

УДК 622.33.013.3

**АНАЛИЗ УРОВНЯ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА И ОБЪЕМА ДОБЫЧИ УГЛЯ
В ШАХТЕ “МЫСЛОВИЦЕ-ВЕСОЛА”**

М. Дрегер^{1,2}

¹Силезский университет, E-mail: marcin.dreger@interia.pl,
ул. Боткова, 12, 40-007, г. Катовице, Польша

²Институт геологических наук,
ул. Бендзиньская, 60, 41-200, г. Сосковец, Польша

Рассмотрены параметры добычи каменного угля в шахте “Мысловице-Весола”, расположенной в Верхнесилезском каменноугольном бассейне Польши, в котором концентрация метана увеличивается с глубиной. В период наблюдений объем выделяемого метана вырос в 5 раз, что связано со многими факторами, включающими сложную тектоническую структуру района, проницаемую природу сброса Ксиаз, меняющуюся геологическую структуру, повышенную скорость добычи угля. Характер изменения объема добычи угля в период с 1994 по 2018 г. аналогичен общей тенденции добычи угля в Польше — медленное, равномерное снижение. Объем добычи угля в шахте “Мысловице-Весола” снизился в 2 раза с одновременным увеличением уровня выделения метана.

Верхнесилезский каменноугольный бассейн, выделение метана, шахта “Мысловице-Весола”, Польская горнодобывающая группа, объем добычи каменного угля

DOI: 10.15372/FTPRPI20210308

Каменный уголь — важный источник энергии для генерации электричества и тепла на территории Польши [1, 2]. Польша является основным поставщиком каменного угля в Евро-союз с долей рынка 95 %, оставшиеся 5 % приходятся на чешскую часть Верхнесилезского каменноугольного бассейна [3, 4]. Польская горнодобывающая группа представляет собой крупнейшее предприятие по добыче угля в Польше и Европе, объединяющее 14 шахт и обеспечивающее 47 % объема добытого каменного угля в стране [3, 5]. Самая значимая по добыче угля шахта “Мысловице-Весола” расположена в северной части Верхнесилезского бассейна. Она характеризуется наибольшей угрозой выделения метана среди остальных шахт Польской горнодобывающей группы.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской деятельности Силезского университета в Катовице и профинансирована Силезским университетом и Институтом геологических наук (WNP/INOZ/2020_ZB32).

С каждым годом добыча каменного угля в Польше сокращается. Политические и экономические изменения, связанные с легкой разработкой неглубоко залегающих угольных пластов, выработанных ранее, привели к тому, что горные предприятия вынуждены добывать уголь из глубоких метаносодержащих залежей, что влечет за собой большие затраты и высокий уровень природных угроз. Общий объем добычи угля в Польше до конца XX в. превышал 100 млн т/год, в 1994–2018 г. он постепенно снизился до 63 млн т [1–3]. Сложная геологическая структура, неравномерные тектонические характеристики и высокая мощность налегающей породы служат причинами неравномерности метаносодержания в массиве. Уровень выделения метана в Верхнесилезском каменноугольном бассейне изменялся со временем и до 2003 г. составлял менее 800, в 2004 г. более 800, в 2015 г. 900 млн м³, т. е. наблюдался возрастающий тренд [1, 6]. Подобная картина с увеличением уровня выделения метана отмечается и в других угольных бассейнах мира [7].

Цель настоящей работы — рассмотрение изменений уровня выделения метана за 1974–2018 гг. и объема добычи угля за 1994–2018 гг. в шахте “Мысловице-Весола”. Этот временной период охватывает добычу угля из пластов с высоким содержанием метана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные данные для шахты “Мысловице-Весола”, такие как геологическая структура угольных залежей, стратиграфия, литология, тектоника, выделение метана, содержание метана и общий объем добычи угля, технические параметры длинного забоя, получены из документации [8], дополнительные — из ежегодных отчетов о состоянии основных природных и технических угроз в угледобывающей промышленности и статистики происшествий [3, 5].

Концентрация природного метана в угольном массиве измеряется методом вакуумной дегазации. Образцы угля, собранные в шахте, боковых стенках и из скважин на поверхности, помещают в герметичный контейнер, и газ полностью удаляют с помощью вакуума. В результате получают концентрацию метана с единицей измерения м³/т *daf* (*daf* — сухое угольное вещество без шлака) [8–10]. Польские стандарты по охране труда, основанные на стандартах Министерства по охране окружающей среды и Министерства энергетики, предписывают брать образцы для измерения концентрации метана с интервалами 200 м по горизонтальной выработке и классифицировать группы угольных пластов по одной из четырех категорий угрозы выделения метана [11, 12]:

Категория	Содержание метана, м ³ /т <i>daf</i>
Отсутствие метана	< 0.1
I	0.1 – 2.5
II	> 2.5 ≤ 4.5
III	> 4.5 ≤ 8.0
IV	> 8.0

Общий абсолютный уровень выделения метана — сумма среднего годового объема вентилируемого метана Q_{vam} и объема дегазации Q_o : $Q_{total} = Q_{vam} + Q_o$. Объем дегазации Q_o — объем собранного метана подземной дренажной газовой системой, постоянно измеряемый датчиками. Объем вентилируемого метана оценивается как средний объем метана, входящего в воздушный поток в вентиляционном канале, измеряемый датчиками [6, 13]:

$$Q_{vam} = \frac{VSC_m}{100},$$

где S — площадь поперечного сечения вентиляционного канала, m^2 ; V — скорость воздушного потока; C_m — концентрация метана в вентиляционном воздухе, %.

Удельный уровень выделения метана — объем выделяемого метана на 1 т добытого угля:

$$Q_{sp} = \frac{Q_{total}}{P_c},$$

P_c — годовой объем добычи угля, т/год.

АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Угольное месторождение “Весола” располагается в северной части главной синклинали Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Это многослойное месторождение насчитывает 41 пласт разной мощности и разного качества залежей. В состав входят формации каменноугольного, триасового, миоценового и четвертичного периода с разнообразными тектоническими характеристиками.

Формации каменноугольного периода делятся на паралические и лимнические. Они обнаружены на глубине 1600 м и распределены по литостратиграфическому принципу [8, 14]:

- *слои Намуриан А – Поруба* (группа 600) — нижняя часть пластов каменноугольного периода месторождения “Весола”, образованы в виде темно-серого алевролита, аргиллита и песчаника с мелкими и средними зернами. Изучен только один угольный пласт 610, который не разрабатывался, остальные имеют малую мощность и считаются условно рентабельными;

- *слои Намуриан В – Сэддл* (группа 500). Пласт 510 мощностью 13 м — наиболее значимый и выгодный для разработки, является стратиграфической границей между континентальными лимническими месторождениями и морскими паралическими. Он находится на глубине 480 м от уровня поверхности в северной части месторождения и 800 м севернее сброса Ксиаз, в южной области залегает на глубине 940–1000 м. В северной части обнаружен пласт 501 мощностью 4.4 м;

- *слои Вестфалиан А – Руда* (группа 400) характеризуются разным литологическим составом и разделены на верхний и нижний слои Руды. Верхний состоит из аргиллита и песчаника со множественным включением угольных пластов, нижний — из месторождений различного типа, доминирует среднезернистый песчаник с включениями угольных пластов. Обнаружено 11 угольных пластов, и началась разработка пласта 416;

- *слои Вестфалиан В – Орзеже* (группа 300) выходят за пределы исследуемой области и являются наиболее молодыми слоями каменноугольного периода в северной части месторождения. Мощность составляет 600–800 м, состоят из чередующихся слоев песчаного аргиллита, песчаника и большого числа угольных пластов. Всего насчитывается 22 пласта;

- *слои Вестфалиан С – Лазиска* (группа 200) залегают в южной части месторождения, в северной они подверглись эрозии и проявляются небольшими участками в западной части. Мощность слоев 85–260 м, состоят из песчаника большой мощности с включениями сцементированного аргиллита. В данных слоях залегает три угольных пласта.

Формации триасового периода обнаружены в южной части месторождения, имеют мощность 3–125 м. В их состав входит известняк, мергель и песчано-илистые залежи. Вблизи сброса Ксиаз наблюдается малое количество формаций триасового периода. В формации

миоценового периода входят суглинки, сланцы, пески, ил, песчаники и сцементированные породы. Их общая мощность 7–216 м, наибольшая наблюдается в южной части месторождения рядом со сбросом Ксиаз, севернее которого находятся формации миоценового периода в частях формаций каменноугольного периода, подвергшихся эрозии. Формации четвертичного периода мощностью 0.1–60 м залегают почти на всей исследуемой области и состоят из глины, песка, гравия и гальки. Общая мощность налегающих формаций каменноугольного периода составляет 0.1–200 м.

Угольное месторождение “Весола” характеризуется большим количеством сбросов, наиболее крупная тектоническая дислокация — сброс Ксиаз. Он разделяет месторождение на основную часть и южную. В северной падение пластов составляет 4–6° в южном направлении, в южной — 2–8°. Ближе к сбросу Ксиаз уклон пластов увеличивается до 8–14°, в непосредственной близости к сбросу (100 м в ширину) — до 16–28°. Наибольшее понижение возникает на расстоянии 300 м от сброса Ксиаз, а в следующей фазе пласты каменноугольного периода постепенно поднимаются в южном направлении, образуя антиклинальную складку в центральной и юго-восточной части месторождения. Сброс Ксиаз расширяет месторождение с 320 до 420 м на юг с шириной области дислокации 300 м (рис. 1). Также в месторождении присутствуют другие сбросы, разделяющие его на меньшие области.

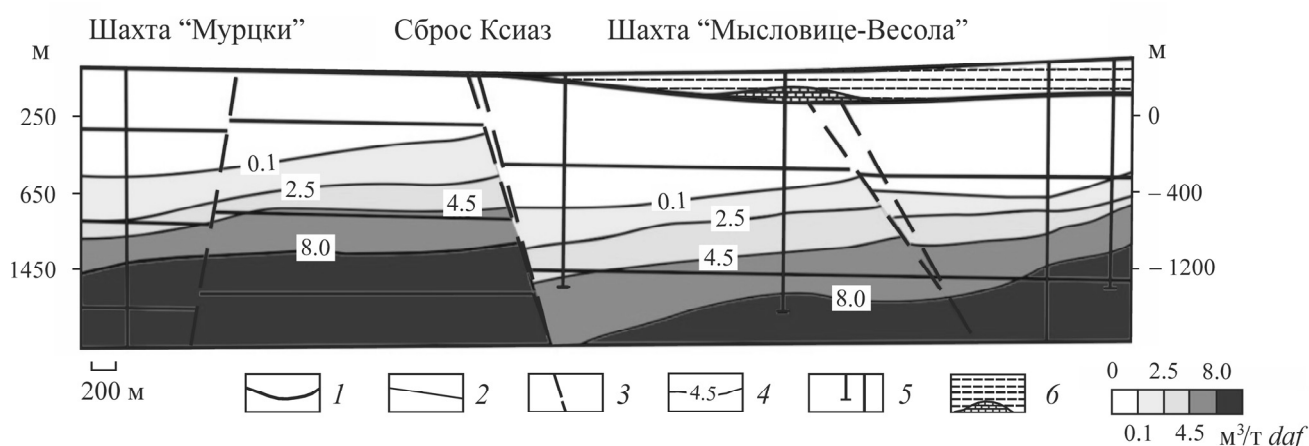


Рис. 1. Поперечный разрез области шахты “Мысловице-Весола”: 1 — стратиграфическая граница; 2 — угольный пласт; 3 — область сброса; 4 — содержание уровня метана ($\text{м}^3/\text{т daf}$); 5 — скважина; 6 — формации триасового и миоценового периода

НАЛИЧИЕ МЕТАНА И УГРОЗА ЕГО ВЫДЕЛЕНИЯ В ВЕРХНЕСИЛЕЗСКОМ КАМЕННОУГОЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

Выделение метана — опасная и непредсказуемая природная угроза в мировой подземной угледобывающей промышленности [6]. Метан не определяется органами чувств человека, он легче воздуха и, вытесняя кислород из воздуха в шахте, делает его непригодным для дыхания [16]. Если концентрация метана в воздушной смеси достигает 5–15 %, он характеризуется высокой взрываемостью, т. е. открытый огонь или искра способны привести к взрыву [9, 16]. Наличие метана в воздухе шахты значительно увеличивает мощность взрыва угольной пыли [17].

Метан — парниковый газ с высокой активностью, вносящий вклад в глобальное потепление. Повышение его содержания в атмосфере возникает в ходе антропогенной деятельности и природного выделения [18, 19]. Он способен содержаться в атмосфере 9–15 лет, в то время

как углекислый газ — 100 лет, поглощает тепло в 25–30 раз больше, чем углекислый газ. Основные источники метана — торфяники, скот, рисовые поля, термокарстовые озера и промышленность [20, 21]. Международное энергетическое агентство Евросоюза старается включить метан в Систему торговли выбросами в Европе (EU ETS). Если это произойдет, то будет считаться, что метан поглощает тепло в 30 раз больше углекислого газа, т. е. горные предприятия будут обязаны выплачивать значительные денежные суммы за каждую тонну метана, выделенного в атмосферу. По оценкам, после включения метана в EU ETS затраты на добычу угля в Польше увеличатся на 1 млрд евро в год [21, 22], т. е. польские горные предприятия будут обязаны платить более 500 евро за каждую тонну выделенного в атмосферу метана. В 2015–2018 гг. в Польше в результате добычи угля и осуществления вскрышных работ выделено 900 млн м³ метана, более 70 % выделяемого газа уходит в атмосферу через вентиляционные стволы [1, 3, 5, 6].

Факторы добычи и наличие метана. Метан образуется в ходе углефикации органических веществ и присутствует в углесодержащих формациях каменноугольного периода в свободном и адсорбированном состоянии. В адсорбированном он связан с углем физически и химически, в свободном — заполняет полости, трещины, поры угля и окружающей породы [23–28]. Максимальный объем метана, образованного в процессе углефикации, составил 255 м³ на 1 т угля [29]. Метан содержится в угольных пластах в условиях равновесного давления. В ходе проведения горизонтальной выработки нарушается сорбционное равновесие и метан высвобождается. Наиболее интенсивное его выделение происходит после выхода на поверхность новой выработки или забоя, после чего выделение уменьшается [30–32]. Также через пустоты и при разрушении угля метан способен перемещаться в выработанные и действующие забои [23, 33, 34]. Неотработанные области и нормальные сбросы обычно действуют как каналы выделения метана в атмосферу из глубоких угольных пластов. Скорость добычи угля повышает уровень выделения метана. Технические параметры длинного забоя определяют скорость добычи угля. В последнее время средняя длина сплошного забоя увеличилась на 41 %, в результате чего повысилась скорость добычи, среднесуточный объем добычи угля из одного сплошного забоя, а также абсолютное значение уровня выделения метана [3, 33]. В угледобывающих шахтах, расположенных на территории Польши, в 1990–2008 гг. высота длинного забоя увеличилась с 2.28 до 2.59 м, длина — с 159 до 223 м, суточная скорость продвижения забоя — с 2.04 до 3.83 м/сут. С другой стороны, средняя суточная скорость продвижения подготовительных выработок уменьшилась с 6.46 до 4.51 м/сут [33]. Каждый простой, незапланированная остановка или замедление добычи способны увеличить объем выделяемого метана в выработку из нового очистного забоя, отбитого угля, сбоек, налегающих и подстилающих пород из-за постоянного высвобождения метана. Такие технические параметры, как длина и высота длинного забоя, должны проектироваться с учетом природных угроз, в том числе угрозы выделения метана.

В 1994–2018 гг. в ходе исследования добычи угля в шахте “Мысловице-Весола” разрабатывались 11 угольных пластов: 308, 318, 349, 401, 416, 418, 501, 510, 405/1, 405/2, 405/5. Технические параметры длинного забоя в шахте изучались с 1995 по май 2020 г. В 1995 г. эксплуатировался один забой высотой 1.4 м, в 2001 г. количество забоев выросло до семи. В этот же период средняя высота длинных забоев увеличилась до 2.3 м на каждый забой.

Наибольшее число эксплуатируемых забоев зафиксировано в 2004–2006 гг. и в 2013 г. и составило 9 забоев. В общем случае с 2009 по май 2020 г. количество эксплуатируемых забоев колебалось от 6 до 9, в 2018 и 2020 г. эксплуатировалось 5 и 3 забоя соответственно (рис. 2). Средняя высота длинного забоя составила в 1995–1996 гг. — менее 2 м, в 1997–2005 гг. — 2.3–3.0 м и в 2006–2020 гг. — более 3 м. В Верхнесилезском каменноугольном бассейне средняя глубина добычи угля увеличилась с 700 (2010 г.) до 788 м (2018 г.), т. е. на 8–10 м ежегодно [3]. В шахте “Мысловице-Весола” в 1995–2020 гг. средняя глубина разработки угля постоянно росла с некоторыми колебаниями (рис. 2) и находилась на уровне 485–606 м, в 2002 г. превысила 600 м, а после 2002 г. осуществлялась на больших глубинах. Отметка глубины 700 м пройдена в 2008 г., а добыча угля на глубине более 800 м началась в 2015 г. Наибольшая глубина разработки на этой шахте составила 900–955 м от уровня поверхности (2012–2016 гг.) [8]. Такие глубины характеризуются наличием областей с высокой концентрацией метана, которая превышает $5 \text{ м}^3/\text{т daf}$ (рис. 3).

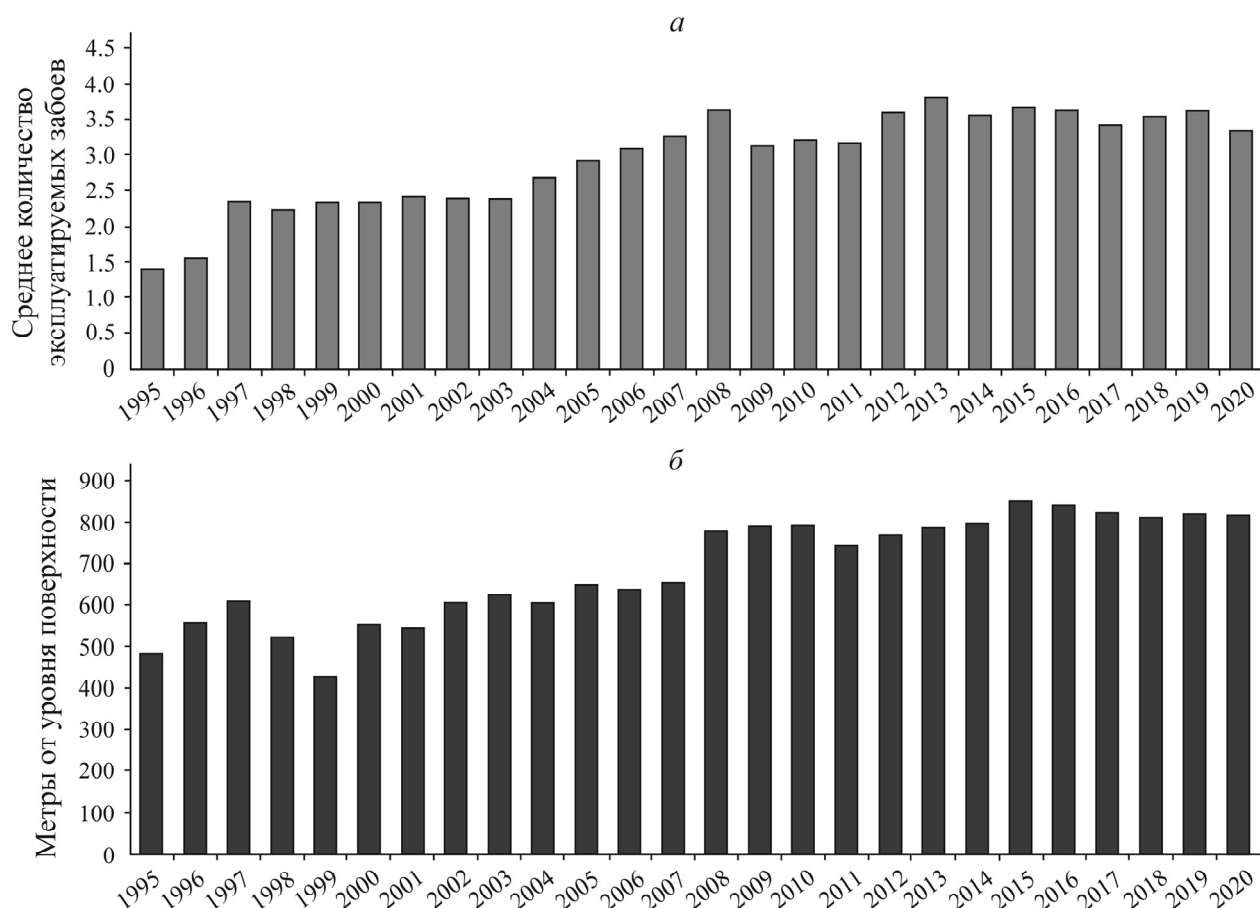


Рис. 2. Среднее количество эксплуатируемых забоев (а) и средняя глубина разработки угля (б)

Угроза выделения метана в Верхнесилезском каменноугольном бассейне. В 1994–2003 гг. из шахт, расположенных в Верхнесилезском каменноугольном бассейне, выделялось ежегодно более 700 млн м^3 метана. Ежегодный объем выделения метана в выработки в 2004–2014 гг. превысил 800 млн $\text{м}^3/\text{год}$, в 2014–2018 г. — 900 [1, 2]. Опасное содержание метана в глубоких угольных пластах вынуждает горные предприятия использовать его для внутренних целей, увеличивая парниковый эффект и повышая затраты в будущем.

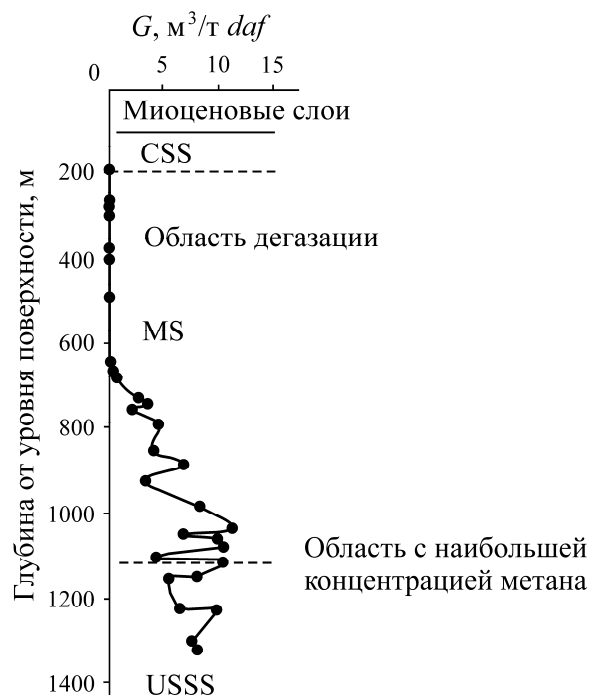


Рис. 3. Распределение метана в скважине LG-23: CSS — формации песчаника Краков; MS — формации аргиллита; USSS — верхнесилезские формации песчаника

Запасы метана в угольных месторождениях Польши оцениваются на уровне 170 млрд м^3 [35]. Использование системы дренажа угольного метана при добыче угля позволяет значительно повысить безопасность выполнения работ. Приемлемый дренажный процесс должен позволять осуществлять добычу из основной залежи и отводить газы из других угольных пластов [36].

Геологические неравномерности — важный фактор учета при оценке потенциала вертикального и горизонтального газового дренажа в угольных пластах. Сбросы, трещины и другие аномалии — серьезная проблема управления газовыделением в горной промышленности [26]. В Верхнесилезском каменноугольном бассейне выполнены два проекта, связанные с угольным метаном. Цель геометанового проекта — изучение возможностей добычи газа с высоким содержанием метана из пласта 510 с помощью гидроразрыва. Он доказал свою успешность: газ из пласта 510 использовался в качестве топлива для генератора мощностью 0.9 МВт, снабжающего электроэнергией поселения в округе Пщина в Верхнесилезском регионе [37].

Национальный исследовательский институт изучил возможности предпромышленной дегазации в угольных пластах 501–510 с помощью гидроразрыва. Это первый проект, связанный с угольным метаном, в действующей шахте в Европе и, возможно, в мире [35]. Выполнено исследование концентрации метана, литостратиграфии и проницаемости указанных пластов. Для этой цели с поверхности пробурены две скважины в западной области части А месторождения “Весола”: скважина Wesola PIG-1 — вертикальная скважина глубиной 1000 м (пробы получены с глубины 591–1000 м) соединяется с горизонтальной скважиной (пробы не получены) Wesola PIG2-H длиной 1918 м (рис. 4). Обе скважины пробурены через пласты 501–510. На первой стадии выполнены измерения уровня выделения метана в обеих скважинах. В полученном газе зафиксировано высокое содержание метана ($> 95\%$) с дневным уровнем выделения 230–250 м^3 . На второй стадии осуществлен гидроразрыв в пласте 510, и уровень выделения метана увеличился, но с высоким содержанием пластовых вод [35].

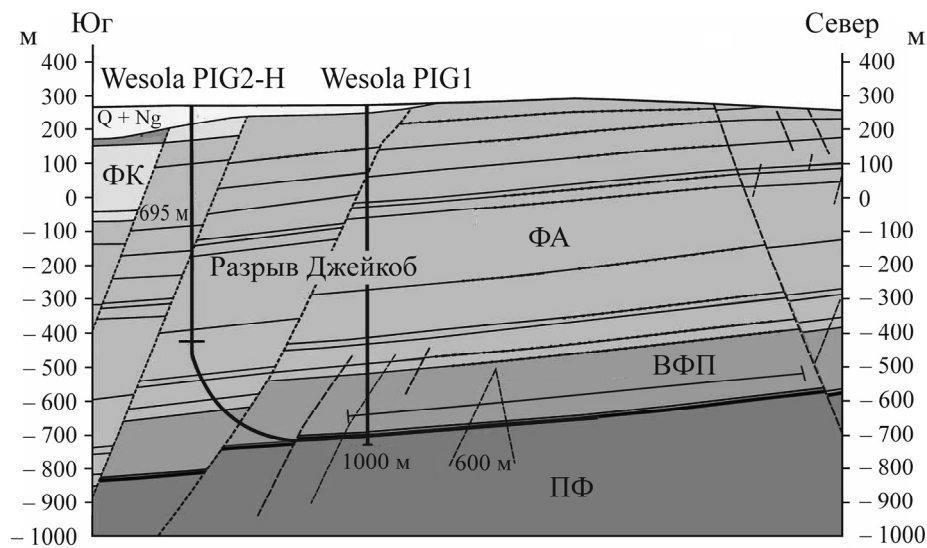


Рис. 4. Скважины, пробуренные к пластам 501–510: ФК — формации песчаника Краков; ФА — формации аргиллита; ПФ — паралические формации; ВФП — верхнесилезские формации песчаника

Результаты исследовательского проекта, связанного с угольным метаном, в шахте “Мысловице-Весола” доказали возможность и необходимость дренажа метана из нетронутых угольных пластов при подземной добыче угля на территории Польши. Подобные меры позволили сократить общую концентрацию метана в угольных пластах, обеспечив безопасность будущей разработки. Поскольку содержание метана в собранной газовой смеси превышает 90 %, такую смесь можно использовать для производства электроэнергии. Тем не менее разнообразная тектоническая структура и низкая проницаемость угольных пластов значительно затрудняют крупномасштабный дренаж метана из нетронутых пластов. В ближайшем будущем крупномасштабный дренаж метана станет необходимостью из-за увеличения глубины добычи угля и роста уровня выделения метана [35].

Шахта “Мысловице-Весола” расположена в северной газовой области Верхнесилезского каменноугольного бассейна [9]. Здесь концентрация метана в угольных пластах увеличивается с глубиной. В геологическом прошлом угольные пласты неглубокого залегания естественным образом дегазированы, так как недостаток герметичности и высокая проницаемость покрывающих пород миоценового периода с наличием проницаемой области сброса Ксиаз позволили высвободить метан и другие газы из угольных пластов и окружающих пород. Области дислокации являются важным фактором, так как смещения способны ослабить основания пластов и сделать их проницаемыми [36]. Сбросы и связанные с ними зоны ослабления также могут быть причиной высвобождения значительного объема метана в ходе горных работ, распределяя его в вертикальном и горизонтальном направлениях по всему профилю формаций каменноугольного периода. Это явление наблюдается во многих угольных бассейнах [38]. В пластах песчаника и аргиллита висячих крыльях сброса расположены зоны повышенной концентрации газа [39]. Характер проницаемости основной дислокации изучен при наличии верхней части метановой зоны ($> 2.5 \text{ м}^3/\text{т daf}$). На севере месторождения “Весола” верхняя часть метановой зоны располагается на глубине 400 м от уровня поверхности (восточная область), также она обнаружена на больших глубинах вблизи сброса Ксиаз, где верхняя часть метановой зоны находится на глубине 800–850 м [2, 8]. В южной части месторождения угольные пласты с концентрацией метана $> 2.5 \text{ м}^3/\text{т daf}$ находятся на глубине 900–1000 м. При увеличении рас-

стояния от сброса Ксиаз глубина верхней части метановой зоны уменьшается. В южных частях на границе месторождения метановые области обнаружены на глубине 400 м [8]. В прошлом проницаемость сброса Ксиаз позволила метану переместиться со значительной глубины в поверхностные слои и высвободиться в атмосферу естественным путем. Угольные пласты и окружающие породы, расположенные на расстоянии от основной дислокации, также дегазированы естественным путем из-за наличия множества мелких сбросов. Южная часть месторождения “Весола” является нижним крылом сброса Ксиаз, где граница области высокой концентрации метана располагается глубже, чем в висячем крыле (основная область). Эта основная дислокация на месторождении разделяет метановые зоны по линии сброса, что характерно для структуры метановой зоны, расположенной вблизи значительных региональных сбросов (Ксиаз, Клодника, Жависжовице или область Бли-Чеховице) [2, 40].

Сброс Ксиаз разделяет угольное месторождение на северную (основную) часть и южную. В северной части меньшие сбросы делят месторождение на части: А, А1, В, С, D, D1. Каждая из частей имеет различное содержание метана (табл. 1) [8].

ТАБЛИЦА 1. Содержание метана в различных частях угольного месторождения “Весола”, $\text{м}^3/\text{т daf}$

Часть	Минимальное	Максимальное	Среднее
А	0.00	14.11	5.68
А1	0.01	10.58	5.82
В	0.00	11.80	3.35
С	0.65	15.10	6.35
Д	0.00	7.40	2.68
Д1	0.50	7.93	3.44
С, южная часть	0.00	19.12	2.49

Для определения содержания метана и тектонического строения слоев Руда и Сэддл в южной части месторождения “Весола” за 1988–1991 гг. пробурено шесть скважин глубиной 1358–1574 м [35]. Вертикальное распределение содержания метана можно наблюдать по скважине LG-23. Пласты с меньшей глубиной залегания дегазированы естественным путем в геологическом прошлом, поэтому на глубине 0–700 м образовалась область дегазации, свободная от метана. Концентрация метана в угольных пластах и окружающих породах увеличивается с глубины 700 м и достигает максимального значения на глубине 1000–1200 м. Наличие газостойких пластов аргиллита (плотный алевроит и аргиллит) и мощных пластов песчаника обеспечивают герметизацию метановых пластов, значительно влияя на концентрацию метана [2].

Изучено пять горизонтов добычи угля в шахте “Мысловице-Весола” (465, 665, 865, 1000, 1230/1250 м). В трех наиболее показательных частях месторождения содержание метана увеличивается при увеличении глубины [8]. В большей части (южной) концентрация метана на горизонтах добычи угля неглубокого залегания (465 и 665 м) составляла $\sim 0 \text{ м}^3/\text{т daf}$. На глубине 865 м она увеличилась до $2.6 \text{ м}^3/\text{т daf}$ (I категория угрозы выделения метана). При росте глубины содержание метана превысило $4.5 \text{ м}^3/\text{т daf}$ (глубина 1000 м) и $9.6 \text{ м}^3/\text{т daf}$ (глубина 1250 м), соответствуя II, III и IV категории угрозы выделения метана. В северной области в части А рядом со сбросом Ксиаз на отметках 665, 865 и 1000 м получены максимальные концентрации метана (3.16, 5.40, $6.59 \text{ м}^3/\text{т daf}$ соответственно). В части D, удаленной на север от сброса Ксиаз, изучено три неглубоко залегающих горизонта. Тренд результатов похож на предыдущие испытания: 0.38 (465 м), 2.13 (665 м), $3.08 \text{ м}^3/\text{т daf}$ (865 м).

Данные, собранные в геологическом отчете по шахте “Мысловице-Весола”, показали, что концентрация метана увеличивается с глубиной; угольные пласты и окружающая порода, расположенные ближе к сбросу Ксиаз, содержат меньший объем метана по сравнению с удаленными от сброса пластами. Исследование вертикального распределения метана в угольном месторождении “Весола” выполнено в рамках пилотной программы Польского геологического института по буровой скважине Wesola PIG-1 (табл. 2) [35].

ТАБЛИЦА 2. Содержание метана по данным из скважины Wesola PIG-1

Угольный пласт	Глубина скважины, м		Содержание метана, м ³ /т <i>daf</i>		
	Верхняя часть	Нижняя часть	среднее	минимальное	максимальное
361	660.55	661.66	0.29	0.29	0.29
364	672.30	673.26	2.17	1.88	2.47
401	681.25	682.93	2.11	2.08	2.13
404/1	701.40	702.52	2.09	1.84	2.33
Без номера	704.10	705.40	2.71	2.07	3.36
404/5	752.55	756.60	3.02	2.02	4.16
Без номера	772.95	774.10	3.57	3.53	3.61
405/2	786.22	788.00	4.80	4.26	5.35
407/1	801.86	803.42	4.28	3.26	5.30
414	873.55	874.95	4.68	3.89	5.57
416	889.90	892.95	5.34	3.67	7.00
Без номера	947.47	948.50	5.80	5.29	6.32
501	962.05	965.70	6.72	5.37	7.98
510	966.05	977.10	6.17	5.11	7.29

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уголь, добытый из польских шахт, — основное топливо для производства тепла и электроэнергии в стране. Период наблюдения за объемом добычи угля 1994–2018 гг., когда выполнялась разработка угольных пластов 308, 318, 349, 401, 416, 418, 501, 510, 405/1, 405/2, 405/5. Общий объем добычи угля в шахте “Мысловице-Весола” снизился, как и объем добычи угля в Верхнесилезском бассейне, в целом со 124.0 до 54.4 млн т/год [1, 3]. Наибольший годовой объем добычи угля приходился на период 1994–1995 г., составляя 3.8 млн т/год (рис. 5) [3, 8]. В 1996–1998 гг. годовой объем добычи снизился до 2.51 млн т, а в 1999–2006 гг. увеличился до ~3 млн т/год (пиковое значение 3.26 млн т в 2005 г.), далее следующие три года наблюдался значительный спад объема добычи. В 2008 г. объем добычи достиг наименьшего значения 1.83 млн т, в 2009–2013 гг. зафиксирован рост до 3.08 млн т/год.

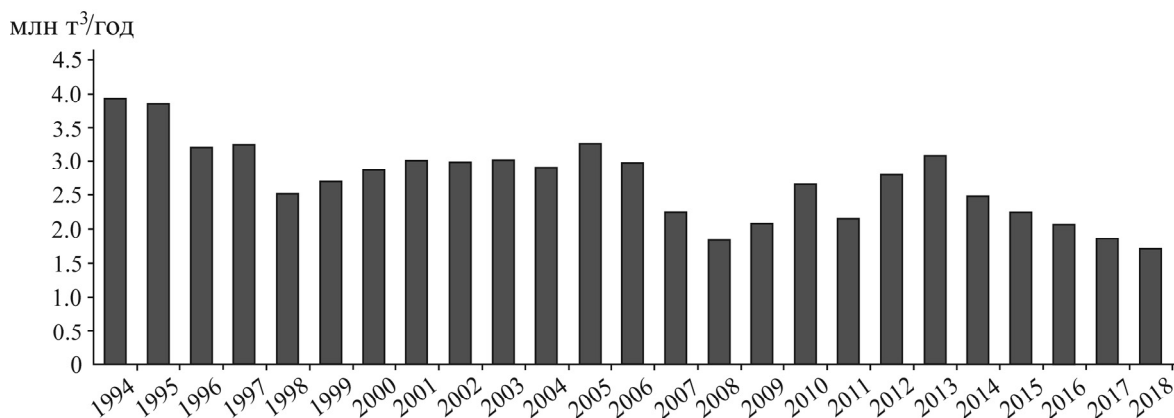


Рис. 5. Гистограмма объема добычи угля за период наблюдения

Уголь в шахте “Мысловице-Весола” добывался при ежегодном увеличении глубины разработки с повышением высоты сплошного забоя. Из-за разработки глубоких пластов, высокого содержания метана и сокращения рабочих забоев с 8–9 (2012–2013 гг.) до 6 (с 2014 г.) объем добычи угля постепенно снижался с 2.48 до 1.71 млн т (2018 г.). На текущий момент ведется разработка пластов 416 и 510 тремя забоями [8]. Наиболее богатый угольный пласт 510 непрерывно разрабатывается с 1997 г. Пласты имеют крайне высокую концентрацию метана, среднее его содержание по данным из скважины Wesola PIG-1 превышает $5 \text{ м}^3/\text{т daf}$.

Наблюдения за абсолютным уровнем выделения метана, дегазацией и объемом вентилируемого метана велись на протяжении 45 лет (1974–2018 гг.). На рис. 6 показаны основные тенденции и изменения уровня выделения метана. Наименьший уровень ($10.35\text{--}13.40 \text{ млн м}^3/\text{год}$) зафиксирован в 1974–1977 гг., к 1980 г. он увеличился до $43.05 \text{ млн м}^3/\text{год}$. Далее 27 лет (1980–2006 г.) выделение метана находилось на устойчивом уровне ($43 \text{ млн м}^3/\text{год}$ с небольшими колебаниями). После начала разработки глубоких пластов с высокой концентрацией метана уровень его выделения в выработки увеличивался с каждым годом, в 2007 г. он превысил $55 \text{ млн м}^3/\text{год}$, в последующие годы не опускался ниже $50 \text{ млн м}^3/\text{год}$. С 2012 г. выделение метана выросло с $61 \text{ млн м}^3/\text{год}$ до наибольшего значения, зафиксированного в 2016 г. ($90 \text{ млн м}^3/\text{год}$). За 2017–2018 гг. выделение метана составило $70 \text{ млн м}^3/\text{год}$, в 2013–2014 гг. значительное его повышение совпало со снижением объема добычи угля. Тяжелые условия добычи и геологические факторы повлияли на снижение объема добычи угля и на увеличение уровня выделения метана в один и тот же период времени. В последующие годы уголь будет добываться на той же или большей глубине и, следовательно, выделение метана увеличится или останется на уровне $70\text{--}90 \text{ млн м}^3/\text{год}$.

млн $\text{м}^3/\text{год}$

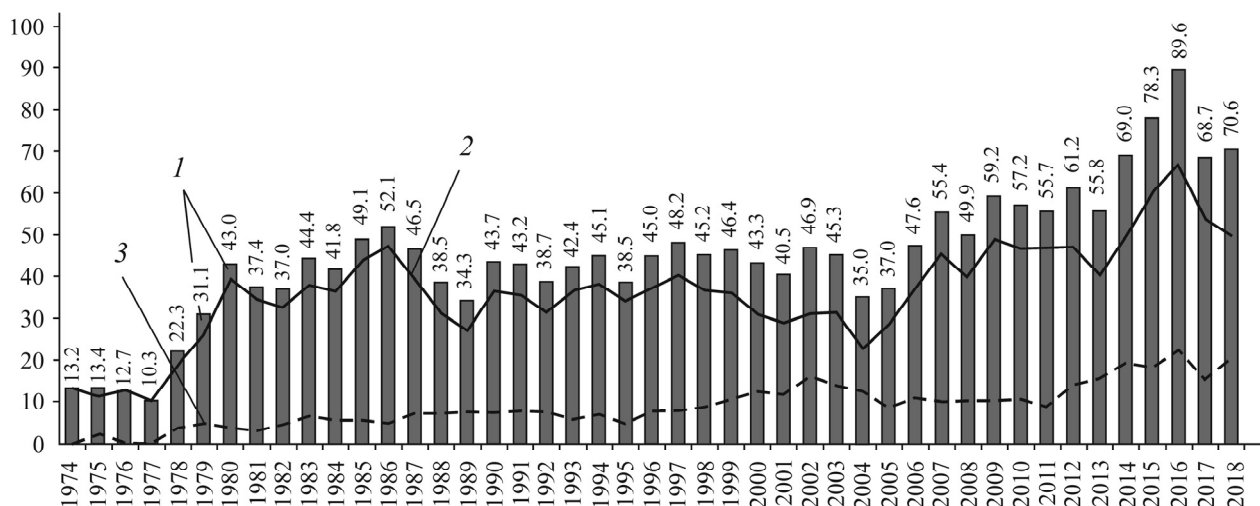


Рис. 6. Уровень выделения метана (1), объема вентилируемого метана (2) и объема дегазации за период наблюдения (3)

Объем вентилируемого метана — результат наиболее распространенного способа удаления использованного нагретого воздуха с содержанием метана $\sim 1\%$ из шахты, что позволяет содержать угольные выработки в безопасности [19]. С другой стороны, каждая тонна метана, выброшенного в атмосферу, усиливает парниковый эффект [6]. За 1974–1977 гг. весь выделенный метан был выброшен в атмосферу через вентиляционные стволы. Только в 1975 г. 16 % высвобожденного метана собрано системой дренажа, остальная часть выброшена в ат-

мосферу. Тренд кривой объема вентилируемого метана совпадает с трендом абсолютного уровня его выделения. Эти две величины связаны между собой, так как 80 % абсолютного объема выделенного метана удаляется из шахты через вентиляционные стволы (объем вентилируемого метана). В 1978–1980 гг. объем вентилируемого метана увеличился в 2 раза (с 18 до 29 млн м³/год), что вызвано разработкой пластов с более высоким содержанием метана. В предыдущие годы почти все разрабатываемые пласты не содержали метан. Год спустя объем вентилируемого метана понизился до 34.43 млн м³/год, но с каждым последующим устойчиво увеличивался, достигнув максимума в 1986 г. (более 47 млн м³/год). Объем выброшенного в атмосферу метана через систему вентиляции постепенно уменьшился с 39.74 (1987 г.) до 26.75 млн м³/год спустя два года. В 1989–2003 гг. объем вентилируемого метана находился на уровне 30–40 млн м³/год с устойчивым трендом. В 2004 г. абсолютный уровень выделения метана в выработки был низким, объем вентилируемого метана также имел низкие значения (22.65 млн м³/год), а в 2005–2009 гг. они одновременно увеличились. Добыча угля в тяжелых геологических и горнотехнических условиях требует более эффективной вентиляции для удаления из шахты воздушной смеси, содержащей метан (1 %) и другой газ. С 2009 по 2018 г. объем вентилируемого метана превышал 40 млн м³/год, а в последние четыре года наблюдения превышал 50 млн м³/год. Наибольшие его значения зафиксированы в 2015 (60) и 2016 г. (67 млн м³/год).

Дегазация — второй наиболее эффективный и распространенный способ содержания выработок свободными от метана. Подземный сбор метана содействует вентиляции для поддержания наименьшего возможного уровня накопления метана. В 1974–1977 гг. почти весь выделенный метан выбрасывался непосредственно в атмосферу (рис. 6). По сравнению с абсолютным уровнем выделения метана и объемом вентилируемого метана, общий тренд дегазации был восходящим с несколькими разовыми падениями. В 1978–1994 гг. объем дегазации имел устойчивый уровень с небольшим восходящим трендом. Объем собранного газа колебался с 3.0 до 7.5 млн м³/год. В 1995 г. зафиксировано падение объема дегазации (4.52 млн м³/год), но в 1996–2002 гг. отмечено значительное его увеличение. В данный период объем собранного газа увеличился более чем в 2 раза с 7.61 до 16.03 млн м³/год. Далее наблюдался период спада, когда в 2003 г. объем дегазации снизился с 14.00 до 8.34 млн м³/год. Период 2005–2011 гг. являлся устойчивым, объем дегазации находился на уровне 8–11 млн м³/год. С 2012 по 2016 г. подземными системами собрано наибольшее количество метана. В 2012 г. объем дегазации составил более 14 млн м³/год, в 2016 г.

Отмечено наибольшее его значение за весь период наблюдения (более 22.5 млн м³/год). В 2016 г. зафиксирован пик выделения метана, объема вентилируемого метана и объема дегазации. Значительное увеличение уровня выделения метана наблюдается с 2007 г. по конец 2018 г., что согласуется с добычей угля из более глубоких пластов, в которых содержание метана выше, чем в пластах неглубокого залегания, где произошла естественная дегазация в геологическом прошлом. Дегазация должна оставаться на высоком уровне и стать основным методом обеспечения безопасности при угрозе выделения метана.

Наиболее значимо угрозу выделения метана характеризует его удельный уровень. Он отражает фактическую опасность, представляя объем выделенного метана на 1 т добытого угля. Удельный уровень выделения метана рассчитан на тот же период, что и период наблюдения за объемом добычи угля (1994–2018 гг.). В 1994–2006 гг. отмечалось устойчивое значение объема выделенного метана на 1 т добытого угля с небольшими колебаниями в диапазоне

10–18 м³/т (рис. 7). В 2007–2008 гг. удельный ежегодный уровень выделения метана увеличился до 24.61–28.46 м³/т. С 2007 по 2018 г. (кроме 2013 г.) средний годовой объем выделенного метана на 1 т добытого угля превышал 20 м³/т, а после 2015 г. — 30 м³/т. Наибольший удельный уровень выделения метана зафиксирован в 2016 г. (43.36 м³/т). В последующие годы можно ожидать увеличения уровня выделения метана в выработки в шахте “Мысловице-Весола”. Таким образом, если даже общий годовой объем добычи не увеличится, удельный уровень выделения метана будет расти с каждым годом и превысит 40 м³/т, как это было в 2018 г.

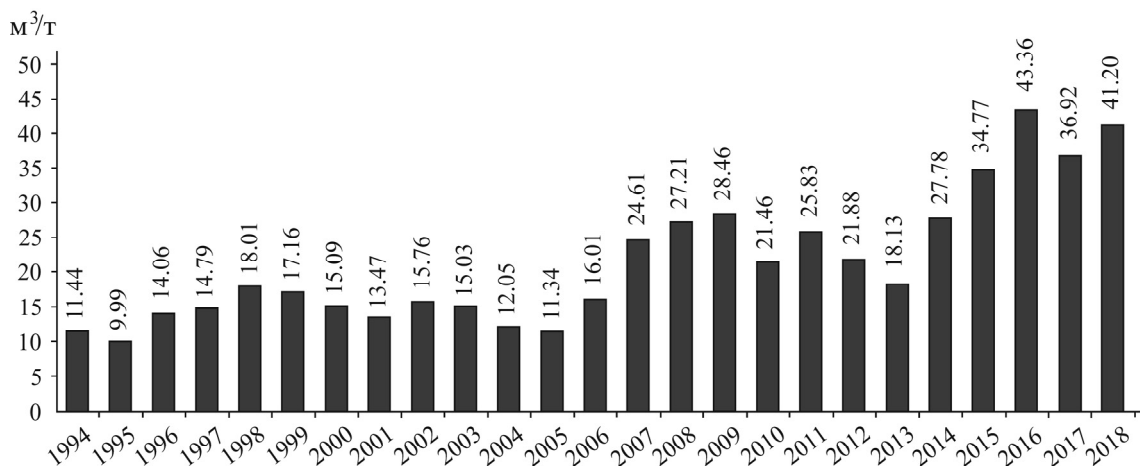


Рис. 7. Удельный уровень выделения метана за период наблюдения

ВЫВОДЫ

Шахта “Мысловице-Весола” характеризуется разнообразной геологической структурой и неоднородным распределением метана. Наибольшая его дислокация отмечается в области сброса Ксиаз, разделяющего месторождение на северную и южную части. Сброс Ксиаз является основным фактором формирования метаносодержащей структуры. Распределение содержания метана в угольных пластах по вертикали уменьшается в области, близкой к сбросу. Зоны концентрации метана возникают при увеличении глубины и удалении от области сброса. Пласты на глубине 800–1000 м от дневной поверхности в области сброса Ксиаз дегазированы естественным путем, поэтому на глубине нескольких сотен метров образована область естественной дегазации, в которой содержание метана не превышает 1 м³/т *daf*, а ниже образована метановая область, в которой наблюдается резкое увеличение содержания газа до значений более 8 м³/т *daf*. В 2006–2008 гг. уголь добывался на глубинах, превышающих 700–800 м, где отмечалась высокая концентрация метана, который выделялся в выработки из налегающих и подстилающих пород и из пустот. Данные природные и горнотехнические факторы стали причиной того, что уровень выделения метана увеличивался в 2006–2008 гг. и превысил 50 млн м³/год, а общий объем добычи угля уменьшился в 2 раза. Значительное снижение объема добычи угля зафиксировано в 2013 г., что согласуется с увеличением уровня выделения метана и началом разработки пластов с высоким содержанием метана.

Автор выражает благодарность сотрудникам Польской горнодобывающей группы и шахты “Мысловице-Весола”, в частности Станиславу Фигура и Конраду Коковски за их сотрудничество и сопровождение при сборе данных для исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dreger M.** Methane emission in selected hard-coal mines of the Upper Silesian Coal Basin in 1997–2016, *Geol., Geoph. and Environment*, 2019, Vol. 45, No. 2. — P. 121–132.
2. **Dreger M. and Kędzior S.** Methane emissions and demethanation of coal mines in the Upper Silesian Coal Basin between 1997 and 2016, *Environmental and Socio-economic Studies*, 2019, Vol. 7, No. 1. — P. 12–23.
3. **Report** 1995–2019 Annual Report, 1995–2019. Annual Report (for the years 1994–2018) on the state of basic natural and technical hazards in the hard coal mining industry, Gas hazard. Publ. GIG, Katowice.
4. **Eurostat** Consumption and production of hard coal, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200709-2>, available July 2020.
5. **State mining authority-state mining authority** in Katowice Statystyki Wypadków, available April 2020, http://www.wug.gov.pl/bhp/statystyki_wypadkow.
6. **Kędzior S. and Dreger M.** Methane occurrence, emissions and hazards in the Upper Silesian Coal Basin, Poland, *Int. J. Coal Geol.*, 2019, Vol. 211. — 103226.
7. **Ju Y., Sun Y., Sa Z., Pan J., Wang J., Hou Q., Li Q., Yan Z., and Liu J.** A new approach to estimate fugitive methane, 2016.
8. **PMG** – internal report – official geologic documentation, internal report prepared for Polish Mining Group purposes, did not publish.
9. **Kotas A.** Coalbed methane potential of the upper Silesian Coal Basin, Poland, *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, PIG*, Warszawa, 1994. — 142 p.
10. **Kędzior S.** Problem emisji i ujmowania metanu kopalnianego na przykładzie wybranych czynnych kopalń południowej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, *Górnictwo Odkrywkowe*, 2009, No. 2–3. — P. 79–83.
11. **Regulation** of the ministry of the environment — Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. Na podstawie art. 118 ust. 4 ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. — *Prawo geologiczne i górnicze* (Dz. U. Nr 163, poz. 981 oraz z 2013 r. poz. 21).
12. **Regulation** of the ministry of the energy — Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych Na podstawie art. 120 ust. 1 ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. — *Prawo geologiczne i górnicze* (Dz. U. z 2016 r. poz. 1131 i 1991 oraz z 2017 r. poz. 60, 202 i 1089).
13. **Gawlik L. and Grzybek I.** Methane emission evaluation from the Polish coal basins (hard coal mining). In: *Studia Rozprawy Monografie*, 2002, Vol. 106. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Krakow, PL ISSN 0860-74-19.
14. **Doktorowicz-Hrebicki S. and Bocheński T.** Podstawy i niektóre wyniki parelizacji pokładów węgla w Zagłębiu Górnośląskim, *Geol. Biul. Inform.*, 1952, Vol. 1. — P. 13–14.
15. **Gabzdyl W. and Gorol M.** Geology and mineral resources in the Upper Silesia region and adjacent areas, *Geologia i bogactwa mineralne Górnego Śląska i obszarów przyległych*, Publ. of Silesian University of Sci. and Technol., Gliwice, 2008.
16. **Karacan C. Ö., Diamond W. P., and Schatzel S. J.** Numerical analysis of the influence of in-seam horizontal methane drainage boreholes on longwall face emission rates, *Int. J. Coal Geol.*, 2007, Vol. 72. — P. 15–32.
17. **Tan B., Liu H., Xu B., and Wan T.** Comparative study of the explosion pressure characteristics of micro- and nano-sized coal dust and methane–coal dust mixtures in a pipe, *Int. J. Coal Sci. Technol.*, 2020, Vol. 7, No. 1. — P. 68–78.

18. **Ghosh A., Patra P. K., Ishijima K., Umezawa T., Ito A., Etheridge D. M., Sugawara S., Kawamura K., Miller J. B., Dlugokencky E. J., Krummel P. B., Fraser P. J., Steele L. P., Langenfelds R. L., Trudinger C. M., White J. W. C., Vaughn B., Saeki T., Aoki S., and Nakazawa T.** Variations in global methane sources and sinks during 1910–2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, Vol. 15, No. 5. — P. 2595–2612.
19. **Holgerson M. A. and Raymond P. A.** Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nat. Geosci.*, 2016, No. 9. — P. 222–226.
20. **Gerber P. J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falucci A., and Tempio G.** Tackling climate changer through livestock — A global assessment of emissions and mitigation opportunities, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2013.
21. **EU Emissions** trading system, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en, available March 2020.
22. **EEX Primary** auction, <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction>, available March – April 2020.
23. **Hunt J. M.** Petroleum geochemistry and geology, *Geol. Magazine*, 1979, Vol. 117, No. 4.
24. **Cao Y., He D., and Glick D. C.** Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults, *Int. J. Coal Geol.*, 2001, Vol. 48. — P. 47–63.
25. **Ulery J.** Managing excess gas emissions associated with coal mine geologic features. In: Kissell F. (Ed.), *Handbook for Methane Control in Mining*, NIOSH, Pittsburgh, PA. Information Circular No. 9486, 2006.
26. **Karacan C. Ö., Ulery J. P., and Goodman G. V. R.** A numerical evaluation on the effects of impermeable faults on degasification efficiency and methane emissions during underground coal mining, *Int. J. Coal Geol.*, 2008, Vol. 75. — P. 195–203.
27. **Karacan C. Ö., Ruiz F. A., Cotè M., and Phipps S.** Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction, *Int. J. Coal Geol.*, 2011, Vol. 86. — P. 121–156.
28. **Kędzior S.** Distribution of methane contents and coal rank in the profiles of deep boreholes in the Upper Silesian Coal Basin, Poland, *Int. J. Coal Geol.*, 2019, Vol. 202. — P. 190–208.
29. **Kowalski A., Kotarba M., and Semyrka G.** Model i bilans generowania gazów z pokładów węgla utworów górnego karbonu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. W: *Opracowanie modeli oraz bilansu generowania i akumulacji gazów w serii węglonośnej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, R. Ney, M. Kotarba (red), Centrum PPGSMiE PAN, Kraków, 1995. — P. 99–113.
30. **Krause E.** Factors forming increase of methane hazard in longwalls of high output concentration, *Prz. Górn.*, 2005, Vol. 61. — P. 19–26.
31. **Koptoń H.** Metoda prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego (Method of prognosing absolute methane content in dog heading driven with heading machine in coal mines), *Prace naukowe GIG Górnictwo i Środowisko*, 2009.
32. **Krause E. and Smoliński A.** Analysis and assessment of parameters sharpening methane hazard in longwall areas, *J. Sust. Min.*, 2013, Vol. 12. — P. 13–19.
33. **Turek M.** Techniczna i organizacyjna restrukturyzacja kopalń węgla kamiennego, Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 2007.
34. **Duda A. and Krzemień A.** Forecast of methane emission from closed underground coal mines exploited by longwall mining — a case study of Anna coal mine, *J. Sust. Min.*, 2018, Vol. 17. — P. 184–194.
35. **Jureczka J., Strzezińska K., Krieger W., Kwarciański J., Kielbik W., Ługiewicz-Mołas I., Rolka M., and Formowicz R.** Dokumentacja geologiczna otworów badawczych Wesoła PIG 1 oraz Wesoła PIG — 2H intersekcyjnie połączonych. Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski im. St. Doktorowicza — Hrebnińskiego, Sosnowiec, 2015.

36. **Wu C., Yuan C., Lei H., and Liu H.** A dynamic evaluation technique for assessing gas output from coal seams during commingling production within a coalbed methane well: a case study from the Qinshui Basin, *Int. J. Coal Sci. Technol.*, 2020, Vol. 7, No. 1. — P. 122–132.
37. <https://www.pgi.gov.pl/gaz-lupkowy/658-pig-pib/nowosci-pig-calosc/9310-sukces-w-gilowicach.html>.
38. **McCulloch C. M., Diamond W. P., Bench B. M., and Deul M.** Selected geologic factors affecting mining of the Pittsburgh Coalbed, Report of Investigations No. 8093, US Dept. of Interior, US Bureau of Mines, Pittsburgh, PA, 1975.
39. **Słoczyński T. and Drozd A.** Methane potential of the Upper Silesian Coal Basin carboniferous strata — 4D petroleum system modeling results, *Nafta – Gaz*, 2018, No. 10. — P. 703–714.
40. **Kędzior S., Kotarba M. J., and Pekała Z.** Geology, spatial distribution of methane content and origin of coalbed gases in Upper Carboniferous (Upper Mississippian and Pennsylvanian) strata in the south-eastern part of the Upper Silesia Coal Basin, Poland, *Int. J. Coal Geol.*, 2013, Vol. 105. — P. 24–35.

Поступила в редакцию 07/IX 2020

После доработки 18/V 2021

Принята к публикации 24/V 2021