

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.832.5:553.94

В.Н. ШВЕЦ, Г.Ю. БОЯРКО

ПОГРЕШНОСТИ ДАННЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ  
СКВАЖИН НА ВЫХОДАХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Ядерно-физическое опробование (ЯФО) скважин на выходах угольных пластов при разведке угля позволяет получить достоверные значения мощностей угольных пластов и зольности угля. Среднеквадратическая погрешность определения мощности угольных пластов на месторождениях Южно-Якутского угольного бассейна методом ГГО-С составляет 2,7–4,0 см, а зольности ( $A^d$ ) — 2,1–5,4 абс.%. Использование ЯФО позволяет сократить объемы ядерного опробования (с одновременным улучшением его качества), увеличить производительность буровых работ, а для задач геометризации пласта оно наиболее оптимально.

В процессе разведки угольных месторождений Южно-Якутского угольного бассейна (ЮЯУБ) рядом ядерно-физических методов ГГПП «Южякутгеология» разработана новая технология вскрытия и определения параметров выходов угольных пластов на базе высокоскоростного бурения при оптимизации использования ЯФО скважин и высококачественного отбора керна. К настоящему времени упомянутая технология доминирует в процессе углеразведки бассейна. Этим способом в ЮЯУБ на 15 месторождениях вскрыто > 1000 пластосечений, в том числе > 300 с подъемом высококондиционного угольного керна на поисковых, разведочных и эксплуатационных стадиях [4].

Применяемый в рамках технологии комплекс ЯФО включает: оригинальный базовый метод — гамма-гамма опробование селективное (ГГО-С) в 4л-геометрии с бета-излучателем  $^{90}\text{Sr}$  в сборке со свинцовой мишенью в 6-сантиметровом заинверсионном зонде; гамма-гамма опробование доинверсионной версии селективного микрозонда (3-сантиметровом), ориентированной на выявление каверн (ГГО-М); гамма-гамма опробование плотностное (ГГО-П), гамма-опробование по естественной радиоактивности (ГОЕР) и нейтрон-нейтронное опробование (ННО) стандартными зондами ППГР-1 и ВПГР-1. Комплекс ЯФО рассчитан на опробование обсаженных дюралевыми стаканами неглубоких скважин первой группы. Дюралевые стаканы из труб ЛБТН-55 обеспечивают стабилизацию условий промежуточной зоны (скважинных условий) и гарантированное в любых горно-геологических условиях безаварийное точечное ЯФО.

В процессе работ осуществлялась верификация данных ЯФО скважин на выходах угольных пластов с результатами сопряженного ядерного опробования. Ядерно-физическими методами опробования в естественном залегании в настоящее время уверенно определяются мощность, строение и зольность угольных пластов. Лучшие результаты по определению параметров углей показал метод ГГО-С.

Определение мощности и внутреннего строения угольных пластов по ЯФО

В Алдано-Чульманском угольном районе (АЧУР) ЮЯУБ угольные пласты отличаются контрастными понижениями естественной радиоактивности, плотности и зольности. Границы угольных пластов определяются по графикам-диаграммам ГГО-С известным способом полумаксимумов-полуминимумов. Этот же подход используется для выделения пропластков породы внутри пласта угля и выявления их границ. Определенная по «полумаксимумам» мощность ненасыщенных (менее 15 см) пропластков корректируется на уменьшение по эмпирической формуле [4]:

$$M_{\text{исп}} = -0,0065 \cdot M_{\text{яфо}}^2 + 1,3774 \cdot M_{\text{яфо}} - 4,8806,$$

где  $M_{\text{исп}}$  — истинная мощность тонких (менее 15 см) пропластков породы в пласте угля, см;  $M_{\text{яфо}}$  — мощность пропластков породы в пласте угля по нескорректированным данным ЯФО, см.

Породные пропластки хорошо интерпретируются в горизонтальных пластах среди насыщенных

ных по мощности угольных пачек и при контрастных границах уголь—порода. В крутопадающих пластах и при неконтрастных границах уголь—порода выделение породных пропластков по ЯФО без вспомогательного ядерного материала затруднено. Определенную ясность относительно крутопадающих пластов, вскрытых вертикальными скважинами, вносит ЯФО с 2л-зондом и источником  $^{241}\text{Am}$ .

В общем виде используемая в настоящее время методика выделения породных пропластков по ГГО-С в крутопадающих пластах следующая: 1) способом полумаксимумов-полуминимумов определяется фиксируемая мощность пропластка, которая корректируется по вышеприведенной формуле; 2) с помощью формулы  $M_{\text{исп}} = M_{\text{ЯФО}} - b \text{tg} \alpha$  (где  $\alpha$  — угол падения пласта) фиксируемая мощность пропластка уменьшается за счет учета 4л-геометрии зонда ГГО-С до фактической величины пересечения пропластка скважиной; 3) мощности пласта, угольной пачки или пропластка окончательно нормализуются по правилам горной геометрии. Выделение породных пропластков без учета такой методики обычно приводит к существенному завышению мощности породных прослоев, определенной по ГГО-С, что снижает точность количественных оценок зольности пластосечения.

Метрология определения мощности с помощью ЯФО как на этапе разработки представляемой технологии, так и при производственных работах на различных объектах оценивалась путем сопоставлений, согласно традиционным методикам [1, 2]. Полученные оценки достоверности определения мощности и строения горизонтальных угольных пластов с помощью ЯФО всегда соответствовали нормативным требованиям (рис. 1) и были обычно лучше аналогичных оценок для ядерного опробования. Достигнутые уровни точности определения мощности по ЯФО показаны в таблице.

Например, в базовой выборке сравнения ядерного и ядерно-физического опробования кустовых скважин по Денисовскому месторождению (82 пластосечения угольных пластов) уровень случайного среднеквадратического расхождения при определении мощности пластосечений сопоставлением данных ГГО-С—кern оценивается в  $\pm 0,107$  м. Учитывая, что техническая погрешность кондиционного ядерного опробования с выходом керна 100—86% для этой же выборки составляет  $\pm 0,102$  м, реальны неравноточные наблюдения. Здесь выборочные расхождения практически полностью определяются погрешностями ядерного опробования, а фактическая доля погрешностей ЯФО равна  $\pm 0,04$  м (1/2 длины зонда ГГО-С).

Систематические расхождения при определении мощности и строения угольных пластов с помощью ЯФО и кондиционного ядерного опробования по выборке из 172 сопряженных сопоставлений (собранных по 8 месторождениям АЧУР ЮЯУБ) статистически незначимы (0,4 см). Для некоторых частных подвыборок по отдельным участкам мощности по ЯФО все же несколько больше (до 3 см) соответствующих мощностей по ядерному опробованию, поскольку даже 100%

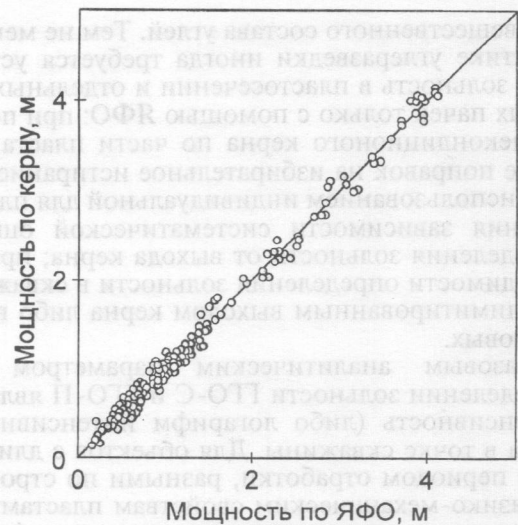


Рис. 1. Сопоставление данных определения мощности угольных пластов по документации керна скважин и методу ГГО-С по выборке из 82 пластосечений Денисовского месторождения

#### Возможности методов определения мощности угольных пластов и их зольности в ЮЯУБ

Метод опробования	Среднеквадратические погрешности определения мощности (см) / $A^d$ (абс.%)	
	теоретически минимальные	фактически достигнутые
Керновое опробование (по уровню природной изменчивости)	> 0,5	10
	2,1 – 3,2	2,9 – 5,1
ГГО-С, $A^d = f$ (эффективный атомный номер)	2,7	2,7 – 4
	1,8 – 2,7	(2,1)3,1 – 5,4
ГГО-П, $A^d = f$ (плотность)	> 0,5	> 0,5
	2,1 – 3,2	2,1 – 3,2
ННО, $A^d = f$ (водородсодержание)	8 – 10	н. о.*
	1,5 – 4,5	н. о.
ГОЕР, $A^d = f$ (содержание радиоактивных элементов)	н. о.	н. о.
	3,8 – 5,5	н. о.

\*н.о. — не определялось.

выхода керна в двойной колонковой трубе (по пласту) не гарантирует от нефиксируемых бурением потерь угольного керна при встрече пласта одинарной колонковой трубой (при подходе к пласту). Среднеквадратическое расхождение при определении мощности ЯФО—кern в рассматриваемой сборной выборке равно 0,093 м. Среднеквадратическое расхождение данных определения мощностей одиночных породных прослоев ГГО-С—кern по выборке из 105 сопоставлений равно  $\pm 0,027$  м. Учитывая высокую точность измерения мощности породных прослоев по поднятому керна, погрешность определения мощностей породных прослоев по ГГО-С считаем  $\pm 0,027$  м.

#### Определение зольности угля по данным ЯФО

В рамках новой технологии результаты ядерно-физического опробования, как правило, не применяются в качестве основного метода изуче-

ния вещественного состава углей. Тем не менее, в практике углеразведки иногда требуется установить зольность в пластосечении и отдельных угльных пачек только с помощью ЯФО: при подъеме некондиционного керна по части пласта; при вводе поправок на избирательное истирание керна с использованием индивидуальной для пластосечения зависимости систематической ошибки определения зольности от выхода керна; при необходимости определения зольности в скважинах с нелIMITированным выходом керна либо в бескерновых.

Базовым аналитическим параметром при определении зольности ГГО-С и ГГО-П является интенсивность (либо логарифм интенсивности) счета в точке скважины. Для объектов с длительным периодом отработки, разными по строению и физико-механическим свойствам пластами более подходят нормированные параметры («отношения» отсчетов на угле и вмещающих песчаниках). Градуировочные зависимости ГГО-С в общем случае имеют вид:

$$\ln(I \text{ или } \Delta L, \text{ с}^{-1}) = b - aA^d,$$

где  $\ln(I \text{ или } \Delta L, \text{ с}^{-1})$  — аналитический параметр;  $b$  — логарифм счета либо параметра для угля с нулевой зольностью;  $a$  — градиент логарифма параметра на единицу зольности;  $A^d$  — зольность.

На каждом новом объекте в общем случае необходима новая градуировка — эталонирование. Еще надежнее использовать индивидуальные градуировочные зависимости по каждому разведываемому пласту. На базе значений аналитического параметра, в том числе исправленных на ненасыщенную мощность ( $< 15$  см), и градуировочной зависимости определяется зольность выделенных интервалов (проб). Часто применяется также способ опорной пачки, в котором данные ЯФО в пластосечении корректируют с данными опробования кондиционного керна, представляющего собой фрагмент этого пласта. Метрология определения зольности при ЯФО на различных объектах оценивалась путем сопоставлений по [1, 2] с учетом требований ГКЗ [3]. Достигнутые уровни точности определения зольности угля по ЯФО показаны в таблице.

Для оценок достоверности определения зольности ЯФО (ГГО-С), выполненных в разное время, характерны существенно различные уровни систематических и случайных расхождений с керновым опробованием. Сопоставление данных ГГО-С и кернового опробования, выполнявшееся экспертами на различных выборках, сформированных индивидуально, показывает отличающиеся результаты. Из этого следует, что результаты сопоставлений зольности по различным выборкам зависят от качества привлекаемых для сопоставления керновых опробований. Так, для 89 сопоставлений по базовой выборке кустовых скважин Денисовского месторождения среднеквадратическая погрешность зольности пластосечений по ГГО-С, осложненная природной изменчивостью, равна  $\pm 5,44$  абс. %.

Исходя из природной изменчивости в 3 абс. %, оценим максимальную техническую погрешность определения зольности ГГО-С:

$$\sigma_{\text{яфо}} = \sqrt{5,44^2 - 3^2} = 4,5 \text{ абс. \%}.$$

Для сравнения — техническая погрешность кернового опробования выборки с директивно кондиционным выходом керна 100—70% составляет  $\pm 5,96$  абс. %, а выборки с выходом керна 100—86 % —  $\pm 4,2$  абс. %.

Случайная среднеквадратическая погрешность определения зольности пластосечений для прямого сопоставления ГГО-С — керн (без влияния систематической составляющей) равняется  $\pm 6,88$  абс. %. Отсюда максимальная и минимальная среднеквадратические погрешности ЯФО:

$$\max \sigma_{\text{ГГО-С}} = \sqrt{6,88^2 - 4,2^2} = 5,45 \text{ абс. \%},$$

$$\min \sigma_{\text{ГГО-С}} = \sqrt{6,88^2 - 5,96^2} = 3,44 \text{ абс. \%}.$$

Погрешность ГГО-С  $\pm 5,45$  абс. %, как правило, является верхней границей погрешностей при определении зольности ядерно-физическими методами в рамках представленной технологии. Среднеквадратическая погрешность сопоставления зольностей, определенных ГГО-С и кондиционным керновым опробованием дифференциальных проб мощностью более 15 см для той же базовой выборки (180 сопоставлений),  $\pm 5,2$  абс. %. Следовательно, для данного случая долевую среднеквадратическую погрешность ЯФО (как равноточных измерений) можно оценить в  $\pm 3,07$  абс. %.

Иногда получают минимальные погрешности определения зольности, близкие к принципиально достижимым ГГО-С (1,8—2,06 абс. %). Например, в 1998 г. по выборке из 153 сопоставлений по 8 месторождениям АЧУР ЮЯУБ, выполненных методом отношений, зольность ГГО-С в экспертной выборке определена весьма достоверно (рис. 2). Статистически незначимая по критериям Стьюдента и ничтожной погрешности систематическая ошибка ГГО-С—керн составила  $-0,31$  абс. %, а случайная среднеквадратическая

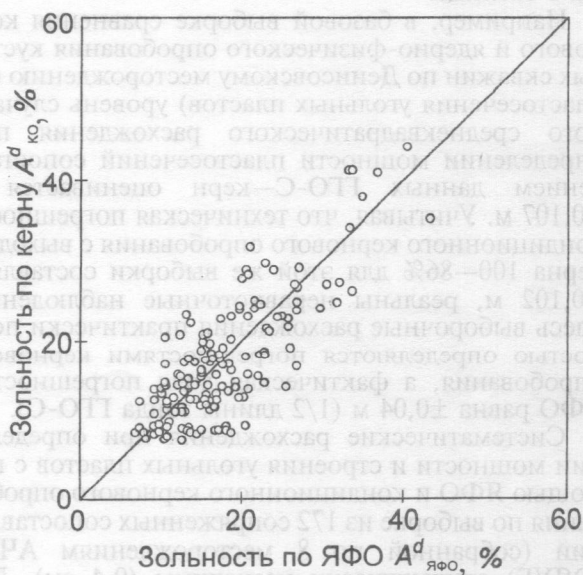


Рис. 2. Сопоставление данных опробования по керну скважин и определения зольности по ГГО-С (метод отношений) для выборки дифференциальных проб из 153 пластосечений при единой для 8 месторождений АЧУР ЮЯУБ градуировочной зависимости

погрешность —  $\pm 4,68$  абс.%. Отсюда максимальная и минимальная среднеквадратические погрешности ЯФО составляют:

$$\max \sigma_{\text{ГГО-С}} = \sqrt{4,68^2 - 4,2^2} = 2,32 \text{ абс.}\%$$

$$\min \sigma_{\text{ГГО-С}} = 4,68 / \sqrt{2} = 3,32 \text{ абс.}\%$$

Как правило, хорошо сходятся сопоставления данных по зольности при керновом опробовании и ЯФО, рассчитанные способом опорной пачки. Например, для 191 сопоставления по АЧУР систематическое расхождение ГГО-С—кern незначимо и равно  $\pm 0,39$  абс.%, а среднеквадратическое расхождение  $\pm 2,75$  абс.% (рис. 3). Следует иметь в виду, что определения зольности ЯФО способом опорной пачки по сути не вполне самостоятельны, поскольку в каждом пластосечении они необходимо опираются на данные кернового опробования (базовую пробу).

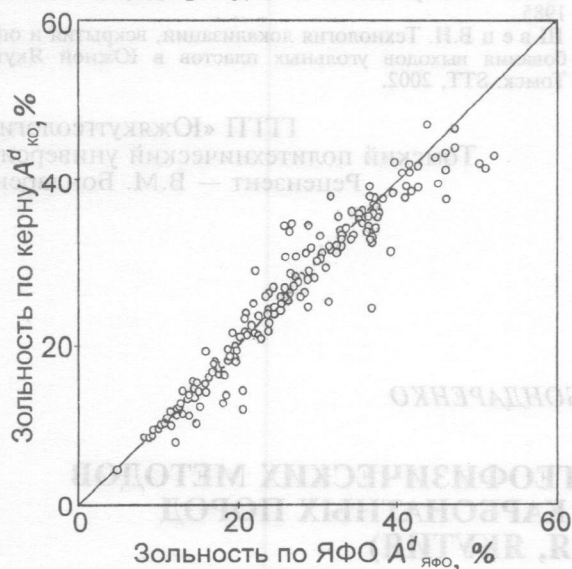


Рис. 3. Сопоставление данных опробования по керну и определения зольности по ГГО-С (метод опорной пачки) в выборке дифференциальных проб из 191 пластосечения из месторождений АЧУР ЮАУБ

Среднеквадратические ошибки определения зольности опробованием на основе плотностного метода (ГГО-П) на насыщенных по мощности интервалах (0,4 м и более) примерно такая, как и для ГГО-С. Так, для 28 сопоставлений ГГО-П—кern с выходом более 90% по пластам Д<sub>19</sub> и Д<sub>7</sub> на участке Угольный среднеквадратическая погрешность ГГО-П оценивается в  $\pm 2,3$  абс.%. Необходимо учитывать, что определения зольности ГГО-П в силу относительно низкой разрешающей способности последнего целесообразны преимущественно для пластосечений в целом и лишь с учетом 100% засорения породными прослоями.

Необходимо заметить, что при расчетах ошибок и погрешностей мы руководствовались требованиями традиционных методик [1–3], исходя из нормального закона распределения определений зольности и мощностей. Данные кернового опробования в связи с имеющим место избирательным истиранием не корректировались ни по мощности, ни по зольности. Упомянутыми методиками предписывается «выборочный» подход

для оценки статистических данных, при котором из 500 наличных сопоставлений kern—ЯФО на базе индивидуально и субъективно понимаемых качественных характеристик формируется и обсчитывается «репрезентативная» выборка в несколько десятков сопоставлений. Такой подход применительно к изучению угольных пластов не всегда корректен, поскольку стимулирует завышенные оценки представительности геофизического опробования.

Для производственных целей, в том числе в рамках данной технологии, рекомендуется изучение статистических результатов опробования по всей базе сопоставления вне зависимости от выхода угольного керна и качества ЯФО. Каждый обоснованный шаг по чистке (уменьшению) базы сравнения должен сопровождаться изучением статистики как в вычищенной, так и в выборке удаленных проб. Такими же процедурами желательно сопровождать и исправление данных кернового опробования на избирательное истирание.

Например, последовательное исключение из выборки сопоставлений ГГО-С—кern проб меньшей длины на лаге 8–80 см демонстрирует логарифмический рост коэффициентов корреляции зольностей, определенных по керновому опробованию и по ЯФО от 0,83 до 0,97 (рис. 4). Это позволяет обосновать динамику качества сопоставлений ГГО-С и кернового опробования в зависимости от длины интервалов сопоставления и шага ЯФО.

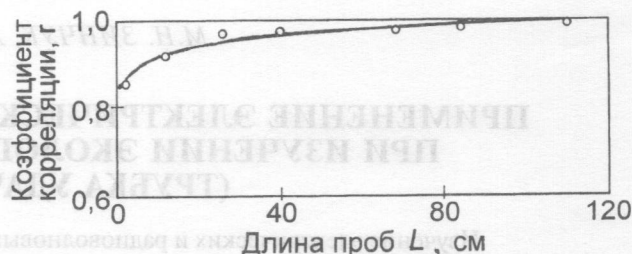


Рис. 4. Связь качества градуировок ГГО-С и длины используемых базовых дифференциальных проб

Поскольку ЯФО по сути — относительный метод, то уровень его систематических погрешностей определяется преимущественно качеством градуировочной зависимости. Используя градуировки, приближенные к конкретным условиям изучаемых пластосечений (как по вещественному составу углей, так по и характеру промежуточной зоны), можно всегда добиться минимальных систематических ошибок ЯФО относительно высококондиционного кернового опробования. Однако при градуировке ЯФО по высококондиционному керну с выходом 100% необходимо иметь в виду, что для сопоставлений ЯФО с директивно кондиционным керновым опробованием (более 70%) будут характерны систематические расхождения в определениях зольности. Значения зольности по ЯФО в таких случаях всегда будут меньше, нежели по керну. Величина систематических расхождений практически полностью определяется степенью проявления процессов избирательного истирания керна. Корректный ввод поправок в данные кернового опробования на избира-

тельное истирание, как правило, нивелирует систематические расхождения ЯФО—керна и снижает уровень случайных погрешностей.

### Выводы

1. ЯФО скважин на выходах угольных пластов позволяет получить более достоверные данные о мощности угольных пластов и зольности угля. Среднеквадратическая погрешность определения методом ГГО-С мощности угольных пластов на месторождениях Южно-Якутского угольного бассейна составляет 2,7—4,0 см, а зольности ( $A^d$ ) — 2,1—5,4 абс. %.

2. Керновое опробование угольных пластов остается важным, а зачастую и незаменимым элементом представленной технологии. Методами ЯФО в настоящее время уверенно определяются только мощность, строение и зольность угольных пластов. Прочие необходимые угле- и геохимические характеристики углей могут быть определены только при анализе вещества керна. Тем не менее использование ЯФО позволяет сократить объемы кернового опробования (с одновременным улучшением его качества), увеличить производительность буровых работ, а для задач геометризации пласта использование ЯФО является наиболее оптимальным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка достоверности данных ядерно-геофизических методов опробования на месторождениях твердых полезных ископаемых. Методические рекомендации. МУ-41-06-027-83 / Под ред. В.А. Ерхова и др. М., 1983.
2. Оценка достоверности данных ядерно-геофизических методов опробования, получаемых при разведке месторождений твердых полезных ископаемых. РД 41-06-125-90 / Под ред. И.М. Хайковича, С.И. Савосина. М., 1990.

3. Требования к геофизическому опробованию при подсчете запасов месторождений металлов и нерудного сырья. М., 1985.
4. Швец В.Н. Технология локализации, вскрытия и опробования выходов угольных пластов в Южной Якутии. Томск: СГТУ, 2002.

ГГПП «Южякутгеология»,  
Томский политехнический университет  
Рецензент — В.М. Бондаренко

УДК 624.131:622.371.012.3

М.Н. ЗИНЧУК, А.Т. БОНДАРЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭКОЛОГИИ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД (ТРУБКА УДАЧНАЯ, ЯКУТИЯ)

Изучение электрических и радиоволновых свойств криогенных карбонатных пород, насыщенных пресной водой и высокоминерализованными пластовыми водами, с глубины 300 м в карьере трубки Удачная показало, что такие свойства могут быть использованы при экспрессной оценке проникновения «складированных» пластовых вод по разломам в окружающую геологическую среду.

Кимберлитовая трубка Удачная — одно из крупнейших коренных месторождений алмазов в мире. Она приурочена к зоне сочленения двух крупнейших структур Сибирской платформы: Тунгусской синеклизы и Анабарской антеклизы. Трубка состоит из двух сопряженных тел (западного и восточного) и на поверхности в плане имеет форму искаженной восьмерки [1, 6, 8]. Западное тело значительно больше по размеру, чем восточное. Первое имеет вид эллипса, удлиненого в северо-западном направлении, форма которого меняется с глубиной. Трубка прослежена буровыми скважинами до глубины 1400 м. До глубины 250 м восточное и западное тела контактируют одно с другим, а глубже они разобщены. На глубине 600 м оба тела в плане становятся изометричными. Контакт между этими телами на поверхности постепенный: прослежен переход от плотных кимберлитовых брекчий восточного тела (со свежим оливином) через измененные разности (с

серпентинизированным оливином) и зону интенсивного дробления к кимберлитовым брекчиям западного тела. На глубине тела местами контактируют без образования зоны дробления [8]. В приповерхностной части кимберлит на границе с вмещающими породами обычно сильно изменен, что свойственно западному телу.

Трубка Удачная расположена в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых колеблется от 141 до 631 м [5]. Вмещающие породы — массивные доломиты, доломитизированные известняки, мергели, аргиллиты, алевролиты, песчаники, известковистые конгломераты нижнего ордовика (на современной поверхности), верхнего и среднего кембрия (вскрыты скважинами). Гидрогеологические условия района характеризуются распространением над-, внутри- и подмерзлотных подземных вод [5]. Первые представлены пресными водами сезонно-талого слоя, а также круглого-