

**СПОНТАННАЯ СУБЛИМАЦИЯ И ДЕСУБЛИМАЦИЯ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА****FIGHTNING SUBLIMATION AND CRYSTALLIZATION OF COAL MATTER****В.А. Баранов**  
**Vladimir A. Baranov**

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine, 2a Simferopolska str., Dnipro, 49005, Ukraine (andreevich7526@i.ua)

Рассмотрены и описаны процессы сублимации и десублимации угольного вещества в подземных условиях. Предложено одно из решений проблемы возникновения больших объемов газа при выбросах в угольных шахтах. Показано, что квазикристаллы угля, описанные в середине 80-х годов прошлого века автором статьи, могут иметь повышенную удельную поверхность. Размеры квазикристаллов достигают микрон и нанометров. Они являются связующим звеном между кристаллической и аморфной формами вещества. Газодинамические и термические явления, при наличии нарушенных зон с достаточным количеством квазикристаллов с большой удельной поверхностью, могут приводить к процессу сублимации угля. Газодинамические явления на небольших глубинах при значительной влажности и метаноносности могут приводить к процессу десублимации и к образованию газогидратов. Сублимация имеет экзотермический эффект и реализуется с повышением энтропии. Десублимация имеет эндотермический эффект и реализуется с понижением энтропии. Реальным доказательством сублимации можно считать резонансное выделение разных газов в процессе горения углей. Отсутствие резонансного выделения газов свидетельствует о переходе горения в процесс тления. Холодные и горячие выбросы являются следствием реализации процессов сублимации и десублимации. Холодный выброс характеризуется наличием инея на конусе выброса. Горячий выброс имеет экзогенный характер и отличается повышенной температурой. Приведен пример спонтанного образования газогидратов при разломе почвы горной выработки. Возможность выделения нарушенных зон и скопления газа является основой для управления газодинамическими процессами.

*Ключевые слова:* угольная шахта, скопления метана, квазикристалл, сублимация, десублимация, нарушенная зона.

The processes of sublimation and crystallization of coal matter in underground conditions are considered and described. One of the solutions to the problem of the occurrence of large volumes of gas in emissions in coal mines was proposed. It is shown that the quasicrystals of coal, described in the middle of the 1980s by the author of the article, can have an increased specific surface area. The sizes of quasicrystals reach microns and nanometers. They are the link between the crystalline and amorphous forms of matter. Gas-dynamic and thermal phenomena, in the presence of disturbed zones with a sufficient number of quasicrystals with a large specific surface area, can lead to the process of sublimation of coal. Gas-dynamic phenomena at shallow depths with considerable humidity and methane content can lead to the process of crystallization and the formation of gas hydrates. Sublimation has an exothermic effect and is realized with an increase in entropy. Crystallization has an endothermic effect and is realized with decreasing entropy. A real proof of sublimation can be considered as the resonance release of different gases in the process of burning of coals. The absence of resonant emission of gases indicates a transition of combustion to the process of decay. Cold and hot emissions are a consequence of the implementation of sublimation and crystallization processes. Cold emission is characterized by the presence of frost on the emission cone. The hot release has an exogenous character and is characterized by an elevated temperature. An example is given of the spontaneous formation of gas hydrates in the case of a fault in the soil of mining. The possibility of isolating disturbed zones and gas accumulations is the basis for controlling gas-dynamic processes.

*Keywords:* coal mine, methane accumulations, quasicrystal, sublimation, crystallization, disturbed zone

**ВВЕДЕНИЕ**

Безопасность и охрана труда в горнорудной промышленности вообще и в угольной в частности занимает одно из ведущих мест фактически во всех странах с развитой экономикой и наличием значительной сырьевой базы. Актуальность данной проблемы вызвана существенным вкладом в себестоимость продукции затрат на ликвидацию разного рода техногенных аварий, газодинамических (ГДЯ), динамических и термических явлений. В этом списке подземные взрывы, выбросы, пожары имеют большое значение не толь-

ко по степени затрат на их ликвидацию, но по объемам затраченного времени на указанные мероприятия. На ликвидацию крупных аварий на угольных шахтах уходят месяцы, а порой и годы. Чтобы ликвидировать шахтные пожары, приходится закрывать участки, горизонты, а иногда и горные предприятия, что приводит к существенным материальным потерям.

Фактические расчёты показывают, что выделяющиеся при различных ГДЯ объемы метана значительно выходят за рамки сорбционных объемов угольного вещества. Чтобы объяснить

возможность формирования метана в больших объёмах, исследователи разных стран моделируют различные вариации адсорбционных и абсорбционных процессов в угольном веществе, формирование нейронной сети трещин в призабойной части массива (Boothetal., 2017; Saghafi, 2016; Burraetal., 2014; Mohantyetal., 2017; Flores, 2013), разрабатывают физико-химическую модель генерации метана под действием тектонических и техногенных процессов (Лукинов и др., 2010), концептуальную модель и численный алгоритм расчета истечения газа и выноса угля из зоны внезапного отжима с образованием полости выброса (Трофимов, 2011), формирование метана из метильных групп, образующихся при выбросе (Фейт и др., 2008), разрабатывают термодинамическую модель, объясняющую механизм образования и эволюцию очагов опасности ГДЯ и метаногенерацию в угольных пластах (Булат и др., 2013; Булат и др., 2010), исследуют влияние форм связи метана с угольной матрицей на ГДЯ (Смирнов и др., 2017). Несмотря на значительные усилия учёных разных стран, комплекс проблем, снижающий безопасность работ на угольных предприятиях, является актуальной проблемой и нуждается в дальнейших исследованиях. Это уже сейчас позволяет получать как теоретические, так и прикладные результаты, являющиеся в основном промежуточными данными, которые послужат дальнейшему прогрессу безопасности работ на горных предприятиях.

Несмотря на значительный объем выполняемых в данном направлении работ, некоторые аспекты формирования и последующей трансформации углей и связанных с ним газов недостаточно освещены. Целью предлагаемой публикации является краткое изложение взгляда на указанную проблему с точки зрения сублимации угольного вещества и десублимации его газовой составляющей. Первая часть данного процесса происходит с выделением тепла (экзотермическая реакция), вторая – с поглощением тепла (эндотермическая реакция). Поэтому указанные процессы обычно не происходят совместно, но такие возможности не исключаются.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2012 г. была высказана идея о спонтанном переходе угля в газообразное состояние, но не хватало фактов для утверждения этого процесса (Баранов, 2012). Весной 2018 г. обработка данных по самовозгоранию углей привела к результатам, которые

позволяют однозначно утверждать наличие такого процесса как на угольных, так и на других горных предприятиях, причём не только на горных предприятиях, но вообще в экзогенных условиях.

Можно отобрать штуф угля в шахте, вывезти на поверхность, положить где-либо в комнате, а через несколько лет или десятилетий от штуфа останется маленькая кучка неорганической золы, поскольку сама органика перейдет в газообразное состояние – сублимируется. Угольное вещество состоит из газов – углерода (в основном), водорода, кислорода, азота, о чём сказано в Горной энциклопедии (1991). В соответствии с Химической энциклопедией (1994), сублимация, или возгонка – это переход вещества из твёрдого состояния в газообразное без плавления. Обратный процесс – конденсация вещества из газообразного состояния в твёрдое состояние – называется десублимацией. В угольных шахтах встречаются оба указанных процесса, но связаны они обычно с динамическими, газодинамическими и термическими процессами. Здесь речь идет о спонтанной сублимации, происходящей за очень короткое время или, как сказано в Химической энциклопедии, скачком.

Следовательно, в природе есть как эволюционная (медленная во времени), так и революционная (спонтанная, проявляющаяся в виде скачка) сублимация и десублимация. Спонтанная сублимация и десублимация относятся к фазовым превращениям первого рода, при которых плотность вещества, термодинамические потенциалы, энтропия изменяются скачком, выделяется или поглощается теплота фазового перехода. Нужно отметить, что при спонтанном переходе угля в газ значение энтропии растёт, тогда как при переходе газообразного вещества в твёрдое – снижается.

Теперь перейдём к описанию примеров указанных процессов в разных условиях и в различных веществах, поскольку угольное вещество не единственное, с которым эти процессы происходят. Для начала следует указать, что наша Вселенная газовая, и водород самый распространённый газ в ней; достаточно и других газов – углерода, кислорода, азота и др. Процессы эволюционной и революционной сублимации и десублимации происходят постоянно как в космосе, так и на нашей Земле. Хвост комет, образующийся при подлёте к Солнцу или иной звезде, – пример сублимации их вещества. На нашей планете есть значительные объёмы газов в твёрдом состоянии – вся органика, карбонаты, каустобиолиты, галиты, сульфиды,

газогидраты и другие минералы и породы. Периодически они сублимируют или десублимируют, что зависит от термодинамических условий.

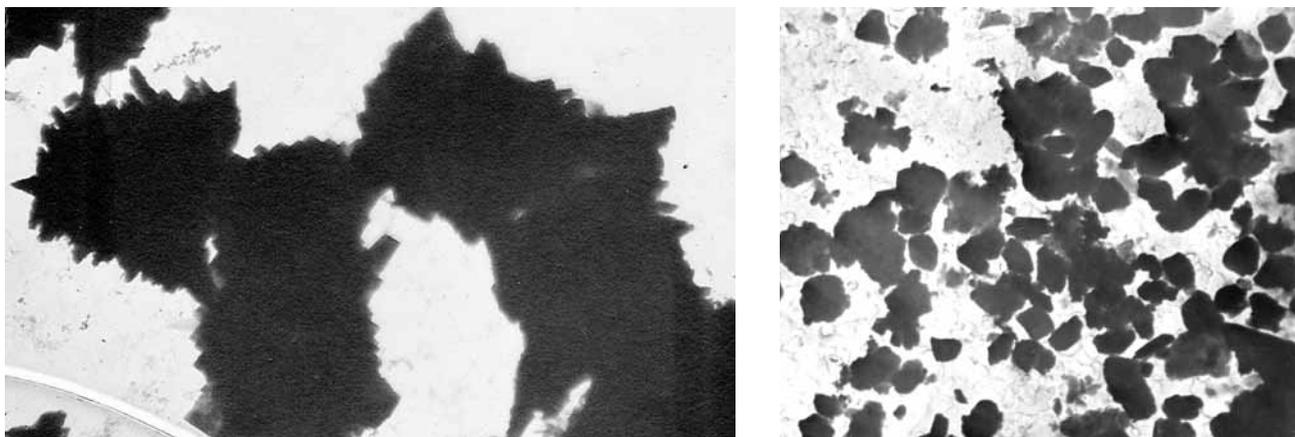
В настоящее время, к примеру, в атмосфере слишком мало углекислого газа – около 0,03 %. Поэтому доломиты не формируются, несмотря на то, что раньше они формировались, а значит, указанного газа было больше. Объемы растительности тоже зависят от количества углерода в атмосфере, о чём указано в Геологическом словаре (1978). На Земле процессы испарения и конденсации известны всем из школьной программы. Но это не учитывается, и учёные выстраивают многочисленные гипотезы «генерации метана» при выбросах угля и газа, поскольку его количество иногда существенно превышает газоносность углей и вмещающих пород. Слово «иногда» здесь имеет решающее значение, поскольку действительно не каждое ГДЯ сопровождается выделением значительных дополнительных объемов газов, в основном метана, если мы рассматриваем угольные шахты.

Причина спонтанной сублимации угля в процессе выброса, на наш взгляд, заключается в наличии нарушенных зон в месте выброса. Именно нарушенные зоны являются причиной динамических, газодинамических и термических явлений в угольных шахтах. Горные удары, выбросы, самовозгорания приурочены именно к нарушенным зонам. Общеизвестно, что в кристаллических породах крепь обычно не используют, поскольку породы там достаточно прочные и горные выработки в них сохраняются длительное время. Для осадочных пород использование крепи необходимо, поскольку породы ещё не достаточно

прочные, в нарушенных зонах они по свойствам ближе к осадкам, чем к породам. При переходе из связанных, сцементированных пород в нарушенную зону происходит формирование сдвиговых деформаций, самых опасных, так как в них давление на крепь может увеличиваться на порядки. Все горные удары происходят в нарушенных зонах, которых на шахтах от 30 до 70 % от всего объема углей и вмещающих пород, по результатам наших исследований. Причём крупные нарушенные зоны могут иметь подзоны, а степень напряжённого состояния в них существенно изменяется (Баранов и др., 2016).

В основном (или только) в нарушенных зонах часть угольного вещества сублимируется и поэтому свободного газа там существенно больше, что является основной причиной выбросов угля. При выбросе часть угольного вещества – максимально нарушенного – может спонтанно (скачкообразно) сублимироваться в газ, обычно углекислый газ и метан. Почему это не происходит всегда, а только в некоторых зонах, можно объяснить с позиций степени нарушения структуры угольного вещества.

В прошлом веке, в середине 80-х годов, автором данной публикации были открыты и описаны квазикристаллы в веществах всех систем – породах, минералах, минералоидах, искусственных веществах (рис.). Указанные структуры являются связующим или переходным звеном между кристаллической и аморфной формами вещества. Формирование квазикристаллов, подобно кристаллизации и десублимации происходит с уменьшением энтропии. Иными словами, избыточная энергия в нарушенных зонах трансформируется в новую структуру, причём по количеству квази-



Квазикристаллы угля:

а – со «сложной» поверхностью,  $\times 4000$ ; б – с «простой» поверхностью,  $\times 2000$ .

Quasicrystals of coal:

a – with a «complex» surface, an increase of  $\times 4000$ ; b – with a «simple» surface, an increase of  $\times 2000$ .

кристаллов и их размерам можно судить о напряжённом состоянии в конкретной нарушенной зоне (Baranov, 2013).

Нами исследована микроструктура угля под электронным микроскопом (см. рис). Основной результат здесь - это разная степень сложности поверхности квазикристаллов, сформированных в разных условиях. Образующаяся сеть микро-трещин в тектонически нарушенных зонах представляет уже новую квазикристаллическую структуру угольного вещества с размерами указанных микроструктур от сантиметров и миллиметров, до первых микрон и нескольких сот нанометров.

В качестве упрощённого примера представим, что нам нужно спичкой зажечь бревно, поле-но, чурку, щепку. Рассматривая данный перечень, вряд ли кто-либо допустит иную последовательность в степени лёгкости загорания. Данный пример не является уникальным, можно приводить в качестве примера разные по размерам куски, кусочки льда и другие вещества. Смысл примера в размерах, существенно влияющих на скорость реакции. Не расписывая детально очевидные вещи, отметим, что размеры объекта прямо пропорциональны скорости реакции с ним происходящей. Частицы угля со сложной удельной поверхностью имеют повышенную активность для протекания в них физико-химических реакций с минимальным для этого временем.

Таким образом, формирование квазикристаллов в угольном веществе – факт, описанный ещё в середине 80-х годов прошлого века; зависимость скорости реакции от объёмов или размера объекта – факт, известный из курсов физики и химии; наконец процесс сублимации или десублимации – факт, широко описанный и применяемый в промышленности, особенно хорошо известный под термином «возгонка». Объединив эти три факта, мы получаем объяснение возможной трансформации угольного вещества в газы ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ , и др.) при определённых условиях, включающих два обязательных факта – наличие достаточных объёмов квазикристаллов со значительной удельной поверхностью и резкое изменение термодинамических параметров (выброс, взрыв, загорание). ГДЯ происходит там, где уже есть газ в свободной форме и в достаточном количестве. В процессе выброса (например) наиболее мелкая фракция угольных частиц с высокоразвитой удельной поверхностью сублимируется (трансформируется) в газы, более крупные частицы образуют «бешенную муку», частицы с размером в микроны

и нанометры, по удельному весу приближающиеся к атмосферному воздуху. Остальное угольное вещество разрушится до частиц разных размеров в зависимости от расстояния до эпицентра давлений, вещественного состава, размеров нарушенной зоны, изначального давления газов, степени углефикации угля, влажности и многих других сопутствующих факторов.

Подтверждение процесса сублимации при анализе самовозгорания углей было получено весной этого года. Данный анализ показал резонансное выделение разных газов на первой стадии горения. Далее горение переходит на стадию тления, где спонтанная сублимация уже не происходит и, после определённого времени, процесс тления прекращается. Но могут быть и рецидивы, если температурный очаг достигнет нарушенной зоны. Таким образом, имея данные газового анализа, мы можем судить о том, на какой стадии находится возгорание, происходит ли сублимация или этот процесс уже завершён.

Теперь необходимо остановиться на процессе десублимации, который тоже реализуется на угольных шахтах, но обычно это происходит на небольших глубинах, где температура ещё не достигает больших значений. Возможно, указанный случай где-то описан, но мне это неизвестно. Со слов В.Г. Илюшенко, работавшего главным инженером на шахте им. А.О. Засядько, почва в одной из выработок внезапно разломилась и в указанной выработке пошёл снег. Поскольку детали неизвестны, остаётся только предположить, что значительные объёмы метана, прорвавшиеся из почвы в нарушенной зоне в выработку, и повышенная влажность стали основой для формирования газогидратов. Уменьшение температуры происходит вследствие эндотермической реакции формирования газогидратов. В литературе редко описываются такие факты, но они есть. Формирование газогидратов происходит иногда в процессе выброса угля и газа, когда конус выброшенного угля покрывается инеем. В некоторых старых публикациях встречались такие термины как холодные и горячие выбросы. Здесь горячие выбросы представляли собой процесс сублимации, а холодные – процесс десублимации. В одной из старых публикаций даже предлагалось переводить метан в газогидраты и транспортировать его на-гора в специальные ёмкости для последующего использования. Вот такой экзотический способ дегазации угольных выработок рассматривался ранее учёными.

## ВЫВОДЫ

Приведенные результаты исследований показывают, что из-за многообразия состава угля, условий, в которых он находится, различной степени его микроструктурной нарушенности, термодинамической обстановки, степени увлажнения, глубины, степени углефикации и многих других параметров, могут возникать различные сочетания факторов, приводящие к ГДЯ, динамическим и термическим процессам в угольных шахтах. Правильное понимание этих процессов позволит нам прогнозировать вероятность их возникновения и

своевременно реагировать, в идеале управлять этими процессами и прежде всего газовой ситуацией. Да, горняки добывают уголь, а не газ, но просто отмахнуться не получится. Это комплексная проблема и решать её необходимо только комплексно. Займут ли своё место в нише научных знаний процессы сублимации и десублимации – покажет время, но то, что это реальные процессы, происходящие сейчас на угольных шахтах, – сомнению не подлежит. Объемы этих процессов будут уточняться, в чём и состоит принцип научных исследований.

## REFERENCES

- Baranov V.A., Karamushka O.A., 2016. Basics of forecasting disturbed zones in coal seams, *Mining Journal (Horniy zhurnal)*, No. 5, pp. 95-103. (In Russian).
- Baranov V.A., 2012. The reasons for the formation of gas-dynamic phenomena in mines, 2-nd Russian-Chinese Scientific Conference «Nonlinear geomechanical and geodynamic processes in mining mineral deposits at great depths». Novosibirsk, IGD SD RAS, pp. 198-203. (In Russian).
- Bulat A.F., Dyrda V.I., 2013. Sudden emissions of coal and gas in the context of nonlinear nonequilibrium thermodynamics, *Coal of Ukraine*, Kyiv, № 12, pp. 24-33. (In Russian).
- Bulat A.F., Skipochka S.I., Palamarchuk T.A., Antsiferov V.A., 2010. Methanogenesis in coal seams. *Dnepropetrovsk, Lira LTD*, pp. 328. (In Russian).
- Lukinov V.V., Goncharenko V.V., Suvorov D.A., 2010. Generation of methane by coal under the influence of technogenic and natural tectonic processes in a mountain range, *Geotechnical Mechanics (Heotekhnicheskaya mekhanika)*. Dnepropetrovsk, № 88, pp. 130-140. (In Russian).
- Smirnov V.G., Dyrdin V.V., Ismagilov Z.R., Kim T.L., Manakov A. Yu., 2017. On the influence of the forms of communication of methane with a coal matrix on gas-dynamic phenomena arising from the underground mining of coal seams. *Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry*. Kemerovo, pp. 34-41. (In Russian).
- Trofimov V.A., 2011. The sudden release of coal and gas. Removal of coal and gas into the developed space. *Moscow, MIAB*, № 1, pp. 391-405. (In Russian).
- Feit G.N., Malinnikova O.N., 2008. Causes of increased methane emission during sudden coal and gas emissions in mines. *Moscow, MIAB*, № 1, pp. 206-211. (In Russian).
- Baranov V.A., 2013. Structuring of rock and formation of quasicrystals. *Science Bulletin of the NMU*, № 5, pp. 11-16. (In English).
- Booth P., Brown H., Nemcik J., Ren T., 2017. Spatial context in the calculation of gas emissions for underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 27, Iss. 5, pp. 787-794. (In English).
- Баранов В.А. Основы прогноза нарушенных зон в угольных пластах / В.А. Баранов, О.А. Карамушка // *Горн. журн.* – 2016. – № 5. – С. 95-103.
- Баранов В.А. Причины формирования газодинамических явлений в шахтах / В.А. Баранов // 2-я Российско-Китайская науч. конф. «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 198-203.
- Булат А.Ф. Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // *Уголь Украины*. – 2013. – № 12. – С. 24-33.
- Булат А.Ф. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф. Булат, С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, В.А. Анциферов. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. – 328 с.
- Лукинов В.В. Генерация метана углем под влиянием техногенных и природных тектонических процессов в горном массиве / В.В. Лукинов, В.В. Гончаренко, Д.А. Суворов // *Геотехн. механика*. – 2010. – № 88. – С. 130-140.
- Смирнов В.Г. О влиянии форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов / В.Г. Смирнов, В.В. Дырдин, З.Р. Исмагилов, Т.Л. Ким, А.Ю. Манаков // *Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – Кемерово, 2017. – С. 34-41.
- Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство / В.А. Трофимов. – М.: ГИАБ, 2011. – № 1. – С. 391-405.
- Фейт Г.Н. Причины повышенного метановыделения при внезапных выбросах угля и газа в шахтах / Г.Н. Фейт, О.Н. Малинникова // М.: ГИАБ, 2008. – №1. – С. 206-211.
- Baranov V.A. Structuring of rock and formation of quasicrystals / V.A. Baranov // *Наук. вісн. НГУ*. – 2013. – № 5. – С. 11-16.
- Booth P. Spatial context in the calculation of gas emissions for underground coal mines / P. Booth, H. Brown, J. Nemcik, T. Ren // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – V. 27, Iss. 5. – P. 787-794.

Burra A., Esterle J.S., Golding S.D., 2014. Coal seam gas distribution and hydrodynamics of the Sydney Basin. NSW, Australia, Austral J. Earth Sci., vol. 61 (3), pp. 427-451 (In English).

Flores R.M., 2013. Coal and coalbed gas: fueling the future. Elsevier Science, Burlington, 686 p. (In English).

Mohanty M.M., Pal B.K., 2017. Sorption behavior of coal for implication in coal bed methane an overview. Int. J. Min. Sci. Technol., vol. 27 (2), pp. 307-314 (In English).

Saghafi A., 2016. Determination of the gas content of coal, In: Proceedings of 16th Coal Operators' Conference. University of Wollongong. New South Wales, Australia, pp. 347-356. (In English).

Burra A. Coal seam gas distribution and hydrodynamics of the Sydney Basin / A. Burra, J.S. Esterle, S.D. Golding // NSW, Australia, Austral J. Earth Sci. - 2014. - vol. 61 (3). - P. 427-451.

Flores R.M. Coal and coalbed gas: fueling the future / R.M. Flores. - Elsevier Science, Burlington, - 2013. - 686 p.

Mohanty M.M. Sorption behavior of coal for implication in coal bed methane an overview / B.K. Pal // Int. J. Min. Sci. Technol. - 2017. - vol. 27 (2). - P. 307-314.

Saghafi A. Determination of the gas content of coal / A. Saghafi // In: Proceedings of 16th Coal Operators' Conference. University of Wollongong. - New South Wales, Australia, 2016. - P. 347-356.

Manuscript received October 30, 2018;  
revision accepted November 20, 2018

Інститут Геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України,  
м. Дніпро, Україна

## СПОНТАННА СУБЛІМАЦІЯ І ДЕСУБЛІМАЦІЯ ВУГІЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ

**В.А. Баранов**

Розглянуті та описані процеси сублімації і десублімації вугільної речовини в підземних умовах. Запропоновано один із шляхів вирішення проблеми виникнення великих обсягів газу при викидах у вугільних шахтах. Показано, що квазікристали вугілля, описані в середині 80-х років минулого століття автором статті, можуть мати підвищену питому поверхню. Розміри квазікристалів досягають мікрон і нанометрів. Вони є сполучною ланкою між кристалічною і аморфною формами речовини. Газодинамічні і термічні явища, при наявності порушених зон з достатньою кількістю квазікристалів з великою питомою поверхнею, можуть призводити до процесу сублімації вугілля. Газодинамічні явища на невеликих глибинах при значній вологості і метаносності, можуть спричиняти процес десублімації та утворення газогідратів. Сублімація має екзотермічний ефект і реалізується з підвищенням ентропії. Десублімація має ендотермічний ефект і реалізується з пониженням ентропії. Реальним доказом сублімації можна вважати резонансне виділення різних газів у процесі горіння вугілля. Відсутність резонансного виділення газів свідчить про перехід горіння в процес тління. Холодні і гарячі викиди є наслідком реалізації процесів сублімації і десублімації. Холодний викид характеризується наявністю інею на конусі викиду. Гарячий викид має екзогенний характер і відрізняється підвищеною температурою. Наведено приклад спонтанного утворення газогідратів при розломі ґрунту гірничої виробки. Можливість виділення порушених зон і скупчень газу є основою для управління газодинамічними процесами.

*Ключові слова:* вугільна шахта, скупчення метану, квазікристал, сублімація, десублімація, порушена зона.