

Газодинамическая характеристика пород удачнинской свиты (Є₁₋₂) в пределах шахтного поля трубки Удачная (Республика Саха (Якутия))

©2024 А. М. Янников¹✉, Д. Г. Дмитриев^{1, 2}

¹Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА (ПАО), ул. Ленина, 39,
678174, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация

²Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Для безопасного ведения подземной разработки кимберлитовой трубки «Удачная» требуется всестороннее изучение ее горно-геологических условий. Присутствие интервалов пород, насыщенных углеводородными газами, природными рассолами и каустобиолитами, требует систематизации интервалов флюидовыделения, а также оценки газодинамической составляющей. Вовлечение эксплуатационных блоков в отметках залегания удачининской свиты позволит обеспечить сырьём производственные мощности Удачининского ГОКа на ближайшие 30 лет.

Методика: Изучение основных газодинамических параметров глубоких горизонтов месторождения выполнено при бурении опытных скважин, по которым было выполнено поинтервальное определение расходов пластовых газов, с применением пакерных установок и комплексного оборудования для исследования (КИИ). Также был произведен отбор проб газов для определения их химического состава и газовый каротаж.

Результаты и обсуждение: В отметках удачининской свиты в верхней подсвите выделено 8 коллекторов, в нижней подсвите выделено 7 коллекторов, которые сгруппированы в 5 зон, отличающихся по мощности, типу флюидонасыщенности и величиной пластового давления.

Заключение: Наличие в разрезе удачининской свиты газонасыщенных коллекторов, обеспечивающих существенный приток пластовых газов к системе подземных горных выработок, оценивающийся по результатам проведенных исследований величиной ~ 1–2 тыс м³/сут., позволяет говорить о необходимости проведения опережающей дегазации с применением уже отработанных на руднике Удачный технологий.

Ключевые слова: Далдынское кимберлитовое поле, трубка «Удачная», пластовые газы, карбонатные коллекторы, дегазация, осушение пород.

Для цитирования: Янников А. М., Дмитриев Д. Г. Газодинамическая характеристика пород удачининской свиты (Є₁₋₂) в пределах шахтного поля трубки Удачная (Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 1. С. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/118–128>

Введение

Кимберлитовая трубка Удачная – уникальное ко-
рренное месторождение алмазов, является наиболее
богатым в Далдынском кимберлитовом поле Якутс-

кой алмазоносной провинции. Открытая разработка
месторождения была закончена десять лет назад по
достижению глубины карьера более 600 м, в настоя-
щее время добыча алмазов продолжается подземным
способом [1].



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Янников Алексей Михайлович, e-mail: yannikov90@mail.ru

Строительство подземного рудника на месторождении было сопряжено со сложными горно-геологическими условиями, характерными для кимберлитовых трубок Западной Якутии. В разрезе вмещающих пород и непосредственно в кимберлитовых телах встречаются зоны различного флюидонасыщения: природные крепкие рассолы, пластовые газы углеводородного состава, каустобиолиты. [2, 3]

Данные, полученные по опорным региональным скважинам, а также имеющаяся на настоящий момент информация об удачининской свите требовали уточнения газодинамической характеристики непосредственно в пределах шахтного поля месторождения с учётом планов развития горных работ и существующих проектных решений по отработке. Вовлечение эксплуатационных блоков в отметках залегания удачининской свиты позволит обеспечить сырьём производственные мощности Удачининского ГОКа на ближайшие десятилетия.

Учитывая сложность прогнозируемых горно-геологических условий в изучаемых отметках, требовалось проведение детализации разреза с выделением отдельных коллекторов, которые требовали дальнейшего объединения в зоны различной степени флюидной насыщенности. Определение границ зон, отличных по величине пластовых давлений и наблюдаемым газопитокам необходимо не только для определения оптимальных отметок заложения подземных горных выработок, но и для определения параметров системы опережающей дегазации [4], а именно:

- подбора превенторов;
- выбора типа обвязки устьев скважин противобросовым оборудованием;

- определения оптимального опресовочного давления;
- расчёта глубин заложения обсадных колонн;
- количества дегазационных скважин на каждом эксплуатационном блоке.

Представленные исследования носят пионерный характер, способствуя накоплению научных знаний, требуют публикации в открытых источниках, т.к. могут являться основой как для последующих исследований газодинамических условий кимберлитовых трубок в целом, так и для дальнейшей детализации горно-геологических условий конкретного месторождения.

Краткая геологическая характеристика

Месторождение характеризуется сложными горно-геологическими условиями, оно представлено двумя отдельными кимберлитовыми трубками, сложенными различными типами кимберлитов, отнесённых к нескольким фазам внедрения (рис. 1), разделение общей раструбовой части происходит с глубины 250 м от дневной поверхности, отработанной в настоящее время карьером, с глубиной мощность междиатремового блока существенно возрастает, т.к. происходит неравномерное сокращение площади западного и восточного кимберлитовых тел: на глубине 750 м от дневной поверхности оно составляет порядка 190 м, а с глубины 1000 м – начинает превышать 300 м [5]. Вмещающие породы в изученных интервалах мархинской свиты (E_3 mr) и известково-доломитовой толщи (E_2 id) имеют сложное флюидонасыщение: зафиксированы насыщенные природные хлоридно-кальциевые рассолы с минерализацией 350–380 г/литр, скопления углеводородных газов, а также каустобиолиты.

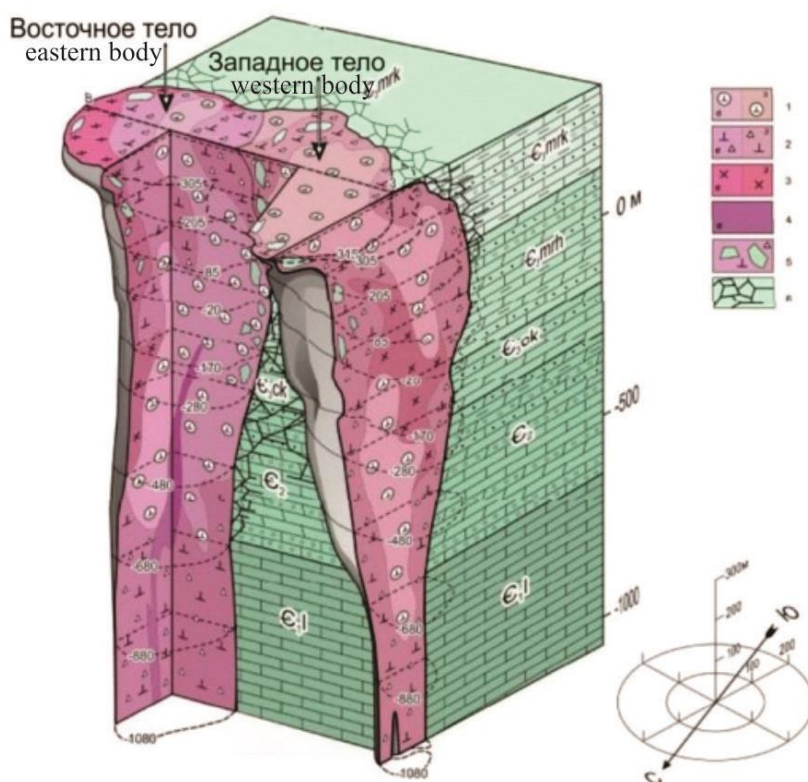


Рис. 1. Геологическая модель трубки «Удачная»: 1 – автолитовая кимберлитовая брекчия (фаза III), 2 – кимберлитовая брекчия (II), 3 – кимберлитовая брекчия массивной текстуры (фаза I), 4 – порфировый кимберлит (фаза IV), 5 – кимберлитовая брекчия с крупными ксенолитами вмещающих пород, 6 – зона дробления вмещающих пород.

[Fig. 1. Geological model of the Udachnaya pipe: (1) – autolite kimberlite breccia (phase III), (2) – kimberlite breccia (II), (3) – kimberlite breccia with massive texture (phase I), (4) – porphyry kimberlite (phase IV), (5) – kimberlite breccia with large xenoliths of the host rocks, (6) – zone of crushing of host rocks.]

Методика исследований

Решение поставленных задач осуществлялось на основе полевых, лабораторных и теоретических исследований. Основными полевыми методами являлись эксперименты, проводимые в отметках изучаемого интервала. В их состав входило:

- проведение натурных поинтервальных экспериментов по скважинам, пробуренным как с поверхности, так и из подземных горных выработок, для оценки водообильности, газообильности и проницаемости толщ осадочных пород удачининской свиты, на основе поинтервальных постановок пласто-испытателей, выпусков пластовых вод и газов, компрессионных испытаний, газового каротажа;
- изучение литологических разностей осадочных пород свиты полевыми и лабораторными методами;
- оценка фильтрационных параметров осадочных пород с использованием опытных откачек;
- отбор проб воды, газа, керна на разные виды анализов при бурении;
- последующий анализ и интерпретация проведенных наблюдений и экспериментов согласно общепринятым методикам [6, 7].

Для получения представительных результатов были выполнены исследования по трём опытным скважинам №№ ИГС-1, ИГС-2 и ИГС-3, пробуренным в различных зонах:

1. ИГС – 1 на западном борту тр. «Удачная», в зоне динамического воздействия западного кимберлитового тела.
2. ИГС – 2 в межтрубном блоке тр. «Удачная», подвергшимся наибольшему изменению, в результате внедрения кимберлитовых расплавов.

3. ИГС – 3 на восточном борту тр. «Удачная», в зоне динамического воздействия восточного кимберлитового тела.

Глубина залегания и мощность свиты была уточнена в процессе бурения, с учётом полученных данных от каротажа: кровля удачининской свиты, в пределах шахтного поля трубки «Удачная» залегает на глубине 920.6/945.9 м от дневной поверхности (абс. отм. - 573.5/-598.7 м.). Подошва свиты согласно залегает на породах кумахской толщи на глубинах 1483.6/1516.5 м от дневной поверхности (абс. отм. -1156.0/-1172.4 м.).

После выделения границ объекта исследований в разрезе был выполнен комплексный анализ проведенных поинтервальных испытаний, постановки КИИ, газового каротажа, а также сопоставление химического состава природных газов, определённых по отобраным пробам, а также в процессе проведения буровых работ. Время открытого и закрытого периода определялось согласно методическому руководству комплекса пластоиспытателя (КИИ) в зависимости от скорости роста пластового давления и дебетных показателей конкретного интервала.

Выделение коллекторов основывалось на качественной интерпретации проведенного комплекса ГИС, полевых исследований керна материала и результатах поинтервальных опытно-фильтрационных испытаний с использованием пакерных установок.

Изучение интенсивности газовыделения было выполнено посредством проведения поинтервальных опытно-фильтрационных работ, с использованием пакерных установок. Всего по трём скважинам было выполнено 32 постановки, результаты проведенных испытаний по всем скважинам приведены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты проведенных испытаний по скважинам
[Table 1. Test results for wells]

№ п/п No.	Интервал от-до, м. [Interval from-to, m.]	Результаты постановок [Performance results]			
		Время открытого периода, мин [Time open period, min]	Время закрытого периода, мин [Time closed period, min]	Дебит пластовых газов, м ³ /час [Debit reservoir gases, m ³ /hour]	Замеренное пластовое давление, кгс/см ² [Measured reservoir pressure, kgf/cm ²]
1	2	3	4	5	6
ИГС-1					
1	1023.6-1082.0	16	65	0.5	66.7
2	1078.4-1136.5	15	60	0.05	55.0
3	1141.2-1190.1	10	120	0.3	62.6
4	1184.1-1223.5	15	120	0.06	68.8
5	1222.0-1276.2	15	120	0.07	75.95
6	1275.5-1327.6	15	120	0	39.66
7	1326.6-1381.6	15	120	0.02	75.34
8	1378.3-1432.9	16	120	0.1	44.39
9	1432.6-1475.9	15	120	1.7	153.66
10	1473.2-1529.4	15	120	6.56	162.76
ИГС-2					
1	1027.6-1062.5	30	120	0.0	34.6
2	1058.6-1116.6	30	120	0.002	34.6
3	1116.4-1165.5	30	120	0.008	58.8
4	1164.2-1215.8	10	20	1.01	44.76

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5	6
5	1214.5-1263.1	7	20	1.39	51.27
6	1262.6-1315.0	11	120	1.65	58.79
7	1312.7-1361.1	12	120	0.84	84.55
8	1360.6-1400.4	30	120	0.0	74.82
9	1399.9-1442.4	30	120	0.2	134.49
10	1441.4-1480.5	10	30	0.55	157.48
11	1480.3-1524.3	30	120	0.004	157.88
ИГС-3					
1	1006.9-1048.9	16	66	0.15	42.6
2	1048.9-1098.1	17	120	0.45	44.01
3	1098.1-1145.4	17	120	0.47	49.96
4	1144.5-1191.5	25	120	0.13	43.19
5	1191.5-1247.6	30	120	0.08	91.38
6	1246.6-1280.1	30	120	0.0002	45.88
7	1278.6-1327.9	30	120	0.0014	34.19
8	1326.6-1375.6	30	120	0.005	22.52
9	1374.3-1423.1	30	120	0.008	147.79
10	1421.8-1470.4	30	120	0.016	157.16
11	1468.5-1496.2	12	120	0.47	166.63

Результаты и их обсуждение

Объектом изучения в рамках проводимых исследований являются породы удачинской свиты (Є_{1-2} ud). Породы вскрыты на полную мощность всеми тремя опытными скважинами. Границы свиты неровные, биогермного характера. Биогермный характер границ удачинской свиты обусловлен ее рифогенным строением и выражен в смене типов органогенных пород при переходе к подстилающим и перекрывающим свитам [8]. Свита разделяется на две подсвиты.

Литологический состав удачинской свиты (Є_{1-2} ud) в пределах шахтного поля трубки «Удачная», в целом, по основным литотипам имеет хорошую корреляцию с региональными опорными разрезами. Свита

сложена карбонатными разностями осадочных пород, преимущественно представленными известняками и доломитами. Принцип разделение свиты на подсвиты основан на наличии в разрезе взаимосвязанных систем коллекторов, приуроченных к региональному среднекембрийскому водоносному комплексу, в верхней части разреза, и на преобладании водоупорных и слабопроницаемых пород в нижней части разреза [9].

Верхняя подсвита сложена преимущественно карбонатными (известняки и доломиты) породами, с подчинёнными прослоями терригенно-карбонатных разностей (рис. 2). Мощность подсвиты составляет от 220 до 300 м.



Рис. 2. Карбонатные породы удачинской свиты с интервалами кавернозных коллекторов.
[Fig. 2. Carbonate rocks of the Udachnaya formation with intervals of cavernous reservoirs.]

К верхней подсвите приурочен второй водоносный горизонт среднекембрийского водоносного комплекса. В рамках подсвиты в отм. -600/-820 м было выделено 8 коллекторов, разделённых на две зоны (рис. 3):

- первая зона выделяется в отм. -600/-740 м. В пределах зоны выделено пять коллекторов, суммарной мощностью порядка десяти метров. Выделенные коллекторы характеризуются невысокими параметрами

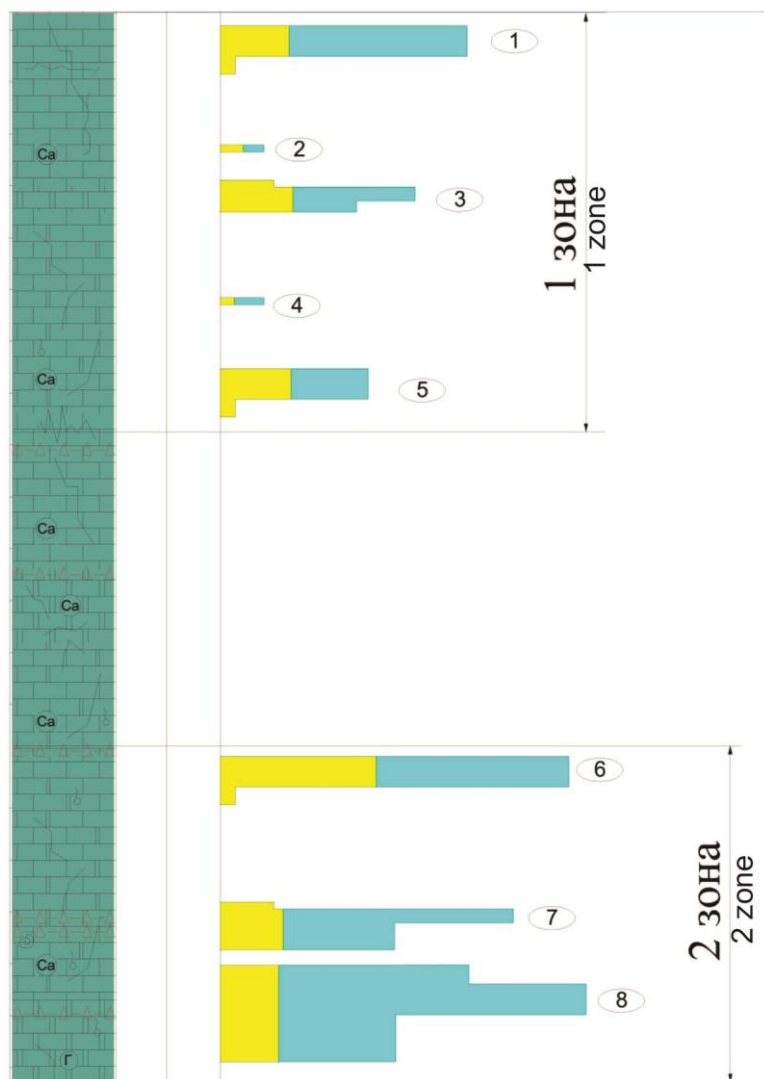


Рис. 3. Расположение и взаимоотношение в разрезе выделенных зон флюидо- и водонасыщения (голубое – вода, желтое – газ) в пределах верхней подсвиты удачининской свиты.

[Fig. 3. Location and relationship in the section of the identified zones of fluid and water saturation (blue – water, yellow – gas) within the upper subformation of the Udachnaya formation.]

водопроницаемости ($0.5\text{--}1.5 \text{ м}^2/\text{сут}$), и относительно изучаемого месторождения, сравнительно невысокими притоками $5\text{--}7 \text{ м}^3/\text{час}$;

- вторая зона коллекторов была выделена в отнм - $740\text{--}820 \text{ м}$ и состояла из 3 коллекторов, суммарной мощностью $10\text{--}15 \text{ м}$. Данная зона характеризовалась высокой проводимостью (до $40.0 \text{ м}^2/\text{сут}$), а также повышенными притоками природных рассолов по опытным скважинам до $40 \text{ м}^3/\text{час}$. Данные параметры являются нехарактерными для второго водоносного горизонта, превышая средние значения в $3\text{--}5$ раз.

Выделенная в пределах верхней подсвиты вторая зона коллекторов имеет локально распространение в рамках шахтного поля месторождения, т.к. по региональным опорным скважинам в искомом интервале коллекторов ранее выделено не было, а нижняя граница среднекембрийского водоносного комплекса фиксировалась на отнм. -750 м , при этом коллекторы второго водоносного горизонта среднекембрийского водоносного комплекса, приуроченные к удачининской свите, характеризовались существенно меньшей водообильностью (в $2\text{--}5$ раз), относительно первого водоносного горизонта, приуроченного к известняково-

доломитовой толще [10].

Нижняя подсвита традиционно описывалась как нижний водоупор для среднекембрийского водоносного комплекса (СВК), сложенный плотными известняками, доломитами, с прослоями мергелей. Однако в процессе проведения исследований в разрезе подсвиты также были выделены маломощные разрозненные прослои пористо-кавернозных доломитов и зоны брекчирования, в интервалах которых было выделено 7 коллекторов смешанной флюидной насыщенности.

Среднекембрийский и нижнекембрийский водоносные комплексы являются насыщенными хлоридными кальциевыми рассолами сходными по химическому составу и солевой формуле. Характеристическим компонентом, отличающим их друг от друга, является минерализация: для среднекембрийского водоносного комплекса она составляет 380 г/л , для нижнекембрийского $400\text{--}420 \text{ г/л}$. [11]. Т.к. все характеристические коэффициенты для рассолов комплекса идентичны, это позволяет использовать нижнекембрийский водоносный комплекс для закачки дренажных вод рудника Удачный, которые на 98% представлены рассолами среднекембрийского водоносного комплекса.

Формирование флюидной насыщенности пород удачининской свиты происходило в два крупных этапа.

Первый этап непосредственно связан с периодом осадконакопления, формированием рассольного насыщения седиментационными водами кембрийского возраста, явившимися основой для формирования последующего рассольного насыщения. Дополнительно в этот период происходило накопление органического осадка, способствовавшего в последующем к генерации углеводородных газов, зафиксированных в процессе изучения. Органический осадок в породах определялся рентгеноструктурным анализом. Данные исследования были проведены УрО РАН и опубликованы в настоящий момент только в производственных отчетах института Якутнипроалмаз.

Второй этап связан с постседиментационными изменениями, а именно внедрением кимберлитовых расплавов и сопутствующими гидротермальными процессами, приведшими к концентрированию рассолов и их обогащению углеводородными газами.

Формирование емкостных параметров коллекторов изучаемой толщи, отличных от региональных значений, произошло по причине процессов растворения и выщелачивания, которые, по всей видимости, происходили на стадии гидротермальных процессов. Учитывая тот факт, что внедрение кимберлитовых расплавов происходило в несколько фаз при формировании как восточного, так и в особенности западного кимберлитовых тел, данный процесс был достаточно растянут по времени [1, 10, 12–14].

Газодинамическая характеристика отложения удачининской свиты выполнена по результатам исследований и полевых работ, проведенных в период 2017–2023 гг., специалистами Удачинского ГОКа, института

Якутнипроалмаз и Вилуйской ГРЭ. По результатам проведенной интерпретации, выполненной схематизации и систематизации полученных материалов, в результате инженерно-геологического и литологического описания керновых проб по всему стволу опытных скважин, результатов лабораторных исследований коллекторских свойств, опытно-фильтрационных работ и газового каротажа в пределах объекта исследований, применительно к достаточно локализованной площади шахтного поля кимберлитовой трубки «Удачная» было выделено 15 проницаемых интервалов коллекторов различного флюидного насыщения. Три группы пластов-коллекторов насыщены только пластовыми газами и характеризуются как «сухие», а 12 групп имеют смешанную флюидную насыщенность, т.к. содержат природные рассолы, углеводородные газы, мальты и нефти. При этом необходимо отметить, что выделенные «сухие» коллекторы приурочены именно к низкопроницаемой нижней подсвите, накопление углеводородных газов, по всей видимости, связано с развитием территории исследований в разные геологические периоды.

Выделенные группы коллекторов состоят из взаимосвязанных систем отдельных пропластков, пористых и трещинных пород. Всего по результатам проведенного комплекса исследований было выделено порядка 30 интервалов, при этом мощность и проницаемость выделяемых интервалов существенно отличались в зависимости от блоковой принадлежности к зонам западного, восточного кимберлитовых тел или межтрубью. При этом, сохранялась общая корреляция числа выделяемых интервалов, с поправкой на влияние структурно-тектонического фактора. Осредненная характеристика выделенных коллекторов приведена в таблице 2.

Табл. 2. Характеристика коллекторов удачининской свиты
[Table 2. Description of reservoirs of the Udachnaya formation]

№ коллектора [Collector no.]	Мощность, м [Power, m]	Пористость, % [Porosity, %]	Тип насыщения [Saturation type]	Давление (max), кгс/см ² [Pressure (max), kgf/cm ²]	№ зоны интервал, м [Zone No. interval, m]
1	2	3	4	5	6
Верхняя подсвита [Upper subformation]					
1	2-4	4-7	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	66.7	1 -600/-740
2	1-3	3-8	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	66.7	
3	2-4	2-7	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	66.7	
4	2-4	2-6	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	66.7	
5	2-3	2-8	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	55.0	
6	4-5	2-10	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	62.6	2 -740/-820
7	2-5	2-20	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	62.6	
8	3-6	2-12	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	62.6	

Продолжение Табл. 2
[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6
Нижняя подсвита [Lower subformation]					
9	2-4	2-6	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	68.8	<u>3</u> -820/-900
10	2-3	3-5	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	75.9	
11	2-3	2-10	Газонасыщенный [Gas-saturated]	39.7	<u>4</u> -900/-1050
12	3-4	2-6	Газонасыщенный [Gas-saturated]	22.5	
13	1-4	2-8	Газонасыщенный [Gas-saturated]	74.8	
14	4-8	2-5	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	147.8	<u>5</u> -1050/-1140
15	2-6	2-12	Газо-водонасыщенный [Gas-water-saturated]	162.7	

В результате комплексного анализа проведенных работ в разрезе удачининской свиты в пределах шахтного поля трубки «Удачная» было выделено пять зон различных по характеру насыщения, водообильности и зафиксированным величинам пластовых давлений. Необходимо отметить, что каждая из выделенных зон имеет некоторые различия, прежде всего в параметрах водопроницаемости и величинах пластовых давлений, в зависимости от плановой приуроченности к конкретному блоку. В ряде случаев наблюдаемые параметры отличны друг от друга от 20 до 60 %.

Выделение зон происходило по параметру пластового давления, типу флюидонасыщения коллекторов (газовый, рассольный, смешанный), а также особенностям основных литотипов пород, обладающих коллекторскими свойствами. Определения перечисленных параметров производилось при непосредственном изучении керновых проб, а также при сопоставлении полученных по результатам ГИС, газового каротажа и постановок КИИ материалов.

1. Зона № 1 выделяется в интервале 950–1090 м (абс. отм. -600/-740 м) характеризуется достаточно выдержанным пластовым давлением, составляющим 55–66.7 кгс/см², состоит из коллекторов №№ 1, 2, 3, 4 и 5. Характеризуется смешанной насыщенностью, зафиксированные углеводородные газы преимущественно находятся в растворённом виде, однако, 4 и 5 коллекторы при условии совокупного влияния структурно-тектонического и литолого-фациального факторов способны формировать незначительные по мощности и запасам (~ 1–2 тыс м³) неструктурные газовые микрозалежи.

2. Зона № 2 выделяется в интервале 1090–1170 м (абс. отм. -740/-820 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет до 62.6 кгс/см². Коллекторы №№ 6, 7 и 8 так же, имеют смешанную рассольно-газовую насыщенность. Из-за более высокой проницаемости данные трещинно-кавернозные коллекторы не склонны формировать обособленные «газовые карманы».

3. Зона № 3 в интервале 1170–1250 м (абс. отм. -820/-900 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 68.8–75.9 кгс/см². Зона включает коллекторы №9 и №10 смешанной флюидной насыщенности. Они имеют невысокую пористость и характеризуются незначительной проводимостью (до 10 м²/сут). По литотипам выделяемых коллекторов, в зонах тектонической экранированности возможно накопление неструктурных микрозалежей углеводородных газов.

4. Зона № 4 выделена в интервале 1250–1400 м (абс. отм. -900/-1050 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 22.5–74.8 кгс/см². Зона включает коллекторы №№ 11, 12 и 13. Отличительной особенностью данной зоны является преимущественно углеводородное насыщение коллекторов, однако, из-за невыдержанности по площади и относительно невысоких параметров пористости формирование микрозалежей со значительными объёмами затруднено. Данная зона совпадает с водоупорной пачкой, разделяющей региональные среднекембрийский и нижнекембрийский водоносные комплексы.

5. Зона № 5 выделена в интервале 1400–1490 м (абс. отм. -1050/-1140 м). Пластовое давление в пределах зоны максимальное и составляет 147.8–162.7 кгс/см². Зона включает коллекторы № 14 и № 15, характеризующиеся смешанной флюидной насыщенностью. Данная зона является переходной и сопряжена с нижезалегающим нижнекембрийским водоносным комплексом. Формирование в пределах данной зоны неструктурных залежей углеводородных газов также возможно при условии синергетического влияния структурно-тектонических и литолого-фациальных факторов.

Выделенные зоны, помимо мощности, количества пластов-коллекторов и типа флюидонасыщенности, отличаются друг от друга величиной пластового давления, причём изменения пластового давления не всегда обусловлено глубиной залегания коллекторов, а контролируется величиной свободного порового пространства в трещинно-кавернозных коллекторах и

объёмом флюидов в них содержащихся. Наблюдаемые пластовые давления обусловлены неравновесным уплотнением пород, слагающих коллекторы удачининской свиты (катагенетические изменения) [15, 16].

По результатам химических анализов отобранных проб и газового каротажа установлено, что в интервале удачининской свиты доминирующее положение занимают углеводородные газы. Их химический состав приведен в таблице 3.

Зафиксированные пластовые газы относятся к углеводородным, метановым (т.к. данный газ занимает доминирующее положение до 95 %, а вместе с гомологами до 98 %). 90 % генерируемого газа относится к водорастворенному, газовый фактор составляет в среднем для среднекембрийского и нижнекембрийского водоносного комплексов $2 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Поступление доминирующего количества углеводородных газов в подземные горные выработки будет происходить из-за де-

газации рассолов СВК (до 90 %) и частично прямого диффузно-суфлярного выделения пластовых газов из коллекторов СВК (до 10 %) [17].

Наличие в разрезе удачининской свиты газонасыщенных коллекторов, обеспечивающих существенный приток пластовых газов к системе подземных горных выработок, оценивающийся по результатам проведенных исследований величиной $\sim 1\text{--}2 \text{ тыс м}^3/\text{сут.}$, позволяет говорить о необходимости проведения опережающей дегазации с применением уже отработанных на руднике Удачный технологий.

Отдельные технические решения требуются только при проведении работ в отметках зоны №5 по причине высоких пластовых давлений, превышающих 100 кгс/см^2 , учитывая полученные параметры, потребуется применение двухэтапной разгрузки массива, включающей в себя сопутствующее опережающее водопонижение.

Табл. 3. Результаты химических анализов проб пластовых газов
[Table 3. Results of chemical analyses of reservoir gas samples]

Свита [Formation]	Скважина [Well]	Среднее содержание компонента в пробе, объёмная доля, % [Average component content in the sample, volume fraction, %]				
		CH ₄ (метан) [methane]	C ₂ H ₆ (этан) [ethane]	C ₃ H ₈ (пропан) [propane]	C ₄ H ₁₀ (бутан) [butane]	C ₅ H ₁₂ (пентан) [pentane]
Удачининская [Udachninskaya]	ИГС-1	84.9	5.29	2.38	2.04	0.53
	ИГС-2	84.38	6.58	4.41	2.89	1.59
	ИГС-3	75.44	8.15	6.84	5.46	3.96

Выводы

Проведя обработку и анализ выполненных полевых работ и экспериментов, изучив результаты натурных наблюдений, и проанализировав, с последующей интерпретацией, результаты опробования, правомерным будет сделать ряд следующих выводов и обобщений:

1. Проведенный комплекс исследований подтвердил наличие в разрезе удачининской свиты коллекторов, содержащих пластовые углеводородные газы. При этом в интервале нижней подсвиты впервые были выделены именно «сухие» газонасыщенные коллекторы, приуроченные к наименее проницаемому интервалу осадочной толщи.

2. Выделение в разрезе удачининской свиты 15 пластов-коллекторов позволяет говорить о её существенной роли в формировании сложных горно-геологических условий ведения подземной отработки месторождения. Для обеспечения безопасного ведения горных, проходческих и добычных работ потребуются проведение опережающего осушения и дегазации толщи вмещающих пород в изученном интервале.

3. В целом по разрезу карбонатная пачка удачининской свиты из-за наличия различных структурно-генетических типов, а также изменчивости литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств, способствовала формированию выделенных зон различного флюидонасыщения. Формирование коллекторов различных типов обусловлено разнофациальным характером отложений и постседиментационными

процессами, наибольшее влияние оказали гидротермальные процессы, сопряжённые с фазами внедрения кимберлитовых расплавов.

4. Коллекторы удачининской свиты способны формировать неструктурные микрозалежи, что в свою очередь потребует проведения работ по опережающей дегазации. Проектирование дегазационных скважин, расчёт длин кондукторов, опрессовочных давлений и устьевых обвязок необходимо производить согласно выделенных в разрезе удачининской свиты зон [18].

5. Выполненная в рамках данного исследования характеристика выделенных коллекторов в удачининской свите в пределах шахтного поля трубки «Удачная» является основой, как для текущей газодинамической характеристики условий месторождения, так и для последующих исследований и изысканий.

Как уже упоминалось ранее, представленные в данной статье исследования носят пионерный характер и могут быть использованы не только для проектных, предпроектных проработок и разработки технических решений, но и будут интересны для дальнейших исследований в области газовой динамики и углеводородной генерации в условиях платформенных областей в зонах динамического воздействия от внедрения ультраосновных магматических тел.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный, Мирнинская типография, 2013. 568 с.
2. Дроздов А. В., Крамсков Н. П., Дойников Ю. А., Сороченко М. К. К вопросу о предотвращении газодинамических явлений при проходке горных выработок на руднике «Удачный» // *Горный журнал*. 2012. № 12. С. 27–20.
3. Дроздов А. В., Мельников А. И. Прогноз нефтегазоопасных зон на руднике «Удачный» (Якутия) с использованием геосистемного подхода // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН*. 2015. № 4 (53). С. 37–49.
4. Gernon T. M., Sparks R. S. J., Field M. Degassing structures in volcanoclastic kimberlite: Examples from southern African kimberlite pipes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2008. Vol. 174. I. 1–3. P. 186–194
5. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
6. Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.
7. Гавич И. К. Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.
8. Гиниятулин И. М., Блажкун Д. В., Ивашина Е. И. Материалы к легенде Ботуобинской серии листов геологических карт масштаба 1:50000. Министерство геологии РСФСР, Мирный, 1989. 70 с.
9. Янников А. М. Гидродинамическая характеристика удачининской свиты в околотрубочном массиве трубки «Удачная» (РС (Якутия)) // *Строение литосферы и геодинамика: материалы конференции*. Иркутск, 2021. С. 302–304.
10. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С., Трифонов Н. С., Серебряков Е. В., Павлов С. С., Ильин А. В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. DOI:10.5800/GT - 2018 - 9 - 4 - 0393.
11. Янников А. М. Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия). Мирный: АК "АЛРОСА", 2023. 305 с.
12. Костровицкий С. И., Яковлев Д. А. Кимберлиты Якутской кимберлитовой провинции: состав и генезис. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2022. 468 с.
13. Зинчук Н. Н., Специус З. В., Зуенко В. В., Зуев В. М. Кимберлитовая трубка Удачная. Вещественный состав и условия формирования. Новосибирск: Изд-во Новосибирского Университета, 1993. 147 с.
14. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.
15. Бодунов Е. И., Белецкий В. Л., Фрадкин Г. С., Зуева И. Н. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1986, 176 с.
16. Янников А. М. Газодинамическая характеристика коллекторов во внешнем контуре месторождения «трубка Интернациональная» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 4. С. 98–101. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>
17. Янников А. М., Харченко А. В. Дегазационное бурение как эффективный способ разгрузки карбонатных коллекторов вмещающих толщ коренных месторождений алмазов // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 6. С. 88–94. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-88-94
18. Янникова С. А., Янников А. М. Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки "Мир" // *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 3(76). С. 293–300. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300.

Gas-dynamic characteristics of rocks of the Udachnaya formation (ϵ_{1-2}) within the mine field of the Udachnaya pipe (Republic of Sakha (Yakutia))

©2024 A. M. Yannikov¹✉, D. G. Dmitriev^{1, 2}

¹*Institute Yakutniproalmaz ALROSA PJSC, 39 Lenina ul.,
678174, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

²*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The Udachnaya kimberlite pipe requires a comprehensive study of its mining and geological conditions to make underground mining safe. The presence of rock intervals saturated with hydrocarbon gases, natural brines, and caustobiolites requires systematisation of fluid segregation intervals as well as an assessment of the gas-dynamic component. The involvement of production blocks at the level of occurrence of the Udachnaya formation will allow providing the production capacity of the Udachninsky GOK with raw materials for the following 30 years.

Methodology: The study of the main gas-dynamic parameters of the deep horizons of the field was carried out by drilling test wells, for which interval determination of reservoir gas flow rates was carried out, using packer installations and integrated research equipment (CIE). Gas samples were also taken to determine their chemical composition and gas logging was carried out.

Results and discussion: At the levels of the Udachnaya formation, 8 reservoirs were identified in the upper subformation, 7 reservoirs were identified in the lower subformation, which were grouped into 5 zones, differing in thickness, type of fluid saturation and reservoir pressures.

Conclusion: The presence of gas-saturated reservoirs in the section of the Udachnaya formation, providing a significant influx of formation gases to the system of underground mine workings, estimated from the results of studies at a value of ~ 1–2 thousand m³/day, allows indicating the need for early degassing using those already developed technologies at the Udachny mine.

Keywords: Daldyn kimberlite field, Udachnaya pipe, reservoir gases, carbonate reservoirs, degassing, rock drainage.

For citation: Yannikov A. M., Dmitriev D. G. Gas-dynamic characteristics of rocks of the Udachnaya formation (ϵ_{1-2}) within the mine field of the Udachnaya pipe (Republic of Sakha (Yakutia)) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 118–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/118-128>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Kolganov V. F., Akishev A. V., Drozdov A. N. *Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii* [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia]. Mirny, Mirny printing house publ., 2013, 568 p. (In Russ.)
2. Drozdov A. V., Kramskov N. P., Dojnikov Ju. A., Sorochenko M. K. K voprosu o predotvrashhenii gazodinamicheskikh javlenij



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

pri prohodke gornyh vyrabotok na rudnike «Udachnyj» [On the issue of prevention of gas-dynamic phenomena during excavation of mine workings at the Udachny mine]. *Gornyj zhurnal – Mining Magazine*, 2012, vol. 12, pp. 27–20 (In Russ.)

3. Drozdov A. V., Mel'nikov A. I. Prognoz neftegazopasnykh zon na rudnike «Udachnyi» (Yakutiya) s ispol'zovaniem geosistemnogo podkhoda [Forecast of oil and gas hazardous zones at the Udachny mine (Yakutia) using a geosystem approach]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle RAEN – News of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2015, no. 4 (53), pp. 37–49 (In Russ.)

4. Gernon T. M., Sparks R. S. J., Field M. Degassing structures in volcaniclastic kimberlite: Examples from southern African kimberlite pipes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, vol. 174, i. 1–3, pp. 186–194.

5. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU publ., 2008, 507 p. (In Russ.)

6. Klimentov P. P., Kononov V. M. *Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Methods of hydrogeological research]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1978, 408 p. (In Russ.)

7. Gavich I. K. *Osnovy gidrogeologicheskoi stratifikatsii i obrabotki informatsii* [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI publ., 1982, 79 p. (In Russ.)

8. Giniyatulin I. M., Blazhkun D. V., Ivashina E. I. *Materialy k legende Botuobinskoj serii listov geologicheskikh kart masshtaba 1:50000* [Materials for the legend of the Botuobinskaya series of sheets of geological maps at a scale of 1:50000]. Mirny, Ministry of Geology of the RSFSR publ., 1989, 70 p.

9. Yannikov A. M. *Gidrodinamicheskaya kharakteristika udachninskoj svity v okolotrubochnom massive trubki «Udachnaya» (RS (Yakutiya))*. [Hydrodynamic characteristics of the Udachnaya suite in the near-pipe massif of the Udachnaya pipe (RS (Yakutia))] *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy konferentsii* [Structure of the lithosphere and geodynamics: materials of the conference]. Irkutsk, 2021, pp. 302–304. (In Russ.)

10. Alekseev S. V., Alekseeva L. P., Gladkov A. S., Trifonov N. S., Serebryakov E. V., Pavlov S. S., Il'in A. V. Brines in deep

horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, no. 9(4), pp. 1235–1253. (In Russ.) DOI:10.5800/GT-2018-9-4-0393

11. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Daldynskogo kimberlitovogo polya : Respublika Saha (Yakutiya)* [Hydrogeology of the Daldyn kimberlite field: Republic of Sakha (Yakutia)]. Mirny, ALROSA publ., 2023, 305 p. (In Russ.)

12. Kostrovitsky S. I., Yakovlev D. A. *Kimberlity Yakutskoj kimberlitovoj provincii: sostav i genesis* [Kimberlites of the Yakut kimberlite province: composition and genesis.]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences publ., 2022, 468 p. (In Russ.)

13. Zinchuk N. N., Specius Z. V., Zuenko V. V., Zuev V. M. *Kimberlitovaya trubka Udachnaya. Veshchestvennyj sostav i usloviya formirovaniya* [Udachnaya kimberlite pipe. Material composition and formation conditions]. Novosibirsk, Novosibirsk University Publishing House publ., 1993, 147 p. (In Russ.)

14. Kharkiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. *Korennye mestorozhdeniya almazov mira* [Indigenous diamond deposits of the world]. Moscow, Nedra publ., 1998, 555 p. (In Russ.)

15. Bodunov E. I., Beletskii V. L., Fradkin G. S., Zueva I. N. *Geologiya, gidrogeologiya i geokhimiya nefti i gaza yuzhnogo sklona Anabarskoj anteklizi* [Geology, hydrogeology and geochemistry of oil and gas on the southern slope of the Anabar antecline]. Yakutsk, YaF SO AN SSSR publ., 1986, 176 p. (In Russ.)

16. Yannikov A. M. Gas-dynamic characteristics of reservoirs in the outer contour of the "International pipe" field. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, vol. 4, pp. 98–101. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672> (In Russ.)

17. Yannikova S. A., Yannikov A. M. Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons. *Earth sciences and subsoil use*. 2021, vol. 44(3), pp. 293–300. (In Russ.) DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300

18. Yannikov A. M., Kharchenko A. V. Degassing Drilling as an Effective Way to Unload Carbonate Reservoirs of the Host Rock Mass of Primary Diamond Deposits. *Earth of Sciences and subsoil use*, 2021, no. 6, pp. 88–94. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-88-94

Янников Алексей Михайлович, к.г.-м.н., зам. директора по научной работе, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; Российская Федерация; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID 0000-0002-2169-123X

Дмитриев Денис Геннадьевич, зав. сектором прогноза нефтегазопрооявлений на горных предприятиях комплексного отдела горно-геологических проблем разработки месторождений, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; магистр, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: den1s.dmlt@yandex.ru; ORCID 0009-0004-6089-8227

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Aleksey M. Yannikov, PhD in Geol.-Min., Deputy Director for Research Institute "Yakutniproalmaz", "ALROSA" PJSC, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia; Russian Federation; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID 0000-0002-2169-123X

Denis G. Dmitriev, Head of the sector for forecasting oil and gas manifestations at mining enterprises of the integrated department of mining and geological problems of field development, Institute "Yakutniproalmaz", AK "ALROSA" PJSC, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia; master, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: den1s.dmlt@yandex.ru; ORCID 0009-0004-6089-8227

All authors have read and approved the final manuscript.