



Научная статья

УДК 556.334

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>



Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир»

Светлана Александровна Янникова^а, Алексей Михайлович Янников^б

^{а,б}Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

Автор, ответственный за переписку: Янникова Светлана Александровна, yannikovasa@yandex.ru

Резюме. Целью данного исследования являлось изучение газодинамических характеристик глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир» для обеспечения промышленной безопасности при строительстве и возобновлении добычи на месторождении. В основу работы легли проведенные при бурении поинтервальные натурные эксперименты, а также последующее изучение керна. Изучение основных газодинамических параметров глубоких горизонтов месторождения выполнено при бурении опытных скважин, по которым произведено поинтервальное определение расходов пластовых газов с применением пакерных установок и комплексного оборудования для исследования, отбор проб газов для определения их химического состава, также был выполнен газовый каротаж. В результате проведенных работ была сформирована газодинамическая характеристика толбачанской свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир». Выделены интервалы коллекторов, определен характер их флюидонасыщения. Уточнен химический состав пластовых газов, изучен характер и интенсивность газовыделения – как при бурении, так и при проведении поинтервальных испытаний. Итогом проведенных исследований явилось выделение зон, отличных по флюидопроявлениям, а также сопоставление рассматриваемого месторождения с изученным ранее месторождением трубка «Интернациональная». Итоги проведенных работ будут являться основой для выполнения проектных прогнозных расчетов, а также принятия основных проектных решений при строительстве капитальных горных выработок, особенно в части опережающей дегазации горного массива. Учет выделенных в пределах толбачанской свиты зон, отличных по характеру флюидонасыщения, позволит учесть и минимизировать возможные негативные факторы.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Мирнинское кимберлитовое поле, кимберлитовая трубка «Мир», толбачанская свита, малодобитные трещиноватые коллекторы

Для цитирования: 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. С. 293–300. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>.

Original article

Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons

Svetlana A. Yannikova^а, Aleksey M. Yannikov^б

^{а,б}Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Russia

Corresponding author: Svetlana A. Yannikova, yannikovasa@yandex.ru

Abstract. The purpose of the research is to study the gas-dynamic characteristics of deep horizons of the Mir pipe mine field to ensure industrial safety under construction and production resumption at the field. The study is based on the interval field experiments carried out during drilling and subsequent study of the core. The main gas-dynamic parameters of the deep horizons of the field were studied during the drilling of pilot wells that enabled to perform interval determination of the flow rates of formation gases using packers and complex research equipment, gas sampling for the determination of chemical composition of gases, and gas logging. The conducted works resulted in the formulation of the gas-dynamic characteristic of the Tolbachan formation within the mine field of the Mir pipe. Reservoir intervals were identified and the nature of their fluid saturation was determined. The chemical composition of formation gases was clarified and gas release nature and intensity were studied both under drilling and interval testing. The result of the research carried out was identification of zones with different fluid manifestations, as well as comparison of the field under investigation with the previously studied International pipe. The results of the conducted research works will form the basis for performing design forecast calcula-

© Янникова С. А., Янников А. М., 2021



tions, as well as for making the main design decisions under construction of capital mine workings, especially in terms of advanced degassing of the mountain range. Consideration of the zones identified within the Tolbachan formation, which feature different nature of fluid saturation, will allow to take into account and minimize possible adverse factors.

Keywords: Siberian platform, Mirny kimberlite field, Mir kimberlite pipe, Tolbachan formation, small debit fractured reservoirs

For citation: Yannikova S. A., Yannikov A. M. Gas-dynamic characteristics of the host rocks of Mir pipe mine field deep horizons. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):293-300. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300>.

Введение

Кимберлитовая трубка «Мир» вскрыта одним из крупнейших в мире алмазных карьеров. В результате затопления действующего подземного рудника месторождения из-за негативных гидрогеомеханических процессов дальнейшая отработка месторождения связана с возобновлением добычных работ, в том числе и на глубинах 1000–1400 м от дневной поверхности.

При переходе подземных горных работ на большие глубины возникают проблемы освоения месторождений, связанные с повышением горного давления, газо- и гидродинамическими явлениями, что обуславливает развитие геотехнологий, учитывающих возникновение опасных зон разрушений массива [1–3]. В связи с этим первостепенной задачей при строительстве и возобновлении добычи становится обеспечение промышленной безопасности работ. Важной составляющей данной задачи является изучение газодинамических условий месторождения с детальностью, обеспечивающей выполнение расчетов погоризонтных притоков пластовых газов.

Согласно проведенным ранее исследованиям, главным объектом, осложняющим добычные работы на глубинах 1000–1400 м от дневной поверхности, для трубки «Интернациональная» – месторождения, находящегося с изучаемым месторождением в рамках одного кимберлитового поля, является толбачанский водоносный комплекс, приуроченный к одноименной свите [4]. Имеющаяся в настоящее время информация о газодинамических условиях в интервале толбачанской свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир» недостаточна. В связи с этим целью данной работы выбрана газодинамическая характеристика толбачанской свиты в пределах околотрубного пространства трубки «Мир» – коренного месторождения алмазов, относящегося к мирнинскому кимберлитовому полю,

входящему в якутскую алмазоносную провинцию [4]. Освоение месторождения осложнено суровыми природно-климатическими условиями и специфическими факторами: большой глубиной карьера, газовостью, водопритоками [5, 6].

Изучаемое месторождение является главным в одноименном кимберлитовом поле и характеризуется уникальными параметрами алмазоносности и ценности добываемого сырья. Его открытие послужило точкой отсчета в становлении алмазодобывающей промышленности в целом. Дальнейшая отработка данного месторождения связана с возобновлением добычи подземным способом [7–12].

Материалы и методы исследования

В процессе сопровождения бурения в период с 2019 по 2020 гг. было выяснено, что глубина залегания кровли от дневной поверхности объекта изучения – толбачанской свиты – в пределах шахтного поля трубки «Мир» составляет 1030 м (абсолютная отметка кровли – -690 м). Определение кровли толбачанской свиты в процессе бурения не представляет большой сложности в связи с наличием регионального маркера – маломощного пласта каменной соли. Глубина залегания подошвы определялась только после уточнения и корреляции выполненных полевых исследований керна и комплекса геофизических исследований скважин. В результате было установлено, что подошва свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир» находится на глубине 1410 м от дневной поверхности (абсолютная отметка – -1072 м). Толбачанская свита согласно залегает на породах эльганской свиты, перекрыта породами олекминской свиты [13, 14].

После выделения границ толбачанской свиты в разрезе был выполнен комплексный



анализ проведенных поинтервальных испытаний, постановки комплексного оборудования для исследования, газового каротажа, а также сопоставление химического состава природных газов, определенных по отобраным пробам в процессе выполнения бурения. Выделение коллекторов основывалось на качественной интерпретации проведенного комплекса геофизических исследований скважин, полевых исследований кернового 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 было выполнено семь постановок. Рассмотрим каждую из них в отдельности.

Первая постановка выполнена в интервале 1031–1101 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 1–5. Время открытого периода составило 150 мин., время закрытого – 300 мин. Время открытого и закрытого периодов при всех последующих испытаниях было неизменным. Замеренное пластовое давление составило 44 кгс/см², дебит пластовых газов – менее 10 м³/сут.

Вторая постановка выполнена в интервале 1085–1144 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 5 и 6. Замеренное пластовое давление составило 97 кгс/см², дебит пластовых газов – менее 10 м³/сут.

Третья постановка выполнена в интервале 1124–1197 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 7 и 8. Замеренное пластовое давление составило 143,4 кгс/см², дебит пластовых газов – 72,3 м³/сут.

Четвертая постановка выполнена в интервале 1182–1249 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 9 и 10. Замеренное пластовое давление составило 122,2 кгс/см², дебит пластовых газов – 136,5 м³/сут.

Пятая постановка выполнена в интервале 1244–1301 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 10–12. Замеренное пластовое давление составило 150 кгс/см², дебит пластовых газов – 134 м³/сут.

Шестая постановка выполнена в интервале 1297–1349 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 12–14. Замеренное пластовое давление составило 139,2 кгс/см², дебит пластовых газов – 20,5 м³/сут.

Седьмая постановка выполнена в интервале 1344–1401 м от дневной поверхности. Проведены испытания коллекторов № 14–17. Замеренное пластовое давление составило 143,5 кгс/см², дебит пластовых газов – 136,5 м³/сут.

Результаты исследования и их обсуждение

Литологический состав толбачанской свиты (С₁ тб) в пределах шахтного поля трубки «Мир» по основным литотипам идентичен составу вмещающих пород трубки «Интернациональная». Свита сложена преимущественно карбонатными породами, представленными известковистыми, окремнелыми, глинистыми доломитами, а также доломитами различной степени пелитоморфности. Галогенные и терригенно-карбонатные породы занимают подчиненное положение [9, 15]. Выполненное ранее, в предыдущих исследованиях, разделение свиты на две пачки [4] справедливо и для изучаемой площади:

– нижняя пачка – карбонатная, представлена плотными мелко-тонкозернистыми доломитами, слоистыми доломитами с прослоями глинистых доломитов и засоленных доломитов и ангидритов; нефтенасыщенность проявляется в виде пятен (выпоты по трещинам, порам) темно-коричневого цвета;

– верхняя пачка – галогенно-карбонатная мощностью 125 м, с соленасыщенностью до 50 %, с включениями твердых битумов; в разрезе пачки выделяется 9 пластов каменной соли суммарной мощностью более 60 м.

Необходимо отметить, что верхняя пачка не обладает каким-либо значимым флюидонасыщением и по своей сути является водупором для насыщенных хлоридно-кальциевых рассолов толбачанской свиты и «покрышкой» для формирования неструктурных газовых скоплений и газонасыщенных коллекторов.

Наличие в пределах шахтного поля трубки «Мир» тектонических нарушений способствует образованию неструктурных литолого-



тектонически экранированных скопления углеводородных газов, но данные скопления будут иметь весьма ограниченные размеры, что зависит от литолого-фациальных особенностей объекта изучения [16].

Газодинамическая характеристика отложения толбачанской свиты осуществлена на основе исследований, проведенных в 2019–2020 гг. по скважине № 309, так как данная скважина вскрыла отложения на полную мощность. По результатам интерпретации проведенных исследований в пределах шахтного поля трубки «Мир» было выделено 17 пластов-коллекторов, 6 из которых являются газонасыщенными, а 11 – сложной флюидной насыщенности, так как содержат природные рассолы, углеводородные газы, мальты и нефти.

Выделенные коллекторы состоят из отдельных пропластков, всего по результатам полевых исследований керна и интерпретации проведенного комплекса геофизических исследований скважин был выделен 41 интервал, характеризующийся коллекторскими свойствами. Мощность отдельных пластов-коллекторов изменяется от 0,2 до 12 м. Характеристика выделенных коллекторов приведена в табл. 1.

В результате комплексного анализа проведенных работ в разрезе толбачанской свиты шахтного поля трубки «Мир» было выделено

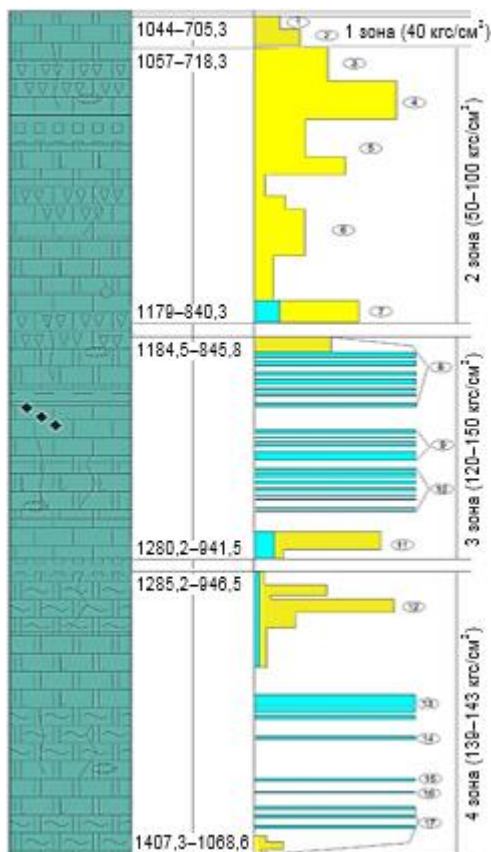
четыре зоны, различные по флюидонасыщению и величине пластовых давлений. Каждая зона характеризуется сложным строением и состоит из нескольких характеристических интервалов (рисунок).

Зона № 1 выделяется в интервале 1044–1057 м (абсолютные отметки – -705,3 / -718,3 м) и характеризуется наименьшим пластовым давлением, равным 40 кгс/см², состоит из коллекторов № 1 и 2. Несмотря на низкую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне возможно накопление микрозалежей пластовых газов, обусловленное наличием открытой трещиноватости.

Зона № 2 располагается в интервале 1057–1179 м (абсолютные отметки – -718,3 / -840,3 м). Пластовое давление в пределах зоны изменяется от 50 до 120 кгс/см². Наиболее напорным является коллектор № 7, так как он имеет смешанную рассольно-газовую насыщенность. Зона включает коллекторы № 3–7. Несмотря на невысокую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне также возможно формирование «дополнительной емкости» и, следовательно, объемов пластового газа и природного насыщенного рассола. Впрочем, данное замечание справедливо и для следующих зон.

Таблица 1. Характеристика коллекторов толбачанского комплекса
Table 1. Characteristics of the Tolbachan formation reservoirs

Номер коллектора	Кровля, м	Подошва, м	Мощность, м	Пористость, %	Примечание
1	1044	1049,5	3,8	2–7	Газонасыщенный
2	1050,2	1055,1	4	6–9	Газонасыщенный
3	1057	1068	7,6	7–15	Газонасыщенный
4	1070	1085,8	9,9	8–20	Газонасыщенный
5	1089,2	1113	22,1	4–18	Газонасыщенный
6	1114	1160	24,8	5–12	Газонасыщенный
7	1162	1179	7,8	8–20	Газо-водонасыщенный
8	1184,5	1208,8	13,6	11–26	Газо-водонасыщенный
9	1218,8	1240	11,8	7–12	Водонасыщенный
10	1242,8	1254,8	9,5	4–14	Водонасыщенный
11	1262,6	1280,2	8,2	7–24	Газо-водонасыщенный
12	1291,8	1300,8	5,4	4–16	Газо-водонасыщенный
13	1316	1326,8	5	5–16	Водонасыщенный
14	1336	1346,8	8	8–26	Водонасыщенный
15	1354,2	1355,6	1,4	10–19	Водонасыщенный
16	1373	1379,4	1,6	11–20	Водонасыщенный
17	1385,4	1395	3,8	9–37	Газо-водонасыщенный



Расположение и взаимоотношение (в разрезе) выделенных зон (голубое – вода, желтое – газ)
Location of identified zones and their relationship (in section)
(water is marked with blue, gas – with yellow)

Зона № 3 выделяется в интервале 1184,5–1280,2 м (абсолютные отметки – -845,8 / -941,5 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 120–150 кгс/см². Зона включает коллекторы № 8–11. Данная зона является более газо- и водообильной, чем зоны № 1 и 2. Отличительной особенностью отложений толбачанской свиты в пределах около-трубного пространства кимберлитовой трубки «Мир» является отсутствие «сухих» коллекторов. Коллекторы № 10 и 11 имеют

смешанный тип насыщения и пластовое давление, превышающее давление коллекторов-аналогов (трубки «Интернациональная») в четыре раза.

Зона № 4 находится в интервале 1285,2–1407,3 м (абсолютные отметки – -946,5 / -1068,6 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 139–143 кгс/см². Зона включает коллекторы № 12–17. Газонасыщенность данной зоны сопоставима с газонасыщенностью зоны № 3, водонасыщенность же ее выше на 20–30 %.

Как видно из приведенного описания, данные зоны отличаются друг от друга пластовым давлением, причем его изменение не обусловлено глубиной залегания коллекторов, что подтверждает правильность выделения в пределах толбачанской свиты именно водоносного комплекса, так как изучаемый объект обладает всеми необходимыми качественными и количественными характеристиками¹.

Природные пластовые газы углеводородного состава, содержащиеся в коллекторах толбачанской свиты, и их химический состав приведены в табл. 2.

Заключение

На основе обработки и анализа выполненных полевых работ и экспериментов, изучения результатов натурных наблюдений и результатов опробования с их последующей интерпретацией правомерным будет сделать ряд следующих выводов и обобщений.

1. Подтверждена газонасыщенность пород толбачанской свиты, произведено выделение газонасыщенных коллекторов, что в свою очередь позволяет говорить о существенной роли объекта изучения в формировании сложных условий отработки запасов трубки «Мир».

Таблица 2. Результаты химических анализов проб пластовых газов (скважина 309)
Table 2. Results of chemical analyses of formation gas samples (well 309)

Свита	Интервал: от дневной поверхности а.о., м	Среднее содержание компонента в пробе, объемная доля, %				
		СН ₄ (метан)	С ₂ Н ₆ (этан)	С ₃ Н ₈ (пропан)	С ₄ Н ₁₀ (бутан)	С ₅ Н ₁₂ (пентан)
Толбачанская	1033,0–1408,8 м -694,3 / -1070,1 м	93,99	5,25	0,60	0,13	0,03

¹ Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований: учебник для студентов. М.: Высшая школа, 1989. 448 с.



2. В целом по разрезу нижняя карбонатная пачка толбачанской 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. Это проявляется в значительной неоднородности строения. Интенсивно проявившиеся процессы залечивания первичных пустот кальцитом, ангидритом, солью, а также перекристаллизации первичного осадка значительно усложнили строение порового пространства, за счет чего высокопористые разности частично утратили свою емкость. Процессы доломитизации, выщелачивания и трещинообразования обеспечили развитие дополнительных видов пустот, способствовали формированию сложных типов коллекторов и, следовательно, формированию «линз-микроразлегов».

3. Коллекторы толбачанской свиты характеризуются достаточно высокой газообильностью и высокими пластовыми давлениями. В связи с этим при дальнейшей разработке глубоких горизонтов в отложениях толбачанской свиты необходимо предусматривать опережающее бурение для раздегазации вмещающего массива. Проектирование дегазационных скважин, расчет длин кондукторов, опресовочных давлений и устьевых обвязок необходимо производить с учетом выделенных в разрезе толбачанской свиты зон [17–19].

4. Характеристика и выделение коллекторов в толбачанской свите в пределах шахтного поля трубки «Мир» является основой как для текущей газодинамической характеристики условий месторождения, так и для последующих исследований, направленных на повышение детализации [20], необходимой для учета особенностей структурно-тектонического строения объекта изучения.

Список источников

1. Айнбиндер И. И., Каплунов Д. Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 5–19. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19>.
2. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Красюкова Е. В. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 48–60.
3. Vokhmin S. A., Trebush Yu. P., Kurchin G. S., Mayorov E. S., Zajtseva K. V. Peculiarities in setting norms of extraction in underground mining of diamond ore // Universal Journal of Engineering Science. 2014. Vol. 2. Iss. 2. P. 39–42. <https://doi.org/10.13189/ujes.2014.020201>.
4. Янников А. М. Газодинамическая характеристика коллекторов во внешнем контуре месторождения «трубка Интернациональная» // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2018. № 4. С. 98–101. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>.
5. Davis G. A., Newman A. M. Modern strategic mine planning // Proceedings of the Australian Mining Technology Conference. Carlton, 2008. P. 129–139.
6. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 9. С. 151–160. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160>.
7. Jakubec J. Kimberlite emplacement models – the implications for mining projects // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008. Vol. 174. Iss. 1-3. P. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.038>.
8. Агринский А. В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии. 1980. № 135. С. 48–57.
9. 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.
10. Hustralid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining // Mining Engineering. 1987. Vol. 39. Iss. 2. P. 119–123.
11. Акишев А. Н., Зырянов И. В., Шубин Г. В., Тарасов П. И., Журавлев А. Г. Техничко-технологический комплекс для доработки запасов на глубинных горизонтах алмазорудных карьеров // Горный журнал. 2012. № 12. С. 39–43.
12. Дроздов А. В., Колганов В. Ф. Акишев А. Н. Горно-геологические особенности алмазных месторождений Якутии. LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 576 с.
13. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР / ред. Л. И. Ефимов, И. К. Зайцев. М.: Недра, 1970. 384 с.
14. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia // International Geology Review.



1994. Vol. 36. Iss. 1. P. 42–61. <https://doi.org/10.1080/00206819409465448>.

15. Фукс А. Б., Фукс Б. А. Причины различных пластовых давлений в газоконденсатных залежах Непского свода // Геология нефти и газа. 1976. № 10. С. 48–54.

16. Ваганов В. И. Алмазные месторождения России и мира. М.: Геоинформмарк, 2000. 396 с.

17. Крайча Я. Газы в подземных водах: их свойства, разведка и использование / пер. с чешск.. М.: Недра, 1980. 343 с.

18. Ганченко М. В., Акишев А. Н., Бахтин В. А. Определение границ и оптимизация технологических

параметров открытых горных работ // Горный журнал. 2005. № 7. С. 77–80.

19. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources // Journal of Sustainable Mining. 2013. Vol. 12. Iss. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>.

20. Анохин Р. В., Петров А. Н. Первый опыт применения слоевой системы разработки с увеличенными параметрами очистных выработок на руднике «Интернациональный» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 12. С. 11–15.

References

1. Aynbinder I. I., Kaplunov D. R. Risk-based approach to selection of deep-level mining technology. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;4:5-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19>.

2. Ainbinder I. I., Patskevich P. G., Krasnyukova E. V. Substantiation of dangerous area parameters in the combined development of kimberlite deposits of Yakutia. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of the Tula State University*. 2019;3:48-60. (In Russ.).

3. Vokhmin S. A., Trebush Yu. P., Kurchin G. S., Mayorov E. S., Zaitseva K. V. Peculiarities in setting norms of extraction in underground mining of diamond ore. *Universal Journal of Engineering Science*. 2014;2(2):39-42. <https://doi.org/10.13189/ujes.2014.020201>.

4. Yannikov A. M. The gasdynamic characteristic of the collectors in external circuit of field the “tube International”. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2018;4:98-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>.

5. Davis G. A., Newman A. M. Modern strategic mine planning. *Proceedings of the Australian Mining Technology Conference*. Carlton; 2008. p.129–139.

6. Sokolov I. V., Antipin Yu. G., Nikitin I. V. Basic principles and assessment criteria of technological strategy for underground mining in transition zones. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;9:151-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160>.

7. Jakubec J. Kimberlite emplacement models – the implications for mining projects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2008;174(1-3):20-28. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.038>.

8. Agrinskii A. V. The results of studying hydrogeological conditions under the exploration of one of Western Yakutia kimberlite pipe. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrogeologii i inzhenernoi geologii*. 1980;135:48–57. (In Russ.).

9. Drozdov A. V., Kramskov N. P., Doinikov Yu. A., Sorochenko M. K. To the question about the prevention of gas-dynamic phenomena, during the excavation develop-

ment at the “Udachnyy” mine. *Gornyi zhurnal*. 2012;12:27–20. (In Russ.).

10. Hustralid W. A., Seegmiller B., Stephansson O. In-the-wall haulage for open-pit mining. *Mining Engineering*. 1987;39(2):119-123.

11. Akishev A. N., Zyryanov I. V., Shubin G. V., Tarasov P. I., Zhuravlev A. G. Technical and engineering complex for the reserves improvement on the deep horizons of diamondiferous open pits. *Gornyi zhurnal*. 2012;12:39-43. (In Russ.).

12. Drozdov A. V., Kolganov V. F. Akishev A. N. *Mining-geological peculiarities of primary deposits of Yakutian diamonds*. LAP Lambert Academic Publishing; 2015. 576 p. (In Russ.).

13. Efimov L. I., Zaitsev I. K. *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 20. Yakut ASSR. Moscow: Nedra; 1970. 384 p. (In Russ.).

14. Sobolev V. N., Taylor L. A., Snyder G. A., Sobolev N. V. Diamondiferous eclogites from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *International Geology Review*. 1994; 36(1):42-61. <https://doi.org/10.1080/00206819409465448>.

15. Fuks A. B., Fuks B. A. Causes of various reservoir pressures in the gas condensate deposits of the Nepa uplift. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1976;10:48-54. (In Russ.).

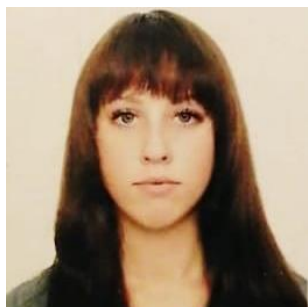
16. Vaganov V. I. *Diamond deposits in Russia and in the world*. Moscow: Geoinformmark; 2000. 396 p. (In Russ.).

17. Kraja J. Gases in groundwater. their properties, exploration and use. 1980. 343 p. (Russ. ed.: *Gazy v podzemnykh vodakh: ikh svoistva, razvedka i ispol'zovanie*. Moscow: Nedra; 1980. 343 p.).

18. Ganchenko M. V., Akishev A. N., Bakhtin V. A. Determination of the borders and optimization of technological parameters in opencast mining works. *Gornyi zhurnal*. 2005;7:77-80. (In Russ.).

19. Dubiński J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*. 2013;12(1):1-6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>.

20. Anokhin R. V., Petrov A. N. Pilot application experience of a layered mining system with increased parameters of stope workings at the International mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;12:11-15. (In Russ.).

**Информация об авторах / Information about the authors**

Янникова Светлана Александровна,
ведущий инженер Лаборатории горно-геологических
проблем разработки месторождений,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
yannikovasa@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>.

Svetlana A. Yannikova,
Leading Engineer of the Laboratory of Mining and Geological
Problems of Field Development,
Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA,
Mirny, Russia,
yannikovasa@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>.



Янников Алексей Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией горно-геологических
проблем разработки месторождений,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
yannikov90@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>.

Aleksey M. Yannikov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development,
Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA,
Mirny, Russia,
yannikov90@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 26.03.2021; одобрена после рецензирования 14.07.2021; принята к публикации 19.08.2021.

The article was submitted 26.03.2021; approved after reviewing 14.07.2021; accepted for publication 19.08.2021.