

## Исследование способа маркировки сильвинитового пласта, основанного на радиоактивном излучении, на калийных рудниках

Н.А. Князев ✉, Д.С. Кормщиков, А.И. Кузнецов, А.Р. Богданов

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

✉ [nikita-knja@mail.ru](mailto:nikita-knja@mail.ru)

**Резюме:** Актуальность. Условия добычи сильвинита на Верхнекамском месторождении солей характеризуются запылённой средой и интенсивной складчатостью пласта, что осложняет точность проведения горных выработок по пласту и повышает вероятность сверхнормативной прирезки вмещающих пород. Цели. Для повышения точности позиционирования проходческо-очистных комбайнов исследован способ маркировки сильвинитового пласта по его естественному радиоактивному излучению. Методы. Основной метод исследования основан на измерении содержания изотопа калия-40 в сильвините. Результаты. В работе представлен опыт маркировки сильвинитового пласта с помощью сцинтилляционного детектора. Выполнены лабораторные и натурные исследования детектора в условиях действующего рудника. Установлена зависимость между содержанием KCl и уровнем  $\gamma$ -излучения, что позволило определить границы продуктивных пластов и вмещающих пород. Выводы. Установлено, что маркировка сильвинитового пласта выбранным способом является эффективной и может внедряться в систему навигации проходческо-очистных комбайнов, что в комплексе позволит осуществлять контроль не только движения по заданным координатам, но и полноты выемки продуктивных пластов.

**Ключевые слова:** навигация горной техники, проходческо-очистной комбайн, калийное месторождение, радиоактивное излучение, сцинтилляционный детектор, полупроводниковый детектор, система контроля продуктивного пласта, натурные исследования

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124031800058-4).

**Для цитирования:** Князев Н.А., Кормщиков Д.С., Кузнецов А.И., Богданов А.Р. Исследование способа маркировки сильвинитового пласта, основанного на радиоактивном излучении, на калийных рудниках. *Горная промышленность*. 2026;(2):192–199. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-192-199>

## Research into a method of marking silvinitic seams in potash mines using radioactive emissions

N.A. Knyazev ✉, D.S. Kormshchikov, A.I. Kuznetsov, A.R. Bogdanov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

✉ [nikita-knja@mail.ru](mailto:nikita-knja@mail.ru)

**Abstract:** Relevance. Conditions of sylvite mining at the Verkhnekamskoye salt deposit are characterized with a dusty environment and pronounced folding of the seams, which makes accurate mining operations within the seam boundaries difficult thus increasing the chances of excessive dilution with the host rock. Objectives: A method of marking the sylvinitic seam using its natural radioactive emissions was investigated to improve positioning accuracy of the continuous miners. Methods. The main research method is based on measuring the potassium-40 isotope content in sylvinitic. Results. The paper discusses the experience of marking the sylvinitic layer using a scintillation detector. Laboratory and full-scale testing of the detector was carried out in conditions of an operating mine. A relationship between the KCl content and the level of  $\gamma$ -radiation was established, which made it possible to determine the boundaries of productive seams and host rocks. Conclusions. It was established that marking the sylvinitic layer using the selected method proved to be efficient and can be introduced into the navigation system of continuous miners, which, in combination, will help not only to control progressing along the specified coordinates, but also to ensure complete extraction of the productive seams.

**Keywords:** navigation of mining equipment, continuous miner, potash deposit, radioactive emissions, scintillation detector, semiconductor detector, monitoring system for producing seam, full-scale testing

**Acknowledgements:** This research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within a state assignment (reg. number NIOKTR 124031800058-4).

**For citation:** Knyazev N.A., Kormshchikov D.S., Kuznetsov A.I., Bogdanov A.R. Research into a method of marking silvinit seams in potash mines using radioactive emissions. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):192–199. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-192-199>

## Введение

Добыча калийно-магниевых солей на территории Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) основана на применении проходческо-очистных комбайновых комплексов при камерной системе разработки. При работе комплексов формируются междукамерные целики, необходимые для сохранения водозащитной толщи пород, отделяющей водоносные горизонты от выработанного пространства. При этом калийная залежь месторождения состоит из серии продуктивных пластов, разделенных каменной солью, прирезка которой сводится к допустимому минимуму. Поэтому повышение точности работы и производительности комбайновых комплексов, выполняющих очистные и подготовительные работы, является одной из приоритетных задач для предприятий, осуществляющих разработку ВКМС [1; 2].

Во время работы исполнительного органа комбайна в тупиковой выработке формируется высокая концентрация пыли в воздушной среде [3; 4]. Вследствие этого машинисты вынуждены регулярно прерывать работу для обеспечения возможности визуального контроля положения продуктивного пласта после снижения уровня запыленности. Подобные остановки приводят к простоям оборудования и, как следствие, снижению потенциальной производительности комбайновых комплексов [5; 6].

Кроме запыленной среды, наличие складчатости пластов, слагающих месторождение, является дополнительным фактором, усложняющим процесс добычи. Несмотря на то что маркшейдерская служба задает направление для движения комбайна из подготовительной выработки [5], непосредственный контроль за траекторией комбайна при движении по пласту залегания полезного ископаемого осуществляет машинист. В условиях интенсивной складчатости пласта и ограниченной видимости машинист может с недостаточной точностью направить комбайн по продуктивному пласту, увеличив при этом прирезку каменной соли с почвы или кровли пласта, что негативно скажется на качестве добываемой горной массы [7].

Также стоит отметить, что месторождения калийно-магниевых солей характеризуются полихромностью [8], из-за чего в составе продуктивных пород ВКМС встречается несколько разновидностей сильвинита, таких как пестрый, полосчатый и красный. Данные разновидности сильвинита характеризуются яркой окраской и подвергаются визуальному разделению от каменной соли. Однако на территории Саратовской области выделяются Восточный и Западный участки Перелюбского месторождения калийно-магниевых солей, где некоторые части залежей полезных ископаемых имеют светлую окраску, совпадающую окраской каменной соли. Уникальные геологические условия данных месторождений, разработка которых может начаться в ближайшие годы, способны создавать эксплуатационные трудности при визуальном ориентировании добычных комплексов с учетом отсутствия визуальных границ между вмещающими и продуктивными пластами. Безусловно, процесс направления проходческо-очистных комбайнов по

продуктивным пластам не может всегда основываться на человеческом факторе и работать только в определенных горно-геологических условиях.

Вследствие чего возникает востребованность исследований автоматических способов маркировки продуктивных пластов с учетом возможности их внедрения в конструкции комбайнов. Это необходимо для развития системы автоматического контроля направления движения комбайновых комплексов по продуктивным пластам в сочетании с системой навигации [5; 9; 10]. Основой работы является исследование способа измерения ионизирующего излучения горных пород с целью маркировки пласта и возможности его внедрения в систему навигации комбайновых комплексов.

## Выбор способа измерения $\gamma$ -излучения и конструкции прибора

Сильвинитовые породы представляют собой смесь галита NaCl и сильвина KCl. Из-за высокого содержания калия сильвинит характеризуется повышенным уровнем радиоактивности вследствие того, что природный калий состоит из смеси трех изотопов – стабильных  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  и радиоактивного  $^{40}\text{K}$  [11–13]. Содержание  $^{40}\text{K}$  в различных пропластках неодинаково, что теоретически позволяет выделять области его концентрации в массиве горных пород и, соответственно, уточнять границы продуктивных пластов сильвинита [14]. Реализовать данное решение можно с помощью приборов для измерения ионизирующего излучения, которые рассмотрены в работе Л.С. Горна и Б.И. Хазанова [15]. Один из таких приборов – сцинтилляционный детектор. Он демонстрирует ряд существенных преимуществ по сравнению с альтернативными приборами, такими как газоразрядные счетчики (например, счетчики Гейгера-Мюллера), полупроводниковые детекторы и ионизационные камеры.

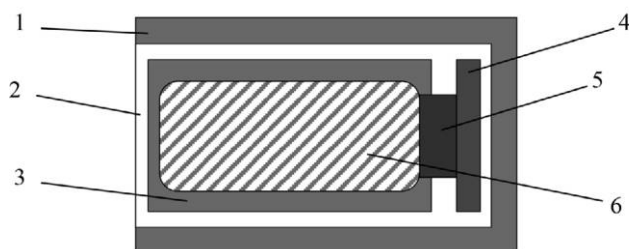
В отличие от сцинтилляционных детекторов газоразрядные счётчики демонстрируют более низкую эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов, хотя и обладают более простой конструкцией и сниженной стоимостью [16]. Полупроводниковые детекторы, такие как германиевые или кремниевые, обеспечивают высокое энергетическое разрешение при регистрации  $\gamma$ -излучения [17], позволяющее точно идентифицировать изотопы и определять энергию излучения. Однако они требуют глубокого охлаждения для снижения тепловых шумов [18], что значительно усложняет и удорожает их эксплуатацию в условиях работы комбайновых комплексов. Кроме того, ток, создаваемый ионизирующей частицей в полупроводниковых детекторах, настолько мал, что для его регистрации необходимы электронные усилители с большими коэффициентами усиления, что приведет к увеличению габаритных размеров устройства [17]. Ионизационные камеры, в свою очередь, обладают высокой точностью измерений, но имеют низкую чувствительность и требуют использования сложных и дорогостоящих электронных схем для усиления сигнала [17].

Основным достоинством сцинтилляционных детекторов

является их высокая производительность в регистрации различных типов излучения, включая  $\gamma$ -кванты,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы [19]. Также следует отметить их высокую временную разрешающую способность, которая позволяет фиксировать кратковременные импульсы излучения [16; 17; 20; 21]. В результате сцинтилляционные детекторы обеспечивают баланс между эффективностью, универсальностью и экономической составляющей, избегая вышеперечисленных недостатков, что делает их предпочтительным выбором для использования в условиях подземной добычи.

Исходя из этого система измерения ионизирующего излучения может состоять из группы сцинтилляционных детекторов, размещенных в определенном порядке в конструкции щита проходческо-очистного комбайна. Главным элементом данной системы является сцинтилляционный кристалл NaI(Tl), установленный в пластиковый корпус и закрытый специальной лентой для минимизации потерь фотонов. Поверх кристалла устанавливается микросхема, которая содержит фотодетектор, преобразующий ионизирующие частицы в световые импульсы длиной волны 400 нм, фотоумножитель, усиливающий их в 106 раз, и электронная система для регистрации [22], как показано на рис. 1. Также для обеспечения направленного приёма  $\gamma$ -квантов детектор оснащается свинцовой защитой по всему периметру, кроме принимающей плоскости.

Результаты измерений, полученные с помощью детектора, выражаются в единицах СРМ (counts per minute, импульсов в минуту), представляющих собой количество зарегистрированных «квантов» ионизирующего излучения в единицу времени. Увеличение значения СРМ прямо коррелирует с повышением уровня радиационного фона. Предполагается, что увеличение количества  $\gamma$ -квантов, эмитируемых с бортов горных выработок в рамках исследования, будет свидетельствовать об повышении концентрации хлорида калия KCl и уменьшении содержания каменной соли NaCl.



**Рис. 1**  
Принципиальная схема сцинтилляционного детектора:  
1 – свинцовый экран;  
2 – пластиковый корпус;  
3 – отражающая изоляционная лента; 4 – плата электроники;  
5 – фотоумножитель;  
6 – сцинтилляционный кристалл-детектор

**Fig. 1**  
A schematic diagram of the scintillation detector:  
1 - lead shielding;  
2 – plastic housing;  
3 – reflective insulating tape;  
4 – circuit board;  
5 – photomultiplier detector;  
6 – scintillation crystal detector

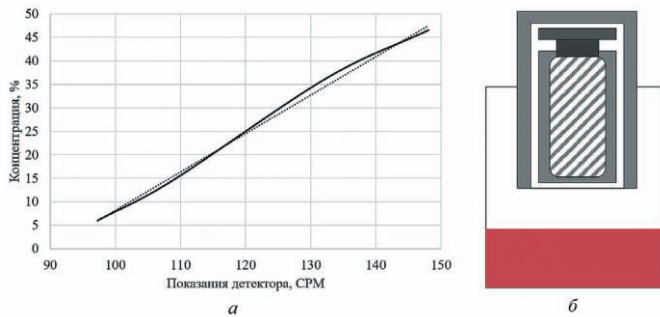
**Лабораторные исследования сцинтилляционного детектора**

Для верификации сцинтилляционного детектора выполнены лабораторные замеры  $\gamma$ -излучения от измельчённой сильвинитовой породы из керна, добытого в ходе геологоразведочных работ на ВКМС. Концентрации сильвина в исследуемых образцах определены предварительно. Измерения проведены на образцах породы с различной концентрацией хлорида калия, что позволило оценить эффективность детектора и зависимость показаний от качества полезного ископаемого. Перед началом измерений проведён замер радиационного фона в помещении без непосредственного контакта с образцами породы. Полученные данные о естественном фоновом излучении использованы при дальнейшей интерпретации результатов, что позволило учесть влияние внешних источников радиации на показания датчика. Время замера в 20 с выбрано исходя из линейных размеров детектора с учетом свинцовой за-

**Таблица 1**  
Показания замеров образцов сильвинита

**Table 1**  
Measurement readings of sylvinite samples

№ замера	Время замера, с	Фон в помещении, СРМ	Образец №1, СРМ	Образец №2, СРМ	Образец №3, СРМ	Образец №4, СРМ
1	20	103	98	134	135	156
2	20	95	102	111	128	144
3	20	98	90	94	134	157
4	20	104	106	118	136	162
5	20	75	86	118	133	151
6	20	81	92	98	135	141
7	20	81	108	114	132	155
8	20	84	87	93	140	155
9	20	82	94	92	123	147
10	20	91	107	92	136	150
11	20	97	93	115	134	150
12	20	90	94	110	130	141
13	20	83	106	119	137	142
14	20	91	99	123	130	139
15	20	85	105	97	136	144
16	20	75	85	106	149	150
17	20	81	103	128	119	148
18	20	84	101	92	115	135
19	20	99	95	105	129	147
20	20	84	95	113	136	149
<b>Ср. знач.</b>		<b>88,15</b>	<b>97,3</b>	<b>108,6</b>	<b>132,35</b>	<b>148,15</b>
<b>Концентрация KCl, %</b>			<b>6,10</b>	<b>14,40</b>	<b>36,23</b>	<b>46,53</b>



**Рис. 2**  
**Лабораторные исследования:**  
а – зависимость показаний прототипа датчика  $\gamma$ -излучения от концентрации;  
б – схематическое изображение лабораторного замера образца сивлинитовой породы

**Fig. 2**  
**Laboratory tests:**  
а – dependence of the prototype  $\gamma$ -radiation sensor readings on concentration;  
б – a schematic representation of laboratory measurements of a sylvinite rock sample

щиты и средней скорости движения комбайна «Урал-20Р» при добыче таким образом, чтобы комбайн за время одного замера проходил расстояние, равное диаметру детектора для обеспечения равномерности приема импульсов. В табл. 1 представлены результаты лабораторных исследований образцов.

Замеры проводились в следующем порядке: в тару, предназначенную для анализа, помещалось 0,5 кг измельченной сивлинитовой породы с различным содержанием хлорида калия и каменной соли, которая подвергалась тщательному уплотнению для обеспечения однородности. Над уплотненными образцами устанавливался прототип датчика  $\gamma$ -излучения. Также учитывалось расстояние между датчиком и поверхностью образцов породы с целью воссоздания условий эксплуатации оборудования на щите проходческого комбайна, где реализовать контакт детектора с породой не представляется возможным. Схематичное изображение лабораторного замера представлено на рис. 2, б.

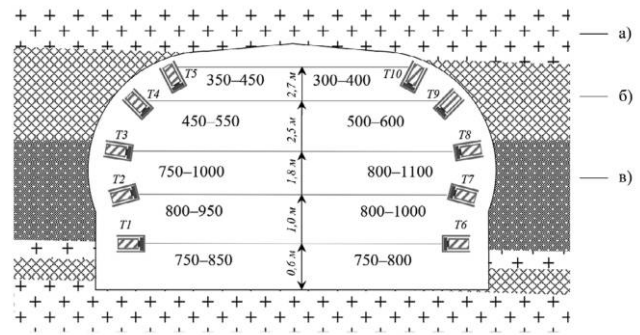
По результатам исследований было установлено, что естественный радиационный фон в помещении составляет 88,15 СРМ при проведении 20 замеров, что составило не менее 60% от показаний детектора. Данный фактор необходимо учитывать при выполнении испытаний детектора в подземных условиях.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что зависимость между процентным содержанием полезного компонента КСI и объемом  $\gamma$  излучения изотопа  $^{40}\text{K}$  – линейная (рис. 2, а), что также подтверждается работой [23]. В лабораторных условиях была подтверждена возможность использования датчика  $\gamma$  излучения для определения уровня концентраций КСI по высоте бортов выработки в зоне проведения очистных работ, что потенциально позволит выделять границы продуктивных пластов. Также данная информация может использоваться для оперативной оценки качества добываемой руды.

#### Натурные исследования сцинтилляционного детектора

Проверка работоспособности сцинтилляционного детектора в условиях действующего рудника проведена на одном из предприятий, разрабатывающих ВКМС. Исследования выполнены в два этапа: предварительный и основной.

**1. Предварительный этап.** Целью проведения предварительных испытаний являлась оценка работы детектора в различных подземных условиях: изменяющееся рассто-



**Рис. 3**  
**Схема размещения датчика и пример результатов измерений:**  
а – каменная соль;  
б – карналлитовая порода;  
в – сивлинитовая порода

**Fig. 3**  
**Sensor positioning diagram and an example of measurement results:**  
а – rock salt;  
б – carnallite rock;  
в – sylvinitite rock

яние между датчиком и бортами выработок, величина радиационного фона в различных участках рудника, а также эффективность свинцового экрана. Измерения выполнены в различных по назначению выработках с временем экспозиции в 20 с в различных конфигурациях: с наличием и отсутствием свинцового экрана и при различных расстояниях от датчика до исследуемой поверхности:

- в непосредственной близости от поверхности выработки;
- на расстоянии 0,3 м от поверхности выработки;
- в центре поперечного сечения.

Выбор промежуточного расстояния обусловлен конструктивными особенностями щита комбайна: расстояние от металлической кромки до стенки камеры составляет 0,3 м. Для возможности эксплуатации на комбайне датчик должен находиться в пределах обозначенного контура.

По итогам предварительных испытаний сформированы следующие выводы:

- применение детектора для маркирования пласта в выбранной локальной зоне невозможно без ограничения области приема  $\gamma$  излучения за счет свинцового экрана, так как при его отсутствии  $\gamma$ -кванты регистрируются со всех поверхностей выработки в зоне действия детектора, что приводит к усредненному значению СРМ (около 600 ед.) за время экспозиции и препятствует определению границ продуктивного пласта на основе измерений в локальных областях;
- детектор может работать бесконтактно: результаты замеров на расстоянии 0,3 м от стенки камеры сопоставимы с измерениями вплотную, при этом погрешность не превышает 10%;
- выбранного времени экспозиции достаточно для фиксации устойчивого уровня  $\gamma$  излучения в измеряемой области, при этом комбайн пройдет 0,13 м из расчета скорости в 0,4 м/мин, что позволяет обследовать поверхность выработки равномерно, без образования неисследованных областей.

**2. Основной этап.** Испытания направлены на оценку возможности маркирования продуктивного пласта при размещении комплекта детекторов в конструкции комбайна. Для выполнения замеров выбраны двадцать смежных камер, пройденных по пласту АБ проходческим комбайном «Урал 20Р», каждая из которых имеет длину от 240 до 250 м. Измерения проведены в сечениях через каждые 40 м в точках, указанных на схеме размещения датчика (рис. 3).

Таблица 2  
Результаты замеров при испытании сцинтилляционного детектора для одной камеры

Table 2  
Measurement results when testing a scintillation detector for a single stope

N <sub>кам</sub>	L	H <sub>почвы</sub>	H <sub>кровли</sub>	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
34	10	-126,4	-123,22	395	556	859	1009	1000	434	419	701	955	978
34	50	-126,1	-122,92	700	825	867	600	425	705	938	926	887	777
34	90	-125,5	-122,32	874	921	977	850	766	843	940	881	838	777
34	130	-125,3	-122,12	842	876	788	491	396	794	878	773	571	459
34	170	-126,6	-123,42	829	845	709	384	358	802	851	771	438	363
34	210	-126,5	-123,32	856	913	892	785	713	829	957	910	830	752

При проведении измерений использовалось следующее оборудование: прототип датчика ПД-1, лазерный дальномер и геодезическая мерная лента. Лазерная рулетка и мерная лента применялись для обеспечения точного позиционирования датчика. Количество измерений и оптимальная высота установки датчика над почвой определялись эмпирическим путем в ходе предварительных экспериментов.

В табл. 2 представлены результаты замеров в нескольких сечениях одной камеры, где

L – расстояние от выемочного штрека до измерительного пикета; H<sub>почвы</sub> и H<sub>кровли</sub> – отметки почвы и кровли соответственно; T1-T10 – усредненные показания датчика после серии замеров в каждой точке.

По результатам натурных измерений установлено, что выбранный способ размещения и количество датчиков обеспечивают возможность контроля положения продуктивного пласта в режиме реального времени при работе комбайновых комплексов. Также установлено, что в выработках околоствольного двора, где отсутствует сильвинитовая порода, фиксируется минимальная частота сигналов, составляющая до 15 импульсов в минуту. В очистных камерах наблюдается значительное увеличение частоты импульсов в минуту, варьирующееся в диапазоне от 300 до 1100.

**Анализ результатов натурных исследований**

На основании проведенных исследований в очистных камерах определены граничные значения в единицах СРМ между продуктивными пластами и вмещающими породами, представленные в табл. 3. Для определения показаний СРМ, устанавливающих границы между пластами, в ходе натурных исследований более детально обследованы участки очистных камер с ярко выраженными визуальными границами между каменной солью и пластами сильви-

нитовой породы. В результате граничным значением стала величина в 400 СРМ. Указанная степень содержания хлорида калия в табл. 3 в зависимости от показаний детектора носит оценочный характер и основывается на результатах сравнения показаний детектора с геологическими пробами с мест проведения замеров. Вопрос определения качества руды в зависимости от показаний детектора представляется перспективным и требует отдельного исследования.

По выделенным граничным значениям в качестве примера построено одно из исследуемых поперечных сечений, представленное на рис. 4. По показаниям СРМ в точках T<sub>5</sub> и T<sub>10</sub> можно сделать вывод о направлении залегания и уровне подрубки комбайном пласта каменной соли Б-В. Также по показаниям детектора можно установить, что мощность пластов А и Б в правом борту выработки больше, чем в левом, исходя по разницы СРМ для точек на одной высотной отметке по обоим бортам камеры. Точки T<sub>10</sub> > T<sub>5</sub>, T<sub>9</sub> > T<sub>4</sub> при этом разницы в показаниях между точками T<sub>6</sub> и T<sub>1</sub> практически нет, поэтому можно заключить, что в разнице по мощности продуктивных пластов характерна для верхней части камеры, что видно из рис. 4. Подобный принцип сравнения показаний СРМ для датчиков на одной высоте может использоваться не только для контроля уровня подрубки пласта каменной соли, но и для определения ориентации продуктивных пластов в сечении камеры. Если группы датчиков на одной высоте фиксируют близкие значения – пласт залегает параллельно почве камеры, если с какой-либо стороны фиксируется увеличение СРМ в ограничивающих продуктивный пласт точках более чем 100 единиц – пласт меняет свою ориентацию в сторону борта с большим значением.

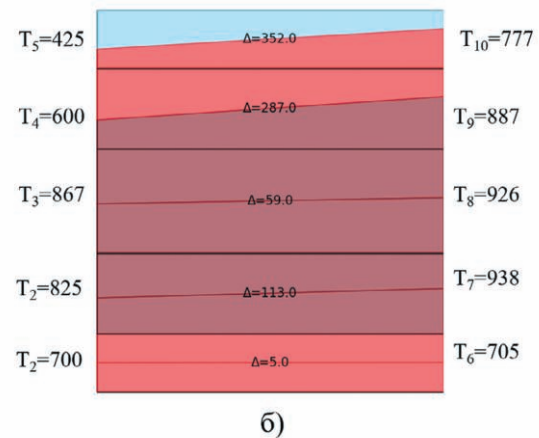
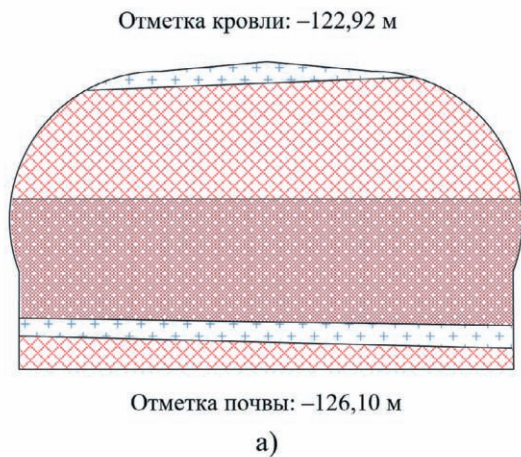
Также можно установить ориентацию продуктивных пластов А и Б и то, что в правой части сечения мощность пласта увеличивается, так как значения СРМ в точках T<sub>6-9</sub> превосходят значения в точках T<sub>1-4</sub>.

Подобная детальная съемка  $\gamma$ -излучения при движении комбайнового комплекса в очистной камере открывает возможность для разработки алгоритмов автоматической оценки углов залегания, мощностей и качественного состава продуктивных пластов калийных месторождений. По результатам сопоставления данных, полученных от детекторов, с результатами геологических съемок установлена высокая степень совпадения направлений залеганий и границ продуктивных пластов. При отсутствии явной границы между пластами в виде фиксации 400 СРМ с какой-либо стороны использовался метод интерполяции, который на основе данных о расстоянии между датчиками по высоте и показаний соседних датчиков позволил определить положение границы. Также при анализе ре-

Таблица 3  
Характеристика горных пород в зависимости от показаний детектора

Table 3  
Characteristics of rocks based on the detector readings

Показания детектора, СРМ	Тип горной породы
300–400	Каменная соль
400–450	Каменная соль с включением сильвинита
450–600	Сильвинит с низким содержанием KCl
600–800	Сильвинит со средним содержанием KCl
800–1200	Сильвинит с высоким содержанием KCl



**Рис. 4**  
Сравнение фактического и замеренного разреза продуктивного пласта:  
а – сечение, построенное геологической службой;  
б – оцифровка показаний детектора

**Fig. 4**  
Comparison of the actual and measured cross-section of the producing seam:  
а – cross-section prepared by the geological service;  
б – digitization of the detector readings



**Рис. 5**  
Сравнение показаний датчика с залеганием пласта

**Fig. 5**  
Comparison of the sensor readings with the actual seam position

зультатов исследований построены продольные разрезы очистных камер (рис. 5), по которым установлено, что погрешность в определении границ залегания продуктивного пласта по вертикали не превышает 25 см, или 7,8% от общей высоты хода комбайна при граничном значении СРМ, равном 400 импульсам.

В результате проведения натуральных исследований и анализа их результатов разработана схема размещения датчиков на щите комбайна, установлены зависимости между типами горных пород и показаниями детектора, определено граничное значение СРМ между продуктивными и вмещающими пластами, а также определена возможная погрешность измерений. Таким образом, подтверждена работоспособность концепции системы автоматического контроля направления движения комбайновых комплексов по продуктивным пластам, способной с достаточной точностью определять границы залегания пластов сильвинитовой породы непосредственно во время процесса добычи. Это позволит машинисту комбайна в режиме реального времени контролировать положение продуктивного пласта, уровень подрубки каменной соли, а также исключить затраты на визуальную ориентацию и снизить время простоя комбайнового комплекса.

## Заключение

В рамках исследования исходя из анализа литературы выбран способ измерения  $\gamma$ -излучения и разработана конструкция прибора для системы автоматической маркировки сильвинитового пласта на основе интенсивности излучения изотопа Калий-40 при работе проходческо-очистных комбайновых комплексов в условиях Верхнекамского месторождения солей.

По результатам лабораторных испытаний сцинтиляционного детектора подтверждена линейная зависимость между процентным содержанием полезного компонента KCl и объемом  $\gamma$ -излучения изотопа  $^{40}\text{K}$ . В ходе натурных исследований установлены зависимости между типами горных пород и показаниями детектора, подтверждены работоспособность системы детекторов при интеграции в конструкцию комбайна и возможность выделения границ между продуктивными пластами и пластами каменной соли исходя из количества импульсов в минуту, фиксируемых детектором. Также установлено, что погрешность определения границ продуктивных пластов с помощью детекторов по вертикали не превышает 25 см, или 7,8% от общей высоты хода комбайна в сравнении с данными геологических служб.

Как итог, выбранный способ маркировки сильвинитового пласта показал свою эффективность и будучи частью комплексной системы навигации добычных комбайновых комплексов способен решать ряд следующих актуальных задач:

- контроль мощности подрубки пластов каменной соли;
- снижение потерь полезного ископаемого при ведении очистных работ;
- обеспечение полноты выемки продуктивного пласта;
- снижение трудозатрат на навигацию;
- дополнительный контроль качества добываемой породы.

Актуальным направлением дальнейших исследований является изучение возможности контроля качественного состава добываемой руды на основе содержания изотопа Калий-40.

## Список литературы / References

1. Чекмасов Н.В., Немцев В.А. Обоснование направлений совершенствования проходческо-очистных комбайнов. *Вестник Пермского государственного технического университета. Нефть и газ*. 2005;4(6):238. Chekmasov N.V., Nemtsev V.A. A justification for improvement trends of road headers and continuous miners. *Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Neft i Gaz*. 2005;4(6):238. (In Russ.)
2. Trifanov G.D., Shishlyannikov D.I., Lavrenko S.A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(9):5722–5726.
3. Левин Л.Ю., Исаевич А.Г., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов. *Горный журнал*. 2015;(1):72–75. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.01.13>  
Levin L.Yu., Isaevich A.I., Semin M.A., Gazizullin R.R. Dynamics of air-dust mixture in ventilation of blind drifts operating a team of cutter-loaders. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(1):72–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.01.13>
4. Исаевич А.Г., Чайковский И.И., Поляков И.В. Особенности формирования пылевой обстановки в комбайновом забое глубокого калийного рудника. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(4):539–550.  
Isaevich A.G., Tchaikovskiy I.I., Polyakov I.V. Features of the salt dust distribution in a blind drift of a deep potash mine. *Izvestiya Tulsckogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):539–550. (In Russ.)
5. Левин Л.Ю., Кормщииков Д.С., Кузьминых Е.Г., Мачерет А.М. Система навигации проходческо-очистного комбайна на калийных рудниках. *Горный журнал*. 2021;(4):92–96. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.04.13>  
Levin L.Yu., Kormshchikov D.S., Kuzminykh E.G., Macheret A.M. Navigation system for heading machines in potash mines. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(4):92–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.04.13>
6. Ralston J., Reid D., Hargrave C., Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2014;24(3):305–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.003>
7. Савич И.Н., Вотяков М.В. Технология очистной выемки верхнекамского калийного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(9):268–271. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2006/9/26\\_Savuich17.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2006/9/26_Savuich17.pdf) (дата обращения: 29.12.2025).  
Savich I.N., Votyakov M.V. A stoping technology for the Verkhnekamsk potash deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(9):268–271. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2006/9/26\\_Savuich17.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2006/9/26_Savuich17.pdf) (accessed: 29.12.2025).
8. Соломон М.В., Гончаренко О.П. Генетическая интерпретация текстурно-структурного облика нижнепермских сильвинитовых пород прикаспийской впадины. *Литология и полезные ископаемые*. 2022;(1):68–84.  
Solomon M.V., Goncharenko O.P. Genetic interpretation of the textural-structural appearance of early Permian sylvinite rocks in the Caspian basin. *Lithology and Mineral Resources*. 2022;57(1):62–77. <https://doi.org/10.1134/S0024490222010060>
9. Кузнецов А.И., Кормщииков Д.С., Князев Н.А., Кузнецов Я.Д. Практический опыт курсовой навигации проходческо-очистного комбайна на калийном месторождении. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2024;(4):685–699.  
Kuznetsov A.I., Kormshchikov D.S., Knyazev N.A., Kuznetsov Ya.D. Practical experience of course navigation a potash-powered tunneling and cleaning combin the deposit. *Izvestiya Tulsckogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2024;(4):685–699. (In Russ.)
10. Liu D., Guo S., Yang Y., Shi Y., Chen M. Geomagnetism-based indoor navigation by offloading strategy in NB-IoT. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019;6(3):4074–4084. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2875018>
11. Черный К.А. Закономерности проявления и оценка основных параметров ионизирующего действия калийных солей. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2018;(4):115–126.  
Chernyy K.A. Consistent patterns and estimation of ionizing effect of potassium salts. *Izvestiya Tulsckogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(4):115–126. (In Russ.)
12. Черный К.А. Поля ионизирующих излучений материалов на основе калийных солей. *Успехи современного естествознания*. 2016;(9):196–200. Режим доступа: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36143> (дата обращения: 29.12.2025).  
Chernyy K.A. Fields of ionizing radiation emanated from materials basing on potash salt. *Advances in Current Natural Sciences*. 2016;(9):196–200. (In Russ.) Available at: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36143> (accessed: 29.12.2025).
13. Łukaszek-Chmielewska A., Podleśna A., Stawarz O., Rachwał M., Drzymala T. Assessment of natural radioactivity of salt samples with reduced sodium content. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2024;1(92):151–161. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.9324>
14. Пак Д.Ю., Пак Ю.Н., Есендосова А.Н., Смагулова А.Б. О возможности спектрометрического гамма-каротажа при решении задач нефтегазопромысловой геофизики. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016;(4-6):1069–1072. Режим доступа: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=9134> (дата обращения: 29.12.2025).  
Pak D.Y., Pak Y.N., Yessendossova A.N., Smagulova A.B. Possibility of spectrometer gamma logging when solving problems of oil and gas geophysics. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy*. 2016;(4-6):1069–1072. (In Russ.) Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=9134> (accessed: 29.12.2025).
15. Горн Л.С., Хазанов Б.И. *Современные приборы для измерения ионизирующих излучений*. М.: Энергоатомиздат; 1989. 232 с. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/gorn\\_sovremennye-pribory-dlya-ioniziruyuschih-izlucheniya\\_1989/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/gorn_sovremennye-pribory-dlya-ioniziruyuschih-izlucheniya_1989/p0/) (дата обращения: 29.12.2025).

16. Голодных Е.В. Обзор детекторов гамма-излучения для контроля положения ствола горизонтальной скважины. *Вестник науки Сибири*. 2013;(1):129–138. Режим доступа: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/16367/1/468.pdf> (дата обращения: 29.12.2025).  
Golodnykh E.V. An overview of gamma radiation detectors to monitor a horizontal borehole position. *Vestnik Nauki Sibiri*. 2013;(1):129–138. (In Russ.) Available at: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/16367/1/468.pdf> (accessed: 29.12.2025).
17. Голодных Е.В. *Гамма-метод и аппаратура контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине* [дисс. ... канд. тех. наук]. Томск; 2016. 116 с.
18. Вербов В.Ф., Мартыненко С.В. Перспективы применения в таможенном контроле сцинтилляционных гамма-детекторов для обнаружения и идентификации делящихся и радиоактивных материалов. *Вестник Российской таможенной академии*. 2014;(3):123–130.  
Verbov V.F., Martynenko S.V. Fission and radioactive materials revelation and identification scintillation gamma-detectors application prospects in the customs control process. *Vestnik of Russian Customs Academy*. 2014;(3):123–130. (In Russ.)
19. Tariwong Y., Vuong P.Q., Luan N.T., Saha S., Kim H.J., Wantana N. et al. Crystal growth and scintillation properties of Tm<sup>3+</sup>-doped LaCl<sub>3</sub> single crystal for radiation detection. *Radiation Physics and Chemistry*. 2022;200:110347. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110347>
20. Лукашевич Р.В., Фоков Г.А. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования. *Приборы и методы измерений*. 2017;8(3):246–253. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253>  
Lukashevich R.V., Fokov G.A. Application of the spectrometric method for calculating the dose rate for creating calibration highly sensitive instruments based on scintillation detection units. *Devices and Methods of Measurements*. 2017;8(3):246–253. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253>
21. Деменков В.Г., Деменков П.В. *Начала электронных методов ядерной физики*. СПб.: Лань; 2016. 384 с. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/Деменков.pdf> (дата обращения: 29.12.2025).
22. Шендрик Р.Ю. *Методы экспериментальной физики конденсированного состояния*. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов – 1. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та; 2013. 110 с. Режим доступа: <https://www.medphysics-irk.ru/handbooks/pdf/Shendrik-scint.pdf> (дата обращения: 29.12.2025).
23. Галушкин С.С., Вишняк Б.А., Смирнов В.Н. Система автоматического контроля содержания хлористого калия в руде и продуктах переработки. *Записки Горного института*. 2010;187:43–46. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/6622> (дата обращения: 29.12.2025).  
Galushkin S.S., Vishnyak B.A., Smirnov V.N. Potassium chloride content in ore and products of recycling automatic control system. *Journal of Mining Institute*. 2010;187:43–46. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/6622> (accessed: 29.12.2025).

#### **Информация об авторах**

**Князев Никита Алексеевич** – младший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: [nikita-knja@mail.ru](mailto:nikita-knja@mail.ru)

**Кормшиков Денис Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: [dkormshchikov@gmail.com](mailto:dkormshchikov@gmail.com)

**Кузнецов Александр Игоревич** – младший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

**Богданов Артур Русланович** – техник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

#### **Information about the authors**

**Nikita A. Knyazev** – Junior Research Associate, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; e-mail: [nikita-knja@mail.ru](mailto:nikita-knja@mail.ru)

**Denis S. Kormshchikov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Research Associate, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; e-mail: [dkormshchikov@gmail.com](mailto:dkormshchikov@gmail.com)

**Aleksandr I. Kuznetsov** – Junior Research Associate, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

**Artur R. Bogdanov** – Technician, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 16.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 13.02.2026

#### **Article info**

Received: 16.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 13.02.2026