionnykh kharakteristik pri odnoosnom szhatii [GOST 28985-91. Rocks. Methods for determining deformation characteristics under uniaxial compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1991, 19 p.
32. GOST 21153.8-88. Porody gornye. Metody opredeleniia predela prochnosti pri ob"emnom szhatii [GOST 21153.8-88. Rocks. Methods for determining the compressive strength limit]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1988, 10 p.
33. Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model. Ernst & Sohn Verlag, 2014, 876 p.
34. Ermashov A.O., Lebedeva O.O., Rysin A.I. The analysis of interbed stability with mathematical modeling methods. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*, 2020, vol. 1, pp. 173-182. DOI: 10.1201/9781003014577-22
35. Bariakh A.A. Kompleksnoe geofizicheskoe issledovanie potentsial'no-opasnykh uchastkov VZT na podrabotannykh i perspektivnykh ploshchadiakh [Comprehensive geophysical study of potentially hazardous areas of the waterproof layer in undermined and promising areas]. Perm': GI UrO RAN, 2009.
36. Koskov V.N., Koskov B.V. Geofizicheskie issledovaniia skvazhin i interpretatsiia dannykh GIS [Well logging and well logging data interpretation]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 317 p.
37. Koskov V.N. Interpretatsiia dannykh GIS na baze sistemno-strukturnogo podkhoda [Interpretation of well logging data based on a system-structural approach]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, 140 p.
38. Kostitsyn V.I., Khmelevskoi V.K. Geofizika [Geophysics]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, 428 p.
39. Kudriashov A.I. Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei [Verkhnekamskoe salt deposit]. Moscow: EPSILONPLUS, 2013, 2nd ed, 371 p.
40. Kudriashov A.I. Mineral'no-syr'evye resursy Permskogo kraia: Entsiklopediia [Mineral resources of the Perm region: Encyclopedia]. Moscow: Krasnaia ploshchad', 2006, 464 p.
41. Malysheva M.G., Vendel'shtein B.Iu., Tuzov V.P. Obrabotka i interpretatsiia materialov geofizicheskikh issledovanii skvazhin [Processing and interpretation of well logging data]. Moscow: Nedra, 1990, 312 p.
42. Ermakov G.I., Fominykh V.I., Krasnoshtein A.E. et al. Analiz avariinoi situatsii na Vtorom Solikamskom rudnike [Analysis of the emergency situation at the Second Solikamsk mine]. *Problemy bezopasnosti pri ekspluatatsii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh v zonakh gradopromyshlennykh aglomeratsii. Tezisy dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma*. Perm': UrO RAN, 1995, pp. 47-48.
43. Petrotektonicheskie osnovy bezopasnoi ekspluatatsii Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievykh solei [Petrotectonic foundations for the safe exploitation of the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit]. Ed. doktor geologo-mineralogicheskikh nauk N.M. Dzhinoridze. Solikamsk: OGUP Solikamsk, tipografiia, 2000, 400 p.
44. Kudriashov A.I., Vasiukov V.E., Fon-der-laass G.S. et al. Razryvnaia tektonika Verkhnekamskogo mestorozhdeniia solei [Fracture tectonics of the Verkhnekamsk salt deposit]. Ed. A.I. Kudriashov. Perm': GI UrO RAN, 2004, 194 p.
45. Sashurin A.D. Geomekhanika v gornom dele: fundamental'nye i prikladnye issledovaniia [Geomechanics in Mining: Fundamental and Applied Research]. *Gornyi zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 29-32.

Финансирование. Работа осуществлена в рамках выполнения договора по гранту, направленного на реализацию научного проекта № 20-35-90031\20.
Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Вклад автора 100 %.