

## ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.272: 516.02

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ШАХТНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГА САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЯ НА ШАХТЕ “ОЛЬЖЕРАССКАЯ-НОВАЯ”

**Ли Хи Ун, С. В. Черданцев, В. Б. Попов,  
П. А. Шлапаков, А. Ю. Ерастов**

*Научный центр ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности,  
E-mail: leeanatoly@mail.ru  
ул. Институтская, 3, г. Кемерово, 650002, Россия*

Рассмотрены геофизические методы диагностирования очагов самонагревания в выработанных пространствах на пологих и наклонных пластах угля шахт Кузбасса. Подробно обсужден метод экваториально-дипольного электропросвечивания, с помощью которого определена температура угольного скопления в очаге самонагревания на шахте “Ольжерасская-Новая”. Найдено время остывания породно-угольного скопления до температуры окружающего массива и предложены мероприятия по ликвидации очага самонагревания.

*Угольные пласты, горные выработки, выработанное пространство, очаги самонагревания угля, эндогенные пожары, газоаналитический метод, шахтная электроразведка, метод экваториально-дипольного электропросвечивания, интерпретационный критерий*

Экономическая ситуация, сложившаяся в последние годы в России, обусловила эффективный экспорт энергоресурсов при ослабленной внутренней валюте. В этой связи большинство предприятий угольной промышленности переориентировались на наращивание производственных объемов.

Повышение технико-экономических показателей с внедрением высокопроизводительного механизированного оборудования и совершенствованием технологии ведения горных работ привело к увеличению выемочных полей и глубины отработки пластов. Это вызвало рост горного давления, повышение метаноносности пластов, увеличение динамических явлений и значительно повысило эндогенную пожароопасность.

Эндогенная пожароопасность, обусловленная склонностью угля к самовозгоранию при различных технологических схемах ведения очистных работ, наличием геологических нарушений и концентрированных потерь разрыхленного угля, не одинакова. Так, в одних случаях наблюдается безаварийная отработка выемочных участков, в других — возникают очаги самовозгорания угля, переходящие в эндогенные пожары [1]. Для эффективной борьбы с самовозгоранием необходимы не только дополнительные исследования по выявлению причин возникновения очагов эндогенных пожаров, но и разработка новых способов их обнаружения и контроля состояния угольных пластов.

## МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ НАГРЕВАНИЯ И САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

К настоящему времени на шахтах широко используется газоаналитический метод [2], основанный на анализе в лабораторных условиях проб воздуха, отобранных в контрольных точках либо непосредственно в шахтных условиях путем замеров воздуха с помощью переносных или стационарных приборов как эпизодического, так и непрерывного действия. Однако этот метод не позволяет однозначно судить о состоянии очага самовозгорания. Так, колебания концентраций индикаторных газов в выработанном пространстве выемочного участка под влиянием различных естественных факторов, без повышения температуры угля, могут быть ошибочно идентифицированы как ранняя стадия самонагрева. И наоборот, эндогенный пожар может быть обнаружен только на стадии пламенного горения из-за разбавления концентраций пожарных газов утечками воздуха. Более того, в ходе лабораторных исследований установлено, что эндогенный пожар на контролируемом участке может быть ошибочно воспринят как “самонагревание угля” по повышенному выделению оксида углерода при фактическом тлении угля [3].

Еще один метод обнаружения ранних стадий самонагрева и самовозгорания угля, получивший широкое распространение на шахтах, основан на оценке активности радона в рудничном воздухе [4]. Отбор проб на содержание радона проводится в одних и тех же точках одновременно с отбором фоновых проб для определения индикаторных газов. Образующийся в процессе полураспада радия-226 радон-222 выносится из объема угля и вмещающих пород в воздушный поток выработок за счет диффузионно-фильтрационных процессов массопереноса. Нагревание угля вызывает резкое увеличение доли радона, поступающего в вентиляционную сеть шахты. Рост выделения радона приурочен к началу процесса выпаривания влаги из угля на стадии его самонагрева [5]. Образующийся пар подхватывает молекулы радона и выносит их из микротрещин. Движение пара способствует также разрушению минералов, образованию новых поверхностей и каналов, связывающих трещины, что облегчает выход радона в рудничную атмосферу. В отличие от влаги радон переносится конвективными потоками воздуха на большие расстояния, достигая горных выработок и земной поверхности [6]. В результате проведения газовых съемок для определения плотности радоновых потоков в приповерхностном слое выделяются области с повышенным (относительно фоновых значений) содержанием радона.

Однако приповерхностные газовые съемки показывают, что возможны случаи отклонения газовых аномалий относительно вертикальной проекции подземного очага. Кроме того, под действием горизонтальных перепадов давления воздуха в шахте, обусловленных работой вентиляторной установки, газовая аномалия в почве становится вытянутой и происходит ее смещение относительно вертикальной проекции очага [7]. Существенным недостатком данного метода является невозможность его применения в зимних условиях при промерзании грунта более 0.5 м [8].

В настоящее время разработан и применяется на практике способ обнаружения и локализации эндогенных пожаров в выработанных пространствах с помощью шахтной электроразведки [9], позволяющий установить не только местоположение очага возгорания, но и температуру породно-угольного массива в очаге. Это, в свою очередь, дает возможность достоверно определить параметры данного очага и сроки его ликвидации.

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОЧАГОВ НАГРЕВАНИЯ УГЛЯ МЕТОДОМ ЭКВАТОРИАЛЬНО-ДИПОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРОСВЕЧИВАНИЯ

Рассмотрим один из методов шахтной электроразведки — экваториально-дипольное электропросвечивание (ЭДЭП), который, на наш взгляд, представляется наиболее эффективным способом обнаружения очагов самонагрева.

Сущность метода заключается в том, что электрическое поле возбуждается с помощью генератора в одной выработке выемочного столба угольного пласта, а электрический сигнал регистрируется приемной аппаратурой в другой выработке этого же столба. Заземление генераторных и приемных электродов осуществляется в кровлю и почву выработки с одновременным перемещением их через фиксированные промежутки времени.

Ранее проведенными на шахтах Кузбасса исследованиями установлено, что участки породно-угольного массива вблизи очагов нагревания характеризуются скачкообразным изменением электрического сигнала  $\Delta U$ . Дальнейшие исследования показали, что зоны повышенной температуры угольного массива, вызванные процессами самонагревания и самовозгорания, имеют аномалии низкого давления и низкого  $\Delta U$ . Кроме того, область повышенной температуры выделяется и по повышенному  $\Delta U$ . Данный эффект обусловлен выпариванием влаги из микропор угля и горных пород, приводящим к росту электросопротивления, а значит, и к росту  $\Delta U$ .

Такое проявление сигнала позволило использовать его в качестве интерпретационного критерия для выявления областей самонагревания угля. Таким образом, при обработке данных, полученных в ходе шахтных геофизических исследований, зоны повышенной температуры породно-угольного массива характеризуются резким изменением регистрируемого электрического сигнала в виде локального скачка повышенного  $\Delta U$  вблизи участков пониженного  $\Delta U$  в исследуемом интервале.

Рассмотрим процедуру использования метода экваториально-дипольного электропросвечивания на примере обнаружения и ликвидации очага самонагревания, возникшего 22.10.2015 г. в выработанном пространстве выемочного участка лавы 21-1-9 пласта 21 шахты “Ольжерасская-Новая” в Кузбассе.

Отработка лавы 21-1-9 проводилась по почве пласта с выпуском подкровельной пачки. Протяженность выемочного столба 1660 м, длина лавы 200 м, глубина отработки 180–310 м. Уголь полублестящий, полосчатый, неяснополосчатый, слабой механической прочности, крепостью  $f=1-2$ , средней нарушенности. Угол по простиранию  $1-6^\circ$ , по падению  $5-10^\circ$ . Мощность пласта в теле лавы составляет 5.94–9.30 м, в среднем — 7.73 м.

Проветривание выемочного участка осуществлялось по возвратноточной схеме проветривания с отводом части метановоздушной струи по газодренажному штреку. В очистной забой воздух подавался по конвейерному штреку 21-1-9 в количестве 900 м<sup>3</sup>/мин, по газодренажному штреку отводилось 480 м<sup>3</sup>/мин, остальной воздух выдавался по вентиляционному штреку 21-1-9.

В ходе планового отбора проб воздуха 22.10.2015 г. в лаве 21-1-9 зафиксировано превышение содержания оксида углерода над фоновыми значениями. Ввиду того что на поверхности уже сформировался снежный покров, принято решение провести локацию очага самонагревания из подземных горных выработок.

Шахтные исследования методом ЭДЭП проводили в два этапа. На первом угольный целик между центральным путевым уклоном (ЦПУ) и лавой 21-1-9 “просвечивали” в горизонтальном направлении, для этого генератор устанавливали на ЦПУ и фиксировали сигнал приемной аппаратурой непосредственно по очистному забою через 10 м по линии 4–4’ (рис. 1).

На втором этапе указанный целик обследовали в вертикальном направлении, при этом генератор располагали на участке вентиляционного штрека 21-1-9, а приемник перемещали с регистрацией сигнала через каждые 10 м по вентиляционному штреку 21-1-11 вдоль линии 2–2’ (рис. 1).

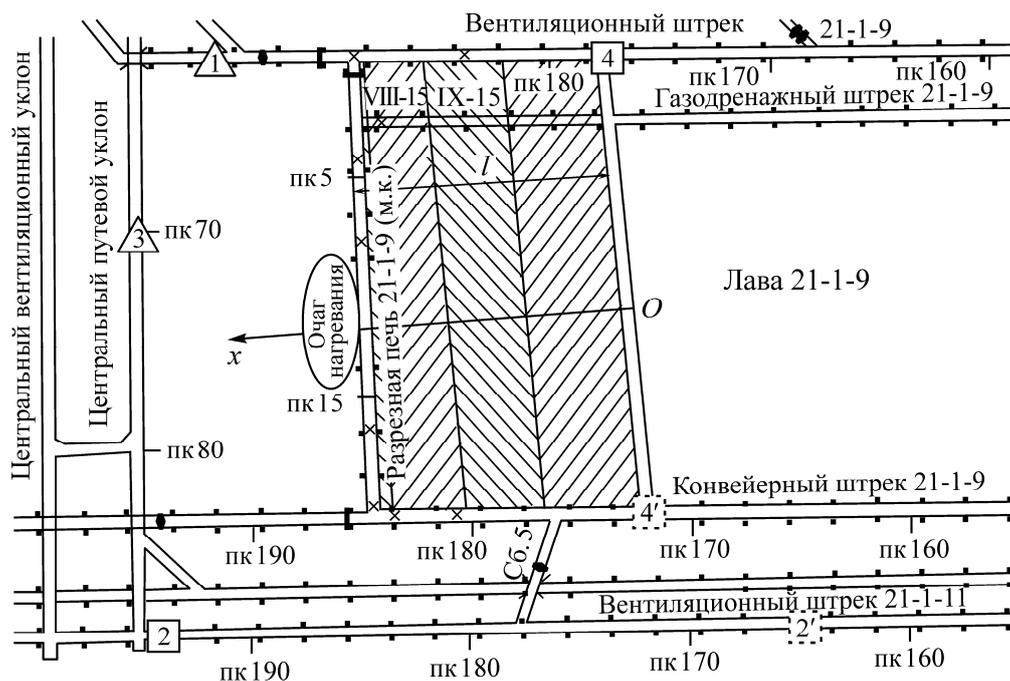


Рис. 1. План горных работ со схемой проведения геофизических исследований:  $\triangle 1$ ,  $\triangle 3$  — места установки генератора;  $\square 2$  —  $\square 2'$ ,  $\square 4$  —  $\square 4'$  — линии перемещения приемника; ПК — пикет

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ОСТЫВАНИЯ РАЗОГРЕТОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «ОЛЬЖЕРАССКАЯ-НОВАЯ»

По результатам обработки данных построены кривые изменения  $\Delta U$  по очистному забою лавы 21-1-9 (рис. 2а) и вентиляционному штреку 21-1-11 (рис. 2б).

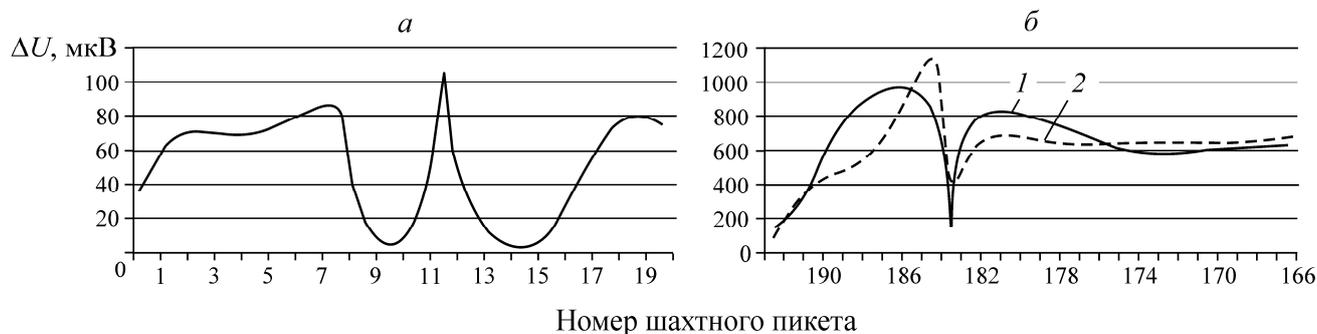


Рис. 2. Графики изменения  $\Delta U$  в процессе обнаружения очага нагревания: а — вдоль лавы 21-1-9 (замеры выполнялись по линии 4–4'); б — вдоль вентиляционного штрека 21-1-11: 1 — измерения по линии 2–2'; 2 — по линии 2'–2

На рис. 2 в районе пикетов 12 и 183 отчетливо выделяются области, характерные для нагретого породно-угольного массива. Так, из рис. 2а следует, что в интервалах ПК 8–9 и 12–15 отмечается резкое падение  $\Delta U$ , в то время как в интервале ПК 10–11 — резкое увеличение сигнала. Аналогично на рис. 2б в интервалах ПК 190–184 и 182–178 наблюдаются участки повышенного  $\Delta U$ , а в интервале ПК 184–182 — резкого падения  $\Delta U$ .

Зная  $\Delta U$  и величину  $\Delta U_{\text{фон}}$ , соответствующую фоновой температуре, найдем температуру  $t$  угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка 21-1-9 по формуле [2]

$$t = t_0 + \frac{N_1 Q \ln\left(\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{фон}}}\right)}{k \left[ N_2 C - N_3 \ln\left(\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{фон}}}\right) \right]}, \quad (1)$$

где  $t_0$  — температура вмещающих пород в естественном состоянии, °С;  $N_1 = 0.120 \div 0.140$ ,  $N_2 = 2(1 - P)/(2 + P)$ ,  $N_3 = 4.50 \div 4.55$  — константы, зависящие от электросопротивления среды, для условий Кузбасса;  $P = 0.3 \div 0.4$  — пористость породно-угольного скопления;  $C = 505$  — эмпирический коэффициент, зависящий от диэлектрических свойств угля;  $Q$  — ширина запрещенной зоны, представляющая собой энергетическое воздействие на электрон при переходе его из валентной зоны в зону проводимости. Для углей Кузбасса  $Q \approx 13 \cdot 10^{-19}$  Дж [10];  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана.

Подставляя эти данные в формулу (1), получим температуру угольного скопления в выработанном пространстве:

$$t = 14 + \frac{0.12 \cdot 13 \cdot 10^{-19} \ln(42)}{1.38 \cdot 10^{-23} [0.55 \cdot 505 - 4.53 \cdot \ln(42)]} \approx 176^\circ\text{C}.$$

Для определения времени остывания разогретого породно-угольного скопления сформулирована задача Дирихле для однородного и одномерного уравнения теплопроводности, принадлежащего параболическому типу

$$a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

с начальным условием

$$T|_{\tau=0} = \varphi(x) \quad (3)$$

и граничными условиями

$$T|_{x=0} = T_1, \quad T|_{x=l} = T_2. \quad (4)$$

Здесь  $a^2 = 10.79 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с — коэффициент температуропроводности;  $T$  — температура массива, К;  $x$  — декартова координата, направленная от монтажной камеры к очагу нагревания;  $l = 130$  м — расстояние между очагом нагревания и монтажной камерой, заполненной водой (см. рис 1);  $\tau$  — время.

Решение задачи Дирихле дается формулой [11]

$$T(x, t) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n T_2 - T_1}{n} \exp\left[-\left(\frac{n\pi\sqrt{a}}{l}\right)^2 \tau\right] \sin \frac{n\pi x}{l} + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{n\pi\sqrt{a}}{l}\right)^2 \tau\right] \sin \frac{n\pi x}{l} + \int_0^l \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx, \quad (5)$$

в которой  $T_1 = 283$  К — температура пород, окружающих монтажную камеру;  $T_2 = 294$  К — температура породно-угольного скопления в очаге нагревания после его ликвидации. Функция  $\varphi(x)$  представляет зависимость температуры в начальный момент времени от координаты  $x$ . Полагаем ее линейной:

$$\varphi(x) = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{x}{l}, \quad (6)$$

где  $T_0 = 453 \text{ К}$  — температура породно-угольного скопления в очаге нагревания в начальный момент времени.

Далее находим интеграл в выражении (5):

$$\int_0^l \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx = (-1)^n (T_0 - 2T_1) \frac{l}{n\pi} \quad (7)$$

и считаем, что при  $x = l/2$

$$T(l/2, \tau) = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (8)$$

Подставляя в правую часть формулы (5) интеграл (7), а в ее левую часть — формулу (8), получим трансцендентное уравнение

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^n (T_0 - T_2)}{n} - \frac{T_1 [2(-1)^n + 1]}{n} \right] \exp \left[ - \left( \frac{n\pi\sqrt{a}}{l} \right)^2 \tau \right] \sin \frac{n\pi}{2} = 0 \quad (9)$$

относительно времени  $\tau$ , решая которое находим искомое время остывания массива, равное  $\tau = 31$  сут.

На основании полученных данных инженерно-технической службой шахты “Ольжераская-Новая” принято решение о затоплении выявленного очага нагревания с поддержанием уровня затопления в течение 31 сут.

По истечении времени затопления и откачки воды из аварийного контура в ноябре 2015 г. проведены повторные геофизические исследования (рис. 3), которые показали, что участков с повышенными и пониженными значениями  $\Delta U$  не обнаружено. На всем протяжении участка графики непрерывны и не имеют скачков, а углы наклона касательных малы, что свидетельствует об отсутствии повышенной температуры. Следует отметить, что обследование по очистному забою 21-1-9 (линия 4–4' на рис. 1) после спуска воды не проводилось из-за отсутствия доступа к очистному забою вследствие изоляции аварийного участка.

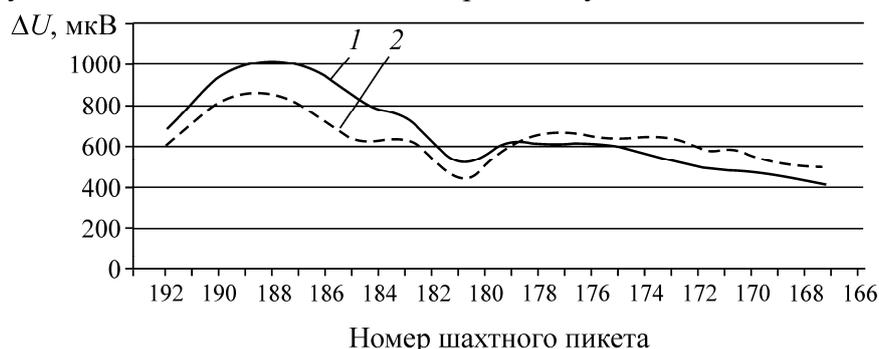


Рис. 3. Графики изменения  $\Delta U$ , построенные на основании полевых работ по вентиляционному штреку 21-1-11 после проведения противопожарных мероприятий: 1 — измерения по линии 2–2'; 2 — по линии 2'–2

Решением технического совета и на основании выполненных исследований и результатов анализа проб воздуха, отобранных на аварийном участке 12.02.2016 г., очаг самонагревания в лаве 21-1-9 списан в категорию ликвидированных. После восстановительных мероприятий лава работает в обычном режиме.

## ВЫВОДЫ

Выполнены шахтные геофизические измерения методом экваториально-дипольного электропросвечивания, на основании которых построены графики изменения электрического сигнала вдоль лавы и вентиляционного штрека, показывающие скачкообразные изменения электрического сигнала в зоне нагревания породно-угольного скопления и плавные изменения сигнала после проведения противопожарных мероприятий.

На базе полученных замеров электрических сигналов вычислена температура породно-угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка, которая составила 176 °С.

Сформулирована задача Дирихле для одномерного нестационарного уравнения теплопроводности и представлено ее решение, из которого получено трансцендентное уравнение, позволившее найти время, равное 31 сут, в течение которого породно-угольное скопление остывает до температуры окружающих пород.

На основании выполненных исследований составлены рекомендации, следуя которым лава 21-1-9 пласта 21 шахты “Ольжерасская-Новая” полностью восстановлена и работает в штатном режиме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрицкий В. А.** Механизм возникновения очагов самовозгорания угля в шахтах и способы их предотвращения. — Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2013. — 279 с.
2. **Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по предупреждению эндогенных пожаров и безопасному ведению горных работ на склонных к самовозгоранию пластах угля”. Сер. 05. Вып. 46. — М.: НТЦ ПБ, 2016. — 56 с.
3. **Игишев В. Г., Шлапаков П. А., Хаймин С. А., Син С. А.** Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-сти. — 2015. — № 4. — С. 55 – 59.
4. **Чубаров Б. В., Чижов О. В., Токарев О. С.** Современный способ обнаружения ранних стадий самонагревания и самовозгорания угля // Вестн. Науч. центра. — 2013. — № 1, 2. — С. 101 – 104.
5. **Branny M., Cygankiewicz J., Piotrowski A., Waclawik J.** A numerical simulation of low-temperature coal oxidation, Archives of Mining Sciences, 1997, Vol. 42, No. 4. — P. 504–514.
6. **Горбатов В. А., Игишев В. Г., Попов В. Б., Портола В. А., Син А. Ф.** Защита угольных шахт от самовозгорания угля. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. — 132 с.
7. **Портола В. А.** Обоснование и разработка способов обнаружения, локализации и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания угля в шахтах: дис. ... д-ра техн. наук. — Кемерово, 2002. — 317 с.
8. **РД 03-151-97.** Методические указания по обеспечению требований радиационной безопасности при добыче и переработке минерального сырья на предприятиях горнорудной и нерудной промышленности, отнесенных к радиационно опасным производствам. Утв. Приказом Госгортехнадзора России от 14 октября 1997 г., № 35.
9. **Пат. 2514017 РФ.** Способ оценки эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов / П. А. Шлапаков, А. Ю. Ерастов, С. В. Сороковых, А. М. Рыков. Электронный бюл. № 12 2014 г. Изобретения, полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
10. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1973. — 286 с.
11. **Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М.** Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высш. шк., 1970. — 712 с.