

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**  
**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

УДК 622.363.2.014.3:551.25(045)(476)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-240-252>

Поступила в редакцию 06.12.2018  
Received 06.12.2018

**П. А. Витязь<sup>1</sup>, И. И. Головатый<sup>2</sup>, В. Я. Прушак<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь*

<sup>3</sup>*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Беларусь*

**ОЦЕНКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЗОНЫ КРАСНОСЛОБОДСКОГО  
РАЗЛОМА СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

**Аннотация.** Выполнено исследование потенциальной газодинамической опасности Краснослободской разломной зоны Старобинского месторождения калийных солей. Оно проводилось с учетом существующих представлений о механизме образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве месторождения, а также результатов сейсмо- и гидрогеологических исследований указанной разломной зоны и выявленных закономерностей распределения газодинамических явлений по площади месторождения. В процессе исследования установлены особенности геологического строения Краснослободской разломной зоны в верхней соляной толще, содержащей пласты полезного ископаемого. Выявлены особенности механизма эволюции гидродинамических систем в разломной и приразломной зонах. Установлено, что функциональная система галогенного метасоматоза в указанных зонах породного массива не была экранированной, вследствие чего зона поглощения гидродинамической системы располагалась в породах глинисто-мергелистой толщи, расположенной выше верхней соляной толщи и горизонтов возможного ведения горных работ, а трещиноватые, брекчированные породы разломной зоны обеспечивали фильтрацию газа из системы пустот, образовывавшихся в процессе эволюции гидродинамических систем. По результатам исследования сделан вывод, что в Краснослободской разломной зоне в пределах верхней соляной толщи отсутствовали условия формирования опасных очагов газодинамических явлений, таких как внезапные выбросы соли и газа, отжимы призабойной части пород и обрушения пород кровли. Следовательно, существует возможность безопасного ведения горных работ, таких как проходка пересекающих выработок и вскрывающих уклонов через разломную зону.

**Ключевые слова:** газодинамическая опасность, разлом, калийный горизонт, соляная толща, гидродинамическая система

**Для цитирования:** Витязь, П. А. Оценка газодинамической опасности зоны Краснослободского разлома Старобинского месторождения калийных солей / П. А. Витязь, И. И. Головатый, В. Я. Прушак // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 2. – С. 240–252. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-240-252>

**P. A. Vityaz<sup>1</sup>, I. I. Golovaty<sup>2</sup>, V. Ya. Prushak<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Presidium of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Belaruskali JSC, Soligorsk, Belarus*

<sup>3</sup>*Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Belarus*

**ASSESSMENT OF GAS-DYNAMIC DANGER OF KRASNOSLOBODSKY FRACTURE ZONE  
OF STAROBINSKY POTASH DEPOSIT**

**Abstract.** Gas-dynamic danger of Krasnoslobodsky fracture zone in Starobin Deposit of potassium salts was investigated. The study was carried out taking into account the existing ideas about the mechanism of formation of foci of gas-dynamic phenomena in the salt rock mass of the field, as well as taking into account the results of seismic and hydrogeological studies of the fault zone and the revealed patterns of distribution of gas-dynamic phenomena over the field area. The features of the geological structure of Krasnoslobodsky fracture zone in the upper salt stratum containing layers of potash ore are established. The features of the mechanism of evolution of hydrodynamic systems in fault zones are revealed. It was found

that the functional system of halogen metasomatism in these zones of the rock mass was not shielded, so that the absorption zone of the hydrodynamic system was located in the rocks of the clay-marl strata located above the upper salt strata and horizons of possible mining operations, and fractured rocks of the fault zone provided gas filtration from the system of voids formed during the evolution of hydrodynamic systems. According to the results of the study, it was concluded that in Krasnoslobodsky fracture zone within the upper salt layer there were no conditions for the formation of dangerous foci of gas-dynamic phenomena, such as sudden emissions of salt and gas and collapse of roof rocks. Accordingly, there is a possibility of safe mining operations, such as the penetration of intersecting workings through the fault zone.

**Keywords:** gas-dynamic hazard, fracture, potassium horizon, salt strata, hydrodynamic system

**For citation:** Vityaz P. A., Golovaty I. I., Prushak V. Ya. Assessment of gas-dynamic danger of Krasnoslobodsky fracture zone of Starobinsky potash deposit. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 240–252 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-240-252>

**Введение.** Разработка месторождений калийных солей существенно осложняется газодинамическими явлениями (ГДЯ), которые в большинстве случаев наносят значительный материальный ущерб калийным предприятиям и представляют реальную угрозу жизни горнорабочих. За последние десятилетия внесен существенный вклад в исследование природы, механизма, разработку методов прогноза и способов предотвращения ГДЯ в калийных рудниках. Однако, несмотря на достигнутые определенные успехи в решении проблемы ГДЯ, она окончательно не решена. В настоящее время опасными по данным явлениям в условиях рудников Старобинского месторождения калийных солей считаются породы Третьего калийного горизонта, а также глинисто-мергелистых и соляных пачек. Кроме того, в работах ряда ученых, занимавшихся проблемой газодинамических явлений в калийных рудниках, высказывались предположения о том, что опасными по ГДЯ будут тектонические (разломные) зоны месторождения [1–3]. Однако конкретных исследований в данном направлении не проводилось.

Вместе с тем в связи с существующей технологической необходимостью проходки горных выработок через зону Краснослободского разлома и выполнения горных работ в приразломной зоне актуальна задача оценки наличия и степени газодинамической опасности этой зоны, в том числе калийных пластов, глинисто-мергелистых и соляных пачек.

*Целью исследования* явилось определение уровня газодинамической опасности Краснослободской разломной зоны Старобинского месторождения калийных солей на основании существующих представлений о механизме образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве этого месторождения, анализа результатов многолетних сейсмо- и гидрогеологических исследований указанной разломной зоны, а также выявленных закономерностей распределения газодинамических явлений по площади месторождения и данных о газоносности пород.

**Геологическое строение зоны Краснослободского разлома.** Краснослободская зона разломов изучена тремя профилями скважин и пересечена тремя линиями сейсморазведочных профилей. Исследовательские гидрогеологические скважины позволили уточнить местоположение, геологическое строение зоны Краснослободского разлома, его гидрогеологические и инженерно-геологические характеристики. На рис. 1 приведен один из полученных геологических разрезов.

Установлено, что Краснослободская зона разломов имеет следующие параметры и характеристики. Разлом пересекает всю верхнесоленосную толщу под углом от  $47^\circ$  до  $54^\circ$  и выходит в нижнюю часть глинисто-мергелистой толщи под углом порядка  $38^\circ$ . Третий калийный горизонт пересечен под углом  $54^\circ$ . Примерно на уровне 4-го калийного горизонта от основного разлома отходит дополнительный разлом под углом  $70\text{--}77^\circ$ . Оба указанных разлома являются тектоническими нарушениями высокой интенсивности. Суммарная амплитуда Краснослободской зоны разлома на уровне подошвы соленосной толщи составляет порядка 66 м. Также на уровне 4-го калийного горизонта от основного разлома отходит еще один дополнительный слабовыраженный малоамплитудный разлом, который является тектоническим нарушением малой интенсивности.

Выявлены приразломные зоны трещиноватости, ширина которых составляет порядка 45–70 м. При этом трещины в основном залечены глиной или галитом.

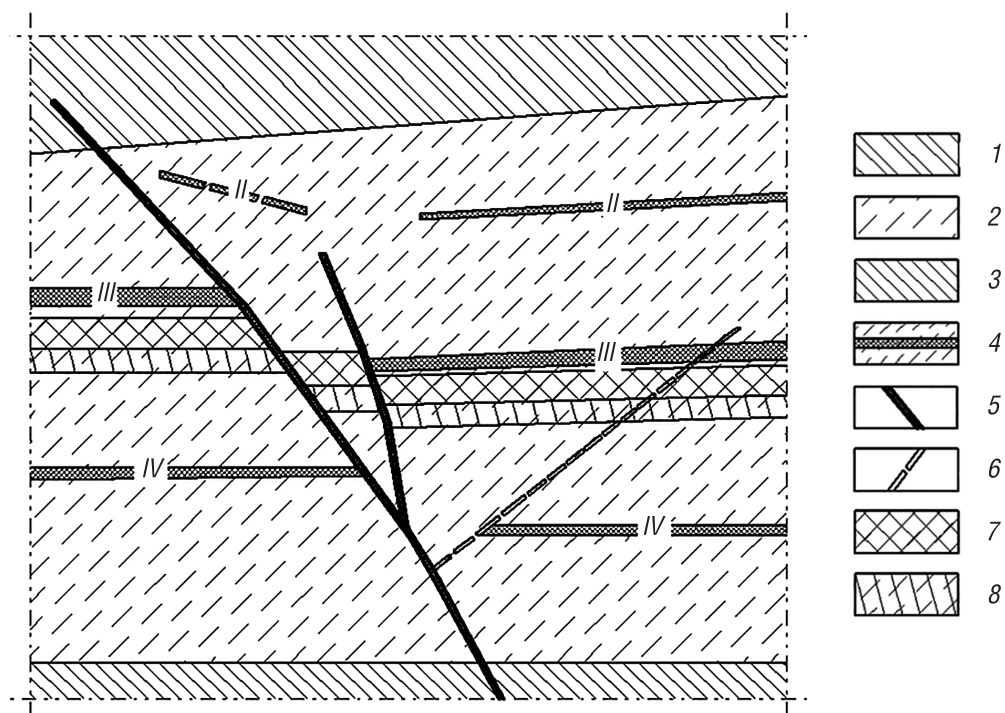


Рис. 1. Геологический разрез верхнего соляного пласта в районе Краснослободского разлома: 1 – верхняя глинисто-мергелистая толща, 2 – верхняя соленосная толща, 3 – ангидрит-доломитовая толща, 4 – калийный горизонт, 5 – разлом высокой интенсивности, 6 – разлом малой интенсивности, 7 – 12-й глинисто-мергелистый горизонт, 8 – 11-й соляной горизонт

Fig. 1. Geological section of the upper salt formation in the area of Krasnoslobodsky fracture: 1 – upper clay-marl layer, 2 – upper salt layer, 3 – anhydrite-dolomite layer, 4 – potassium horizon, 5 – high-intensity fracture, 6 – low-intensity fracture, 7 – 12<sup>th</sup> clay-marl horizon, 8 – 11<sup>th</sup> salt horizon

В зоне разлома отсутствует пласт 1-го калийного горизонта, а пласт 2-го калийного горизонта частично разрушен.

В геологическом разрезе 12-го глинисто-мергелистого горизонта выделяются четыре пачки. Их геологическое строение характеризуется частым чередованием прослоев глин с доломито-известковыми глинистыми породами, неслоистых и слабослоистых пород, а также наличием слоев песчаников и алевролитов, в верхней части горизонтов – слоев каменной соли, играющих своего рода роль «газонепроницаемых экранов», в породах горизонтов – органического вещества. Все эти особенности геологического строения глинисто-мергелистых пачек позволяют предполагать протекание в толще породы процессов образования свободных газов и, соответственно, формирование приконтактных и очаговых скоплений свободных газов, которые при ведении горных работ – проходке вскрывающих бремсбергов и уклонов, могут быть очагами газодинамических явлений.

11-й соляной горизонт представлен, главным образом, каменной солью, содержащей слои и прослои несоляных пород – галопелитов, мощность которых колеблется от долей миллиметров до нескольких десятков сантиметров. К таким галопелитовым слоям и прослоям, как показывает практика ведения горных работ в калийных рудниках, возможно примыкание приконтактных скоплений свободных газов, которые также могут быть очагами таких газодинамических явлений, как внезапные обрушения (разрушения) пород кровли (почвы) горных выработок, сопровождающиеся газовыделением.

**Механизм образования очагов газодинамической опасности.** Потенциальная (природная) газодинамическая опасность разломной зоны оценивалась нами на основании существующих представлений о механизме образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве Старобинского месторождения калийных солей. В работах ряда ученых, занимавшихся проблемой газодинамических явлений в калийных рудниках ОАО «Беларуськалий», высказываются предположения о том, что опасными по газодинамическим явлениям являются притекто-

нические и тектонические (разломные) зоны [1–8]. Однако каких-либо теоретических или экспериментальных доказательств высказанных предположений не приводится, то есть предположения носят чисто гипотетический характер.

В настоящее время геологический механизм образования очагов ГДЯ в условиях Старобинского месторождения рассматривается как единый процесс тектогенеза, восходящего движения газонасыщенных водных растворов, эпигенетических преобразований пород 3-го калийного горизонта и аккумуляции газов в соляном породном массиве [9–15]. Образование очагов ГДЯ происходило в катагенетическую стадию формирования месторождения. В этот период его гидродинамический режим характеризовался блочно-тектоническим типом разгрузки седиментационных водных растворов подсолевых отложений и глинисто-карбонатных пород внутрисолевых отложений. Движущей силой восходящей миграции водных растворов служило достаточно высокое пластовое давление. Миграция агрессивных газонасыщенных водных растворов в породы 3-го калийного горизонта из подстилающей толщи происходила по зонам разрывных тектонических нарушений, которые образовывались над стыками блоков кристаллического фундамента в периоды активизации тектонических подвижек.

Тектоническая схема физико-геологического механизма образования очагов ГДЯ в породах 3-го калийного горизонта представлена на рис. 2. Внутреннее строение зон разрывных

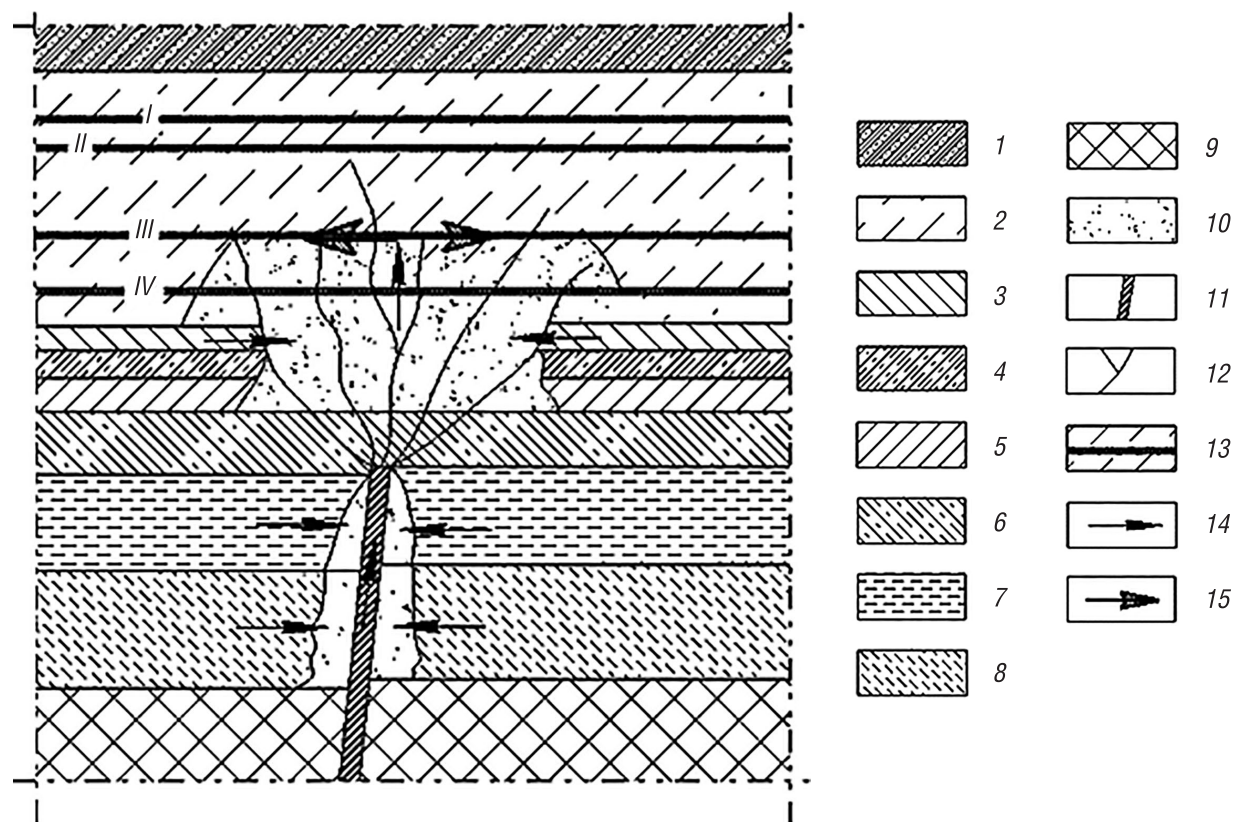


Рис. 2. Тектоническая схема физико-геологического механизма образования очагов газодинамической опасности в породах Старобинского месторождения: 1 – надсолевая глинисто-мергелистая толща, 2 – верхняя соленосная толща, 3 – ангидрито-доломитовая толща, 4 – межсолевая толща, 5 – нижняя соленосная толща, 6 – карбонатная толща, 7 – тарригенная толща, 8 – отложения верхнепротерозойские, 9 – кристаллический фундамент, 10 – области питания гидродинамических систем, 11 – тектоническое нарушение (разлом), 12 – трещины расщепления, 13 – калийные горизонты в верхнем соляном слое, 14 – направление миграции газонасыщенных водных растворов, 15 – горизонт поглощения гидродинамической системы

Fig. 2. Tectonic scheme of physical-geological mechanism of formation of pockets of gas-dynamic danger in the rocks of Starobin Deposit: 1 – upper clay-marl layer, 2 – upper layer of salt rocks, 3 – layer anhydrite-dolomite rocks, 4 – inter-salt layer, 5 – lower layer of salt rocks, 6 – carbonate layer, 7 – the layer of terrigenous rocks, 8 – deposits of upper Proterozoic, 9 – crystal base, 10 – mass transfer areas of hydraulic systems supply, 11 – tectonic disturbance (fracture), 12 – crack cleavage, 13 – potash horizons in the upper salt layer, 14 – direction of migration of gas-saturated aqueous solutions, 15 – absorption horizon of the hydrodynamic system



тектонических нарушений на флангах по восстанию играло значительную роль в механизме образования очагов ГДЯ. Многократное чередование относительно пластичных и хрупких пород в геологическом разрезе толщи, подстилающей 3-й калийный горизонт, создавало благоприятные условия для веерообразного расщепления разломов вверх по восстанию. Такое расщепление связано с преломлением разрывов при переходе из пластичных пород в хрупкие и обратно. Как правило, амплитуды разрывных тектонических нарушений затухали вверх по разрезу осадочной толщи. Если в породах кристаллического фундамента и верхнепротерозойских отложениях разлом был представлен крупным тектоническим швом, то вверх по восстанию в осадочной толще он, постепенно расщепляясь, переходил в серию параллельных крупных трещин. В таких веерах создавалась высокая удельная трещиноватость крупных трещин, а в местах сочленения крупных трещин возникали зоны клиновидной формы с высокой удельной мелкой трещиноватостью.

Проникновение проводников водных растворов из подстилающей толщи в породы 3-го калийного горизонта являлось обязательным условием при образовании очагов ГДЯ. При этом проникновение водных растворов из подстилающей толщи в породы данного горизонта происходило по трещине и через трещину. Трещина по пропускной способности неоднородна, ввиду этого скорость движения и расход раствора вдоль трещины неодинаковы. На тех участках, где скорости и расход больше, стенки трещины разрушаются более интенсивно, а в соляных породах при движении агрессивных растворов стенки трещин еще и растворяются. Поэтому места выхода мигрирующего водного раствора постепенно локализовались сначала в нескольких точках, а затем – в одной. Таким путем могла происходить трансформация щелевого канала в трубообразный. Естественно, что в местах пересечения двух или нескольких тектонических трещин образование округлых каналов происходило значительно быстрее. Вследствие этого можно предположить, что очаги газодинамических явлений в породах 3-го калийного горизонта группируются на участках наиболее проницаемых при восходящей миграции газонасыщенных водных растворов.

Таковыми проницаемыми участками были следующие зоны: искривления разрывов по простиранию и восстанию, расщепления разрывов на ряд ветвей, отщепления от разрывов оперяющих трещин, сопряжения разрывов двух или более направлений, пересечения разрывов, развития сближенных параллельных трещин. Тектонические трещины, распространяясь вверх по разрезу, вскрывали горизонты, содержащие газонасыщенные водные растворы.

Рассмотрим область, в которой твердые горные породы содержат межзерновые, поровые и капиллярные скопления газонасыщенных водных растворов. Такая область является капиллярно-пористой системой. Подвижная ее часть может быть удалена, после нее остается лишь пористая масса. Газонасыщенные водные растворы, как и твердые частицы, принимают на себя горное давление и поэтому сохраняют потенциальную пористость пород практически на любой глубине. Так как коэффициент диффузии зависит от размера зерна и при одной и той же пористости выше у крупнозернистых пород, а размер зерна в свою очередь влияет на скорость диффузионного потока больше, чем пористость, то наиболее благоприятной «очаговой» средой являются крупно- и среднезернистые метаморфические породы. Наиболее важной и типичной в геологическом отношении элементарной моделью области питания гидродинамической системы может служить капиллярно-пористая область пород, которая содержит газонасыщенные водные растворы и в пределах которой раскрылась тектоническая трещина. В этом случае внутри области достаточно нагретых флюидизированных масс возникнет перепад давления и температуры. Возможные в геологических условиях величины такого перепада были приблизительно вычислены. Оказалось, что мгновенное увеличение объема вдвое ведет к мгновенному снижению давления в 2,5–3 раза и снижению температуры на 20 %. При увеличении объема в 4 раза температура уменьшается более чем в 2 раза, а давление – почти в 10 раз. В связи с возникшими перепадами давления, температуры и массосодержания подвижных сред в породе начинается приток газонасыщенных водных растворов из окружающей массы в трещинную зону с одновременным их оттоком, по трещинной зоне вверх в результате вертикального градиента тех же параметров. Таким образом, раскрывшаяся трещина концентрирует в себе газонасыщенные водные растворы и является областью их транзита вверх по геологическому разрезу.

Удаление в первый период движения из крупных пор газонасыщенных водных растворов, которые воспринимают горное давление, не давая порам уменьшаться, приводит к уменьшению пор и к увеличению общего количества микропор, через которые в дальнейшем и будет проходить основная масса растворов. Новое раскрытие трещины может способствовать повторению стягивающего эффекта, при этом количество стягивающихся в трещину газонасыщенных водных растворов будет меньше, чем при первоначальном раскрытии. Процесс стягивания в трещину газонасыщенных водных растворов является самозатухающим. Повторение его через продолжительные промежутки времени может активировать деятельность гидродинамической системы и привести к появлению поздних слабовыраженных следов ее деятельности. Если при метаморфизме пород процессы генерации газонасыщенных водных растворов повторялись, то становилось возможным возобновление стягивающего действия трещинного механизма. В этом отношении глубинная зона разлома, влияя на формирование зон метаморфизма и гидродинамических систем, представляла своего рода «тектоническую машину», которая генерировала потоки газонасыщенных водных растворов и определяла порядок заложения очагов ГДЯ в породах 3-го калийного горизонта.

Областями питания – источниками газонасыщенных водных растворов служили породы кристаллического фундамента, верхнепротерозойских, подсолевых, межсолевых и внутрисолевых отложений. При этом нахождение областей питания гидродинамической системы в межсолевых и подсолевых отложениях является наиболее вероятным, так как установлены факты существования и в настоящее время газонасыщенных водных растворов в данных частях геологического разреза, а также сходный компонентный состав газовых смесей в водных растворах и очагах ГДЯ. Однако эти данные не отвергают возможности существования областей питания на уровне верхнепротерозойских отложений и пород кристаллического фундамента. В общем случае газонасыщенные водные растворы поступали в области транзита из нескольких областей питания. Мигрируя вверх по областям транзита, газонасыщенные водные растворы достигали пород 3-го калийного горизонта, где происходило их поглощение.

Области поглощения гидродинамических систем в породах указанного горизонта являются очагами ГДЯ. Формирование этих очагов в породах 3-го калийного горизонта представляло собой весьма сложный процесс галогенного метасоматоза, который сопровождался эпигенетическими преобразованиями пород и выделением растворенных газов в свободную фазу. Эпигенетические преобразования пород данного горизонта связаны с химическим воздействием агрессивных водных растворов. Химический фактор эпигенеза пород 3-го калийного горизонта является наиболее мощным фактором, поскольку соли обладают очень высокой растворимостью в водных растворах. Количественная оценка агрессивности водных растворов относительно этих пород показала, что взаимодействие растворов с ними могло сопровождаться выщелачиванием и замещением последних. Агрессивность водных растворов была максимальной относительно карналлита, так как он обладает наибольшей растворимостью по сравнению с сильвинитом и галитом. При миграции водных растворов в породах глинисто-карналлитовой пачки образовывались наибольшие по своему объему полости и пустоты выщелачивания, в которых происходила аккумуляция свободных газов.

При образовании очагов газодинамических явлений галогенному метасоматозу присущи следующие особенности. Типичный элементарный акт метасоматоза состоит из образования микрополости и ее заполнения. По этой схеме отношения между полостеобразованием и заполнением полостей равновесны, что определяется формулой замещения «объем на объем». Однако в случае воздействия агрессивных водных растворов на породы 3-го калийного горизонта происходит их выщелачивание и возникают неравновесные отношения. В частности, отношения становятся такими, при которых объем образующихся полостей превосходит объем отлагающегося вещества. В случае, когда выщелачивание в ходе метасоматического акта сопровождается образованием пустот с суммарными объемами, превосходящими объем одновременно выпавших осадков, возможны два пути их дальнейшего развития. Пустоты могут быть заполнены при более поздних процессах отложения минералов или произойдет их ликвидация вследствие сжатия пород под действием горного давления (метасоматическая контракция). Как показывают

результаты вскрытия выбросоопасных геологических нарушений – мульд, при их образовании происходила метасоматическая контракция пород, последствием которой являлось образование радиальных и концентрических трещин.

Механизм выделения газов из водных растворов включал две стадии. На первой стадии происходило выделение газов за счет снижения пластового давления растворов, так как они мигрировали из подстилающей толщи по областям транзита в области с меньшим пластовым давлением. Пластовое давление снижалось и при образовании пустот выщелачивания в породах 3-го горизонта. Возникающая разность давлений между областью питания и областью поглощения приводила к нарушению равновесия в системе газ – водный раствор и частичной дегазации раствора. Количественная оценка этой стадии дегазации водных растворов показала, что суммарный объем, выделившийся из водного раствора газовой смеси азот – метан, при разности пластового давления в областях питания и поглощения 25,0 МПа и температуре 62 °С может достигать величины 1 м<sup>3</sup> газа на 1 м<sup>3</sup> водного раствора. Такая величина разности пластовых давлений вполне могла иметь место в геологическом прошлом при восходящей миграции водных растворов и импульсных тектонических движениях. На второй стадии дегазации водных растворов происходило «высаливание» газов из водного раствора за счет роста его минерализации. Преобладание на первом этапе образования мульды в функциональной системе метасоматоза работы забойной зоны приводило к выщелачиванию пород 3-го горизонта и росту минерализации раствора. При выщелачивании минерализация водного раствора непрерывно возрастала, что приводило к вытеснению из него газов. Расчеты показали, что суммарный объем выделившейся газовой смеси азот–метан при росте минерализации до предела насыщения составляет 80 % от содержащихся в водном растворе газов.

Процесс расслоения газонасыщенного водного раствора на газообразную и жидкую фазы имел ряд последствий. Газ, выделившийся в свободную фазу, заполнял различного рода полости и пустоты выщелачивания и занимал верхнее положение в центральной части мульды. Это приводило к тому, что в рабочей системе метасоматоза газ оказывал блокирующее действие, как бы «предохраняя» породы кровли от выщелачивания и замещения на участках, где он их пропитывал. Аккумуляция газа в центральных частях мульды была предопределена функциональной системой метасоматоза с преобладающей работой забойной зоны, которая на этом участке характеризовалась барической гетерогенностью, связанной с процессами ее развития. Здесь возникали, менялись и исчезали внутренние градиенты давления, ведущие к локальным конвективным перераспределениям водных растворов и формированию локальных зон отжатия и всасывания, связанных с самим метасоматическим процессом. В центральных частях мульды могло быть и несколько питающих проводников, поэтому аккумуляция газов была возможна в различных подзонах. Это обусловило формирование в пределах центральных частей мульды нескольких газонасыщенных очагов.

Сложное сочетание в системе галогенного метасоматоза работы забойной, обменной и конденсационной зон способствовало появлению в мульдах своеобразной зональности: ядро структуры (брекчированные породы, глины, крупнокристаллическая каменная соль); участки, сложенные преимущественно псевдосильвинитами с полным отсутствием сильвина и частично растворенным галитом; участки, образованные псевдосильвинитами с замещением сильвина красным галитом и первично-седиментационным галитом; породы с нормально-седиментационным сильвинитом. В последующем геологическом времени область мульды подвергалась метасоматической контракции под действием литостатического давления и принимала видимую воронкообразную форму. Процесс метасоматической контракции сопровождался изменением поля напряжений в области мульды, а также образованием систем концентрических и радиальных трещин вокруг и внутри мульды.

Образование мульды в породах 3-го калийного горизонта было возможно при выполнении условия вертикальной экранированности функциональной системы метасоматоза. Эффект экранированности обеспечивался затуханием проводника на уровне 3-го горизонта, наличием в кровле слабопроницаемых соляных пород, преломлением и расщеплением проводников на литологических разностях пород. Если же эффект экранированности не соблюдался, то на уровне 3-го горизонта мульды не образовывались, а водные растворы по зоне транзита мигрировали в вы-

шележащую толщю пород. Участие водных растворов в образовании мульд и вертикальная экранированность системы метасоматоза подтверждаются фактами выделения насыщенных водных растворов из мульд при их пересечении горными выработками.

Существующие представления о геологическом механизме образования очагов выбросов соли и газа позволяют дать ответ и на вопрос о выбросоопасности геологических структур (мульд, локальных зон замещения, малоамплитудных разрывных нарушений). Выбросоопасными являются только те геологические структуры, при образовании которых выполнялись следующие условия:

зона разгрузки (поглощения) гидродинамической системы располагалась в породах 3-го калийного горизонта;

водные растворы были газонасыщенными;

функциональная система галогенного метасоматоза была экранированной.

Невыполнение хотя бы одного из этих условий приводило к образованию невыбросоопасных геологических структур. При этом геометрические размеры мульд не играли сколько-нибудь заметной роли, а утверждения о связи выбросоопасности с геометрическими размерами мульд являются несостоятельными.

Галогенный метасоматоз как явление весьма разнообразен по своей сути, и его нельзя свести к некоей универсальной схеме. Разные комбинации функциональных элементов его рабочей системы, неодинаковое время их активной деятельности ведут к разным результатам. Это в полной мере относится к механизмам образования очагов ГДЯ разного типа. При оценке геологического механизма образования очагов отжимов призабойной части пород и обрушений пород кровли ограничимся частными теоретическими построениями, касающимися отдельных форм и отдельных случаев галогенного метасоматоза.

Очаги отжимов призабойной части пород представляют собой обычные тела заполнения трещин, возникшие в процессе кристаллизации и дегазации газонасыщенных водных растворов. При трещинном характере исходной полости, заполненной газонасыщенным водным раствором, вначале могли одновременно работать забойная, обменная и конденсационная зоны. Однако в случае экранированности и замкнутости трещинного пространства происходило быстрое насыщение водного раствора по хлоридам натрия, калия и магния, и в функциональной системе метасоматоза начинала преобладать работа конденсационной зоны, что влекло за собой заполнение трещины продуктами конденсации. В трещине происходило ее заполнение посредством кристаллизации соляных минералов из водного раствора. Выделение газа из водного раствора в свободную фазу происходило за счет падения пластового давления и роста минерализации раствора. Газ, выделившийся в свободную фазу в ограниченном трещинном пространстве, блокировал рабочую поверхность трещины и заполнял поры и микротрещины на границе с вмещающими породами. При этом могли иметь место происходили и другие процессы, которые не имеют принципиального значения.

Модель механизма образования очагов обрушений пород кровли можно представить следующим образом. При восходящем заполнении трещин соляными минералами, кристаллизующимися из водных растворов, происходило латеральное нагнетание газа в массив по глинистым прослойкам и зонам контакта различных пород. В этом случае образовывались своего рода тела вторжения. При этом активным началом являлся газ, выделившийся при дегазации водного раствора. Газ, воздействуя на породы, формировал в них вторичные коллекторные свойства. В очагах обрушений порода состояла из твердого минерального каркаса и заполняющего различные пустоты газа (как правило, в галопелитовых прослойках). Не исключено, что первоначально от трещины происходила латеральная миграция газонасыщенного водного раствора по глинистым прослойкам и зонам контакта пород различного состава, а затем в месте их локализации осуществлялось фазовое разделение на газ и водный раствор.

Условия образования очагов отжимов призабойной части пород и обрушений пород кровли были такими же, как и очагов выбросов соли и газа в мульдах:

зона поглощения гидродинамической системы располагалась в породах 3-го калийного горизонта;

водные растворы были газонасыщенными;

функциональная система метасоматоза была экранированной.



**Оценка газодинамической опасности разломной зоны.** На рис. 3 приведена тектоническая схема физико-геологического механизма функционирования гидродинамической системы зоны Краснослободского разлома. Гидродинамические системы в условиях Старобинского месторождения претерпевали эволюционные изменения: они возникали, развивались и исчезали. Основным условием их возникновения являлось наличие водных растворов, миграционного напряжения и путей миграции. Гидродинамическая система могла исчезнуть по следующим причинам: прекращение генерации или исчерпание источника водных растворов, утрата подвижности раствором, снижение миграционного напряжения, закрытие областей транзита к породам калийного горизонта, превращение в иную систему, уничтожение раствора. Не останавливаясь на механизмах процессов исчезновения гидродинамических систем в условиях месторождения, следует отметить, что очаги ГДЯ в породах калийного горизонта могли сохраняться весьма длительное геологическое время только при определенных условиях. По прекращении миграции водных растворов гидродинамическая система распадалась на локальные, более мелкие системы пустот, заполненные свободным газом. Если градиент давления газа в системе пустот хотя бы в одной ее части превышал начальный градиент фильтрации для данного массива пород, то происходила фильтрация газа в породы, он безвозвратно рассеивался, и массив со временем стремился восстановить свою однородность. В противном случае, когда начальный градиент филь-

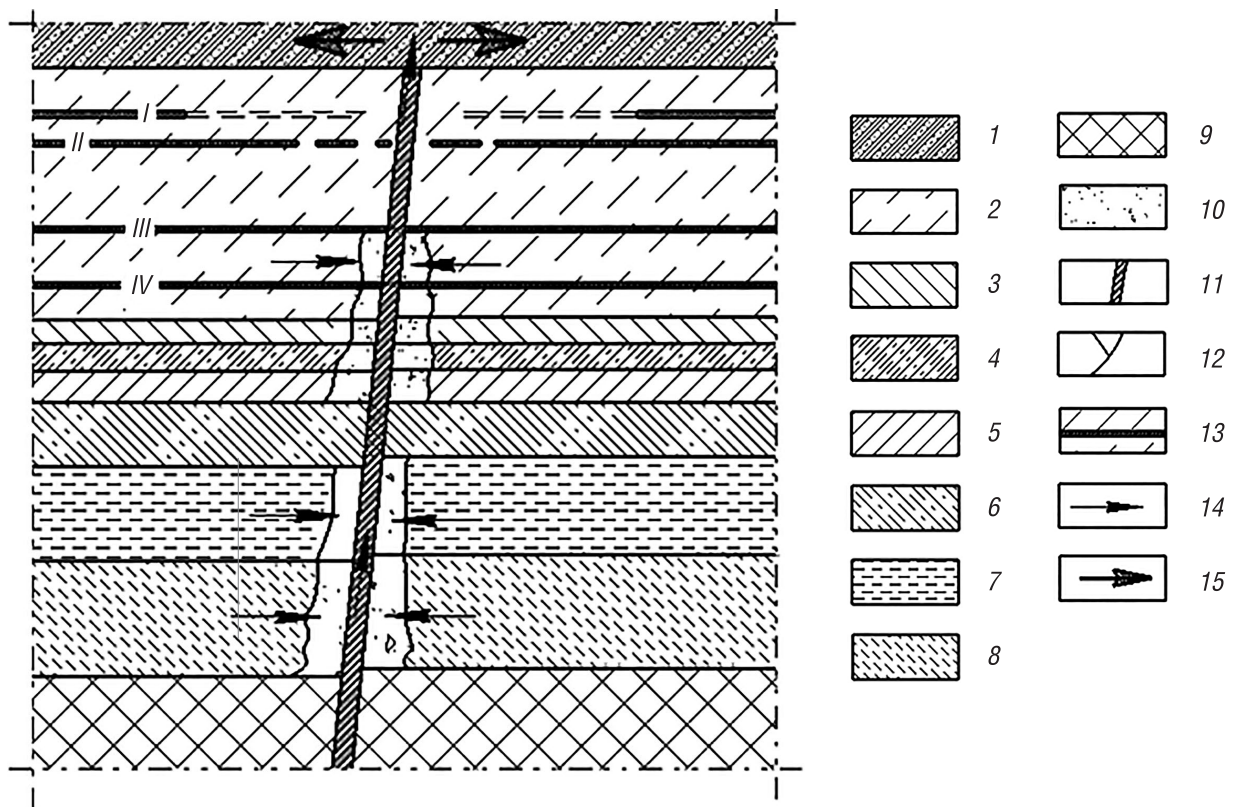


Рис. 3. Тектоническая схема физико-геологического механизма функционирования гидродинамической системы в зоне Краснослободского разлома: 1 – надсолевая глинисто-мергелистая толща, 2 – верхняя соленосная толща, 3 – ангидрито-доломитовая толща, 4 – межсолевая толща, 5 – нижняя соленосная толща, 6 – карбонатная толща, 7 – тарригенная толща, 8 – отложения верхнепротерозойские, 9 – кристаллический фундамент, 10 – области питания гидродинамических систем, 11 – тектоническое нарушение (разлом), 12 – трещины расщепления, 13 – калийные горизонты в верхнем соляном слое, 14 – направление миграции газонасыщенных водных растворов, 15 – горизонт поглощения газодинамической системы

Fig. 3. Tectonic scheme of the physical and geological mechanism of functioning of hydrodynamic system in the area of Krasnoslobodsky fracture: 1 – upper clay-marl layer, 2 – upper layer of salt rocks, 3 – layer anhydrite-dolomite rocks, 4 – inter-salt layer, 5 – lower layer of salt rocks, 6 – carbonate layer, 7 – layer of terrigenous rocks, 8 – deposits of upper Proterozoic, 9 – crystal base, 10 – mass transfer areas of hydraulic systems supply, 11 – tectonic disturbance (fracture), 12 – crack cleavage, 13 – potash horizons in the upper salt layer, 14 – direction of migration of gas-saturated aqueous solutions, 15 – absorption horizon of the gas-dynamic system

трации превышал градиент давления газа в системе пустот, формировалась квазиизолированная система, в которой давление газа препятствовало уплотнению и упрочнению пород. В мульдах это были очаги выбросов соли и газа, в трещинах – очаги отжимов призабойной части пород, вблизи трещин (в глинистых прослойках и на контактах различных пород) – очаги обрушений пород кровли.

Обобщая изложенный материал, можно сказать, что очаги ГДЯ – это следы существовавших в геологическом прошлом гидродинамических систем, содержащих газ. Геологическое время образования очагов ГДЯ установить весьма сложно. Однако возможно предположить, что в связи с затуханием интенсивных тектонических движений к концу девонского периода образование очагов ГДЯ было завершено.

На рис. 4 приведена блок-схема процесса оценки газодинамической опасности Краснослободского разлома. Как уже было отмечено, ГДЯ в калийных рудниках связаны со скоплениями свободного газа, которые приурочены к локальным зонам эпигенетических преобразований, геологическим трещинам, малоамплитудным тектоническим нарушениям с амплитудой сброса менее 3,0 м, контактам пород различного состава и мульдам. Эти скопления свободного газа обусловлены процессами галогенного метасоматоза в зонах поглощения гидродинамических систем, водные растворы которых содержали газ. Условия сохранения скоплений свободного

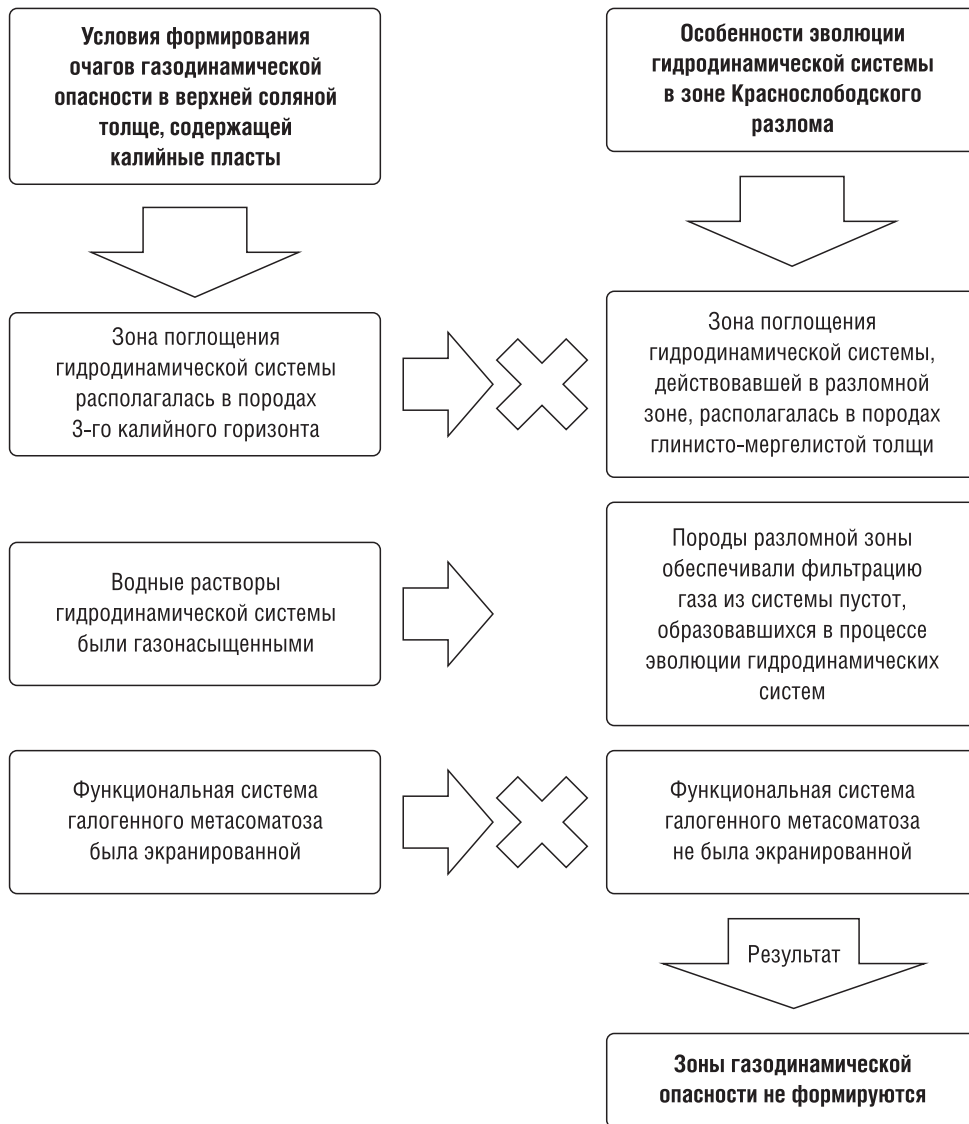


Рис. 4. Блок-схема оценки газодинамической опасности зоны Краснослободского разлома  
 Fig. 4. A block diagram of the evaluation of gas-dynamic danger zone of Краснослободский fracture

газа в соляном породном массиве длительное геологическое время, закономерности их группирования и размещения по площади Старобинского месторождения свидетельствуют о том, что они приурочены к центральной части месторождения. Можно утверждать, что очаги ГДЯ располагаются во внутренних частях Центрального и Восточного блоков Старобинского месторождения калийных солей и отсутствуют в зонах, прилегающих к региональным тектоническим нарушениям, малоамплитудным разрывным тектоническим нарушениям с амплитудой сброса 3,0 м и более, а также южной краевой зоне. Отсутствие ГДЯ в зонах, прилегающих к тектоническим нарушениям, и, как следствие, в самих тектонических нарушениях, а также в южной краевой зоне достаточно корректно объясняется с позиций теории геологического механизма образования очагов ГДЯ. В этих зонах не выполнялось условие экранированности гидродинамических систем, так как и разрывные нарушения, и краевая зона являются дренирующими системами, способствующими рассеиванию потоков газонасыщенных водных растворов.

Обобщая данные по геологическому механизму образования очагов ГДЯ в условиях Старобинского месторождения калийных солей и закономерностям распределения газодинамических явлений по площади месторождения, можно предположить, что разломная зона, 12-й глинисто-мергелистый и 11-й соляной горизонты на участке Краснослободского разлома потенциально являются неопасными по газодинамическим явлениям в связи с тем, что:

зона поглощения гидродинамической системы, действовавшей в разломной зоне, располагалась в породах глинисто-мергелистой толщи;

функциональная система метасоматоза не была экранированной, так как зона Краснослободского разлома представляла собой дренажную систему, по которой газонасыщенные водные растворы мигрировали в вышележащую толщу пород и рассеивались, предположительно, в глинисто-мергелистой толще;

в разломной зоне, представленной трещиноватыми, брекчированными породами, градиент давления газа в системе пустот хотя бы в одной ее части превышал начальный градиент фильтрации для данного массива пород и происходила фильтрация газа в породы, и он безвозвратно рассеивался, а массив со временем стремился восстановить свою однородность.

Таким образом, в зоне Краснослободского разлома и прилегающих породах отсутствовали условия для формирования квазиизолированной системы пустот – очагов ГДЯ, в которых давление газа препятствовало бы уплотнению и упрочнению пород.

**Заключение.** Установлены особенности геологического строения Краснослободской разломной зоны Старобинского месторождения калийных солей в верхней соляной толще, содержащей пласты полезного ископаемого. Выявлен механизм эволюции гидродинамических систем в разломной и приразломной зонах. Определено, что зона поглощения гидродинамической системы, действовавшей в разломной зоне, располагалась в породах глинисто-мергелистой толщи, расположенной выше горизонтов возможного ведения горных работ. Функциональная система галогенного метасоматоза не была экранированной, а трещиноватые, брекчированные породы разломной зоны обеспечивали фильтрацию газа из системы пустот, которые образовались в процессе эволюции гидродинамических систем. Таким образом, в Краснослободской разломной зоне в пределах верхней соляной толщи отсутствовали условия формирования опасных очагов газодинамических явлений, таких как внезапные выбросы соли и газа, отжимы призабойной части пород и обрушения пород кровли. Соответственно, существует возможность безопасного ведения горных работ, таких как проходка пересекающих выработок и вскрывающих уклонов через разломную зону.

#### Список использованных источников

1. Пермяков, Р.С. Внезапные выбросы соли и газа / Р.С. Пермяков, Н.М. Проскураков. – Л.: Недра, 1972. – 180 с.
2. Проскураков, Н.М. Газодинамические явления на Солигорских калийных рудниках / Н.М. Проскураков, В.Д. Фомина, В.К. Рожков. – Минск: Полымя, 1974. – 212 с.
3. Проскураков, Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках / Н.М. Проскураков. – М.: Недра, 1980. – 264 с.
4. Ковалев, О.В. Борьба с газодинамическими явлениями на калийных рудниках / О.В. Ковалев // Безопасность труда в промышленности. – 1980. – № 6. – С. 51–53.

5. Ковалев, О. В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений / О. В. Ковалев, В. С. Ливенский, Л. В. Былино. – Минск: Полымя, 1982. – 96 с.
6. Проскуряков, Н. М. Управление газодинамическими процессами в пластах калийных руд / Н. М. Проскуряков, О. В. Ковалев, В. В. Мещеряков. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
7. Проскуряков, Н. М. Управление состоянием массива горных пород / Н. М. Проскуряков. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
8. Андрейко, С. С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве / С. С. Андрейко. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 196 с.
9. Нестеров, Е. А. Исследование и разработка методов прогнозирования и способов предотвращения внезапных отжимов призабойной части пород при отработке калийных пластов: дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Нестеров. – Пермь, 2016. – 152 с.
10. Определение критической величины газового давления, способного вызвать газодинамические явления при разработке сильвинитового пласта / С. С. Андрейко [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. – 2013. – №5. – С. 22–28.
11. Барях, А. Б. О механизме локализации очагов газодинамических явлений в почве сильвинитовых пластов / А. Б. Барях, С. С. Андрейко, А. К. Федосеев // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегаз. и гор. дело. – 2017. – Т. 16, №3. – С. 247–254. <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.5>
12. Параметры профилактической дегазации пород почвы горных выработок при слоевой отработке Третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» / С. С. Андрейко [и др.] // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегаз. и гор. дело. – 2017. – Т. 16, №3. – С. 280–290. <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.9>
13. Литвиновская, Н. А. Газоносность и газодинамические характеристики пород почвы при слоевой выемке Третьего калийного пласта в условиях рудников ОАО «Беларуськалий» / Н. А. Литвинская // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / Горн. ин-т УрО РАН. – Пермь, 2016. – Вып. 14. – С. 255–258.
14. Исследования газоносности пород пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения / В. А. Тараканов [и др.] // Горн. журн. – 2010. – №8. – С. 25–27.
15. Геомеханическое моделирование внезапных разрушений пород почвы горных выработок / И. А. Подлесный [и др.] // Горн. журн. – 2010. – №8. – С. 28–30.

## References

1. Permyakov R. S., Proskuryakov N. M. *The Udden Release of Gas and Salt*. Leningrad, Nedra Publ., 1972. 180 p. (in Russian).
2. Proskuryakov N. M., Fomina V. D., Rozhkov V. K. *Gas-Dynamic Phenomena at Soligorsk Potash Mines*. Minsk, Polymya Publ., 1974. 212 p. (in Russian).
3. Proskuryakov N. M. *Outbursts of Rock and Gas in the Potash Mines*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 264 p. (in Russian).
4. Kovalev O. V. Control of gas-dynamic phenomena in potash mines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*, 1980, no. 6, pp. 51–53 (in Russian).
5. Kovalev O. V., Livenskii V. S., Bilino L. V. *Features of Safe Development of Potash Deposits*. Minsk, Polymya Publ., 1982. 96 p. (in Russian).
6. Proskuryakov N. M., Kovalev O. V., Meshcheryakov V. V. *Control of Gas-Dynamic Processes in the Layers of Potassium Ores*. Moscow, Nedra Publ., 1988. 239 p. (in Russian).
7. Proskuryakov N. M. *Rock Mass Condition Management*. Moscow, Nedra Publ., 1991. 368 p. (in Russian).
8. Andreiko S. S. *Mechanism of Formation of Gas-Dynamic Phenomena Foci in the Salt Rock Mass*. Perm', Publishing house of the Perm State Technical University, 2008. 196 p. (in Russian).
9. Nesterov E. A. *Research and Development of Methods of Forecasting and Ways to Prevent Sudden Extraction of Bottom-Hole Rocks in the Development of Potash Layers*. Perm', 2016. 152 p. (in Russian).
10. Andreiko S. S., Lyalina T. A., Ivanov O. V., Nesterov E. A. Defining a certain critical value of gas pressure, which can cause gas bursts in developing of silvinitic formation. *Izvestiya vuzov. Gornii jurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 22–28 (in Russian).
11. Baryah A. B., Andreiko S. S., Fedoseev A. K. About the mechanism of localization of gas dynamic phenomena focuses in the bedrock of silvinitic formations. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 247–254. <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.5>
12. Andreiko S. S., Luk'yanets E. V., Litvinovskaya N. A., Nesterov E. A., Bobrov D. A., Polyakov A. L., Lutovich E. A. Parameters of preventive gas removal from mine bedrocks during the layer mining of the Third potash formation at mines of Belaruskali JSC. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 280–290. <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.9>
13. Litvinovskaya N. A. The gas content and gas-dynamic characteristics of rocks of the layered soil in the excavation of the Third potassium seam in mines of Belaruskali JSC. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov: sb. nauch. tr. [Strategy and Development of Geo-Resources: Collection of Scientific Works]*. Perm', Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016. Issue 14, pp. 255–258 (in Russian).
14. Tarakanov V. A., Golovaty I. I., Beresnev S. P., Andreiko S. S., Ivanov O. V. The rock gas-bearing capacity researches of the Starobin deposit Third potash level seam. *Gornyi Zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 25–27 (in Russian).
15. Podlesny I. A., Beresnev S. P., Andreiko S. S., Nekrasov S. V., Litvinovskaya N. A. Geomechanical modeling of the sudden collapse of roadways floor rocks. *Gornyi Zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 28–30 (in Russian).



### Информация об авторах

*Витязь Петр Александрович* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

*Головатый Иван Иванович* – директор, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: belaruskali.office@kali.by

*Прушак Виктор Яковлевич* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

### Information about the authors

*Pyotr A. Vitiaz* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

*Ivan I. Golovaty* – General Director, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: belaruskali.office@kali.by

*Victor Y. Prushak* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by