О сейсмичности Верхнекамского месторождения калийных солей

Филатов В. В.¹, Болотнова Л. А.^{2*}

¹ Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: l.bolotnova@yandex.ru

Реферат

Введение. Освоение земных недр в промышленных масштабах приводит к нарушению равновесного состояния геологической среды и, как следствие, к проявлению в ней различных динамических событий: провалов дневной поверхности, горных ударов, техногенных землетрясений различной интенсивности и др. Поэтому актуальной становится задача прогнозирования таких событий или явлений. В результате решения этой задачи для территории Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) было выявлено около двух десятков факторов, которыми определяется состояние геологической среды и ее динамический режим: структурные, тектонические, геоморфологические, гидрогеологические, гидрохимические, геофизические и другие. Опираясь на эти факторы-признаки, было выполнено районирование территории ВКМКС и установлены районы, наиболее вероятные для проявления динамических событий. Среди факторов-признаков особое место занимают собственно динамические события, прямо указывающие на места нарушения равновесного состояния геологической среды. К этим признакам отнесены: их количество и вид, положение эпицентров, их связь со структурно-тектоническими элементами строения геологической среды и, в первую очередь, с активными разломами. Целью настоящей работы является сопоставление характеристик динамического события, произошедшего в районе СКРУ-2 в 1995 г., с геологическим строением этого района.

Методика исследований. Проведено обобщение результатов геолого-геофизических исследований на территории СКРУ-2, выполнен анализ характеристик горно-тектонического удара и осуществлено сопоставление структурно-тектонических и сейсмических данных.

Результаты исследований. Построена структурно-тектоническая схема территории СКРУ-2 и оценена связь динамического события с особенностями строения территории СКРУ-2.

Выводы. Из сопоставления характеристики горно-тектонического удара и структурно-тектонической позиции территории СКРУ-2 следует, что район рудника представляет собой узловую структуру, образованную активными разломами и осложненную трещинными зонами. Поэтому вероятность образования очага динамического события в таких условиях очень высока.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение калийных солей; СКРУ-2; горно-тектонический удар; критерии прогнозирования динамических событий.

Предмет и цель работы. Актуальнейшей теоретической и практической задачей при эксплуатации Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) является прогнозирование в его пределах участков возможного нарушения равновесного состояния геологической среды, проявляющегося в различных динамических событиях – от горных ударов до техногенных землетрясений, поскольку уровень техногенной нагрузки здесь достиг критического уровня. Основой для решения этой задачи служит структурно-тектоническая модель месторождения, построенная на базе принципов подобия и иерархичности путем обобщения разнообразных эмпирических данных: геологических, структурно-тектонических, геоморфологических, петрофизических, геофизических (данные детальной высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1: 25 000, гравиметрической съемки масштаба 1:100 000, высокоточной детальной аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000) и других [1–3]. С помощью этой модели были установлены кри-

терии или признаки для районирования территории ВКМКС по характеру динамической активности, установлены структурно-тектонические элементы геологической среды, к которым с наибольшей вероятностью приурочены очаги динамических событий. Такими элементами являются трещинные зоны, активные разломы различных рангов и, особенно, узловые структуры [4–6].

Рис. 1. Сейсмограмма Соликамского землетрясения, зарегистрированного на сеймостанции «Арти» 5 января 1995 г. [5–8]

Fig. 1. Seismogram of the Solikamsk earthquake registered at the “Arti” seismic station on January 5, 1995 [5–8]

Методика исследований. Среди признаков (критериев) фигурируют и собственно динамические, прямо указывающие на места нарушения равновесного состояния геологической среды. Изучение пространственного расположения и структурно-тектонического положения эпицентров динамических событий свидетельствует, что их эпицентры находятся или в пределах разломных зон, или в узлах пересечения нескольких разломных зон, в основном в западной части ВКМКС. Последнее обстоятельство обусловлено тремя причинами: влиянием Верхнекамского водохранилища, активностью Красноуфимского глубинного разлома и большими скоростями современных движений дневной поверхности, достигающими 6 мм в год [6], т. е. в целом большой мобильностью всей западной части ВКМКС. Вывод о приуроченности очагов динамических событий к разломным зонам является тривиальным.

Вывод о том, что очаги землетрясений порождаются разломами, стал общепризнанным в сейсмологии [7].

Из почти трех десятков различных динамических событий, произошедших в районе ВКМКС, наибольший интерес представляет горно-тектонический удар или техногенное землетрясение 1995 г. Его эпицентр находится на территории Соликамского рудника СКРУ-2. Динамическое явление было зарегистрировано 5 января на уральских сейсмических станциях «Свердловск», «Арти» и более 80 других сейсмических станциях мира [8–11] (рис. 1).

Рис. 2. Структурно-тектоническая схема района СКРУ-2:

1 – зоны разломов, установленные по геофизическим данным (под номером 1 – Тимано-Кокчетавский разлом); 2 – изоаномалы поля силы тяжести; 3 – локальные отрицательные аномалии в поле силы тяжести; 4 – положение эпицентра землетрясения – *a* и других динамических событий – *b*; 5 – положение скважин и их номера

Fig. 2. Structural-tectonic scheme of SM-2:

1 – fault zones, detected according to geophysical data (under number 1 – Timano-Kokchetavsky fault); 2 – gravity field isonormals; 3 – local negative anomalies in the gravity field; 4 – location of the earthquake epicenter – *a* and others dynamic events – *b*; 5 – location of wells and their numbers

Ценность этого явления заключается в первую очередь в том, что его очаг находился на хорошо изученной в структурно-тектоническом отношении территории. Это позволило выполнить сопоставление характеристик динамического явления со строением территории, где оно произошло. Авторы [8–11] такой анализ

не провели, ограничившись только количественным описанием параметров сейсмического события.

Результаты исследований. Территория СКРУ-2 в структурно-тектоническом отношении представляет собой узел [6, 12] (рис. 2), т. е. объект, оказывающий наибольшее влияние на формирование естественного и техногенного полей напряжений, и потому является потенциально наиболее перспективной на проявление динамических событий из всех выявленных. Узловая структура образована тремя разломами: древним глубинным Тимано-Кокчетавским разломом, имеющим северо-западное простирание, субмеридиональным разломом палеозойского возраста и широтным разломом, возраст которого оценен как послепалеозойский.

Геологическое строение узла сложное по всем горизонтам: в надсолевом горизонте установлены дизъюнктивные и трещинные нарушения; в солевых отложениях отмечены зоны галитизации сильвинита; в подсолевом комплексе пород закартированы тектонические нарушения и Пашковское рифогенное поднятие. Таким образом, геологическая среда является гетерогенной, состоящей из фрагментов с различными физико-механическими и физико-химическими свойствами.

В поле силы тяжести структура картируется изометричной в плане отрицательной аномалией. Результаты ее интерпретации свидетельствуют, что источником служит разуплотненный фрагмент геологической среды и что процессом разуплотнения охвачены как надсолевые, так и продуктивные и подсолевые отложения, разуплотнение имеет не литологический, а тектонический характер, т. е. причиной разуплотнения является нарушение сплошности среды путем развития в ней трещиноватости на всю толщину месторождения. Сейсмические исследования подтверждают результаты интерпретации гравитационной аномалии, указывая на повышенную раздробленность пород и на наличие тектонических нарушений разного ранга и кинематики, которые пронизывают подсолевою и надсолевою толщи.

Соликамское динамическое событие было обследовано на горизонте 143 м группой экспертов разных специальностей сразу же, как только оно произошло. По результатам изучения макросведений было установлено, что предположительно эпицентр события находился в пределах поля рудника СКРУ-2, максимальная интенсивность в эпицентре не превышала 5 баллов по шкале МСК-64. Динамическое событие привело к обрушению кровли продуктивной толщи на площади почти в 30 тыс. м², оседанию дневной поверхности на площади более 55 га (~740 × 740 м) с величиной в мульде около 5 м. По совокупности горно-геолого-геофизических факторов событие было классифицировано как горно-тектонический удар (ГТУ) [8–11].

Одной из важнейших характеристик любого динамического события является положение его эпицентра. Эпицентр Соликамского ГТУ был определен по кинематическим данным различных сейсмостанций, т. е. по инструментальным и макросейсмическим данным или по результатам опросов населения в различных пунктах (140 опросов в 29 пунктах). Сопоставление инструментальных и макросейсмических данных показало их несовпадение. Отклонение положения макросейсмического эпицентра от инструментальных составляет для различных сейсмостанций от 10 до 30 км: все инструментально определенные эпицентры находятся западнее р. Камы.

Изосейсты Соликамского ГТУ были построены только по макросейсмическим данным (рис. 3). Изосейста 3 (балла) имеет форму эллипса с размерами 40 × 25 км, вытянутого в меридиональном направлении; она оконтуривает северную и центральную части месторождения.

Рис. 3. Карта изосейст Соликамского землетрясения 5 января 1995 г. [5–8]:
 1 – пункты определения интенсивности сотрясений в баллах по шкале МСК-64 и количество наблюдений в них; 2 – положение макросейсмического эпицентра землетрясения; 3 – изосейсты, проведенные уверенно – а и неуверенно – б

Fig. 3. Map of Solikamsk earthquake's isoseists on January 5, 1995 [5–8]:
 1 – points measuring the intensity of concussions on the MSC-64 scale and number of observations in them; 2 – location of earthquake's macroseismic epicenter; 3 – isoseists drawn confidently – а and uncertainly – б

Изосейста 4 (балла) почти изометричная, имеет размеры 14 × 11,2 км. Макросейсмический эпицентр находится в центре контура, охваченного изосейстой 5 (баллов). Радиус контура составляет около 1,5 км.

Анализ и обсуждение результатов. Обобщение и анализ результатов, полученных при структурно-тектоническом изучении территории СКРУ-2, и сейсмических характеристик Соликамского ГТУ 1995 г. свидетельствуют:

– узловая структура СКРУ-2, являясь аномальной по геолого-структурному строению, благодаря развитию в ее пределах трещиноватости и других видов нарушения сплошности и однородности оказала существенное влияние на напряженно-деформированное состояние геологической среды, что проявилось в формировании в ее пределах очага динамического события;

– даже при небольшой интенсивности динамического события, каким явилось Соликамское ГТУ, масштабы его негативного воздействия захватили значительный по территории и объему фрагмент геологической среды по причине ее существенной тектонической нарушенности; в связи с этим геологическая среда обладает малой прочностью и жесткостью от воздействия на нее различных естественных и техногенных силовых факторов;

– из-за того что Соликамское ГТУ представляет собой сложное естественно-техногенное событие, результаты инструментального метода оценки положения его эпицентра по кинематическим данным оказались неудовлетворительными по сравнению с макросейсмическим;

– узловая структура СКРУ-2 почти целиком оказалась внутри контура, ограниченного изосейстой 5 (баллов).

Выводы и область применения. Картирование узловых структур и детальное изучение их строения комплексом геолого-геофизических методов является важнейшим моментом методики прогнозирования динамических событий в пределах урбанизированных территорий, какой является территория ВКМКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N. and Gulyev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model // *Journal of Mining Science*. 2001. Vol. 37. No. 5. P. 447–454.
2. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit // *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49. No. 6. P. 902–907.
3. Shulakov D. Y., Buturin P. G., Verkholtantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: Objectives problem solutions // *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 6. P. 25–29.
4. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Прогнозирование геодинамических явлений на территории Верхнекамского месторождения калийных солей по геолого-геофизическим данным // *Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях: труды III Междунар. науч.-практ. конф.* Екатеринбург: УГГУ. С. 24–29.
5. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Прогноз динамических явлений по данным гравиразведки на Верхнекамском месторождении калийных солей // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. научн. трудов. Вып. 1(46).* Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ, 2019. С. 352–356.
6. Филатов В. В., Болотнова Л. А. Обобщение опыта прогнозирования динамических явлений на Верхнекамском месторождении калийных солей по геолого-геофизическим данным // *Известия вузов. Горный журнал*. 2019. № 4. С. 61–70.
7. Касахара К. *Механика землетрясений*. М.: Мир, 1985. 264 с.
8. Маловичко А. А., Блинова Т. С., Лебедев А. Ю., Некрасова Л. В. Соликамское землетрясение 5 мая 1995 г. // *Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций*. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. С. 307–315.
9. Маловичко А. А. Анализ сейсмограмм Соликамского землетрясения 5 января 1995 г. // *Геология Западного Урала на пороге XXI века*. Пермь: Пермск. ун-т, 1999. С. 267–269.
10. Маловичко А. А., Маловичко Д. А., Кустов А. К. Соликамское землетрясение 5 января 1995 года ($M_s = 4,2$) // *Землетрясения Северной Евразии в 1995 году*. М.: ГС РАН, 2001. С. 163–169.
11. Годзиковская А. А. *Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. (Сопутствующие материалы)*. М.: ИФЗ РАН, 2016. 258 с.

12. Кассин Г. Г., Филатов В. В. К проблеме прогнозирования геодинамических явлений на территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия вузов. Горный журнал. 2002. № 3. С. 153–164.

Поступила в редакцию 25 октября 2019 года

Сведения об авторах:

Филатов Владимир Викторович – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры автомобильных дорог Владимирского государственного университета. E-mail: filatov47@bk.ru
Болотнова Любовь Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-60-67

On the seismic activity of the Upper Kama potassium salt deposit

Vladimir V. Filatov¹, Liubov A. Bolotnova²

¹ Vladimir State University, Vladimir, Russia.

² Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The exploitation of the earth's subsoil on an industrial scale leads to a disturbance of equilibrium state of the geological environment and, as a consequence, to the manifestation of various dynamic events in it: sinkholes, rockbursts, induced earthquakes of various magnitudes, etc.

Therefore, the problem of predicting such events or phenomena becomes urgent. About two dozen factors determining the state of geological environment and its dynamic regime have been identified in the course of solving this problem for the territory of Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium salt deposit (VKMKS): structural, tectonic, geomorphological, hydrogeological, hydrochemical, geophysical and others. Based on these factors-features, the zoning of the VKMKS territory was performed and the areas most likely for dynamic events manifestation were established. Among the factors-features stand out the dynamic events, which directly indicate the disturbance places of the geological environment's equilibrium state. Among the features are the following: number and type of events, epicenters position, their relationship with the structural-tectonic elements of the geological environment's structure and, first of all, with active faults. The purpose of this work is to compare the characteristics of a dynamic event that occurred in the area of SKRU-2 (Solikamsk mine-2) in 1995, with the geological structure of this area.

Research methodology. The results of geological and geophysical studies carried out on the territory SKRU-2 are summarized, the characteristics of tectonic rockbursts are analyzed and the structural-tectonic and seismic data were compared.

Research results. The structural-tectonic diagram of SKRU-2 territory was constructed and the relationship between the dynamic event and the structural features of the SKRU-2 territory was evaluated.

Summary. The comparison of tectonic rockbursts characteristic and the structural-tectonic location of SKRU-2 territory has shown that the mine area is a nodal structure formed by active faults and complicated by fracture zones. Therefore, the probability of dynamic event focus development in such conditions is very high.

Key words: Upper Kama (Verkhnekamskoe) potassium salt deposit (VKMKS); SKRU-2; tectonic rockburst; dynamic events prediction criteria.

REFERENCES

1. Konstantinova S. A., Chernopazov N. N. and Gulyev A. A. Estimate of initial stresses in rock mass of the Upper Kama region based on block hierarchical model. *Journal of Mining Science*. 2001; 37 (5): 447–454.
2. Sanfirov I. A., Stepanov Y. I., Gerasimova I. Y., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*. 2013; 49 (6): 902–907.
3. Shulakov D. Y., Buturin P. G., Verkholtantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: Objectives problem solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018; 6: 25–29.
4. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Forecasting geodynamic events at the territory of Upper Kama potassium salt deposit according to geological-geophysical data. In: *Population and territory protection in case of emergency: proceedings of the 3rd International Research-to-Pract. Conf.* Ekaterinburg: UrSMU Publishing: 24–29. (In Russ.)
5. Filatov V. V., Bolotnova L. A. The forecast of dynamic events according to the data of gravitational prospecting at Upper Kama potassium salt deposit. In: *The theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic, and electric fields: proceedings*. Issue 1(46). Perm: IM UB RAS, PSU Publishing; 2019: 352–356. (In Russ.)
6. Filatov V. V., Bolotnova L. A. Generalizing the experience of forecasting dynamic events at the Upper Kama potassium salt deposit according to geological and geophysical data. *Izvestiya vysshikh*

uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2019; 4: 61–70. (In Russ.)

7. Kasahara K. *Earthquake mechanics*. Moscow: Mir Publishing; 1985.

8. Malovichko A. A., Blinova T. S., Lebedev A. Iu., Nekrasova L. V. Earthquake in Solikamsk on 5 May 1995. In: *Safety concern during operation of mineral deposits in the zones of industrial agglomerations*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 1997. P. 307–315. (In Russ.)

9. Malovichko A. A. Seismogram analysis of the earthquake in Solikamsk on 5 May 1995. In: *Geology of the Western Urals at the threshold of the 20th century*. Perm: Perm University Publishing; 1999. p. 267–269. (In Russ.)

10. Malovichko A. A., Malovichko D. A., Kustov A. K. Earthquake in Solikamsk on 5 May 1995 ($M_s = 4.2$). In: *Earthquakes of the Northern Eurasia in 1995*. Moscow: GS RAS Publishing; 2001. p. 163–169. (In Russ.)

11. Godzikovskaya A. A. *Index of seismic events in the Urals from the earliest times to 2002 (Related materials)*. Moscow: IPE RAS Publishing; 2016. (In Russ.)

12. Kassir G. G., Filatov V. V. To the problem of forecasting geodynamic events at the territory of the Upper Kama potassium salt deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2002; 3: 153–164. (In Russ.)

Received 25 October 2019

Information about authors:

Vladimir V. Filatov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Motor Road, Vladimir State University. E-mail: filatov47@bk.ru

Liubov A. Bolotnova – PhD (Geology and Mineralogy), associate professor of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: l.bolotnova@yandex.ru

Для цитирования: Филатов В. В., Болотнова Л. А. О сейсмичности Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 60–67. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-60-67

For citation: Filatov V. V., Bolotnova L. A. On the seismic activity of the Upper Kama potassium salt deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020; 1: 60–67 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-60-67