



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 553.41:551.2.01(571.51)

EDN: MFIMTQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34



Применение изотопно-геохимических критериев при диагностике генезиса газовых систем Олимпиадинского золоторудного месторождения

А.А. Ковалев^a, В.А. Карпов^b, В.А. Макаров^c, Н.Л. Падалко^d

^aООО Центр геотехнологических исследований «Прогноз», г. Красноярск, Россия

^bАО «Полюс Красноярск», г. Красноярск, Россия

^cСибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

^dАО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск, Россия

Резюме. Авторами исследованы современные газопроявления, пространственно сопряженные с рудными месторождениями Каитыбинской литолого-фациальной зоны Енисейского кряжа. Цель данного исследования заключалась в получении научно обоснованных данных о генезисе газообразных и парообразных флюидов различных природных сред опробования карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения: горных пород, природных вод, газов свободного выделения из буровзрывных скважин и воздуха приземной атмосферы. Выполнен комплекс полевых и аналитических работ: дегазация, газовая хроматография, пиролиз органического вещества литифицированных и метаморфизованных отложений, анализ изотопного состава углерода углекислого газа и метана флюидальных систем. Для изучения нормального газо-геохимического поля (естественного фона) района работ проведена атмо-геохимическая съемка на эталонном участке, экологически «чистом» полигоне с минимальным влиянием техногенных факторов. Установлено, что приземная атмосфера полигона обязана своим формированием ландшафтным и геоморфологическим условиям участка Каитыбинской литолого-фациальной зоны, флюидальным системам глубоких горизонтов, которые благодаря наличию разветвленной сети дизъюнктивных нарушений и диффузионно-фильтрационным процессам массопереноса достигли зоны поискового геохимического зондирования. В результате пиролитических исследований пород доказано, что в пределах вскрытого разреза карьера «Восточный» органическое вещество отложений кординской свиты нижнего рифея реализовало свой нефтегазогенерационный потенциал и не может служить источником формирования аномальных газовых полей Олимпиадинского месторождения. Изученные газовые системы имеют полигенную природу, являются аллохтонными по отношению к вмещающим отложениям, сформированы без участия газов верхней газогенерирующей (био)зоны, по изотопно-геохимическим критериям это главным образом эндогенные и нафтидогенные флюиды, идентичные газоконденсатным скоплениям Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции.

Ключевые слова: газовые системы, газопроявления, генезис, Енисейский кряж, изотопные исследования, нефтегазогенерационный потенциал, органическое вещество пород, Олимпиадинское месторождение

Для цитирования: Ковалев А.А., Карпов В.А., Макаров В.А., Падалко Н.Л. Применение изотопно-геохимических критериев при диагностике генезиса газовых систем Олимпиадинского золоторудного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 17–34. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34>. EDN: MFIMTQ.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

Original article

Using isotope-geochemical criteria for Olympiadinskoye gold deposit gas system genesis diagnosis

Artem A. Kovalev^a, Victor A. Karpov^b, Vladimir A. Makarov^c, Nataliy^a L. Padalko^d

^aLLC CGI “Prognoz”, Krasnoyarsk, Russia

^bJSC “Polyus Krasnoyarsk”, Krasnoyarsk, Russia

^cSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^dJSC “SNIGG and MS”, Novosibirsk, Russia

© Ковалев А.А., Карпов В.А., Макаров В.А., Падалко Н.Л., 2024



Abstract. The authors studied modern gas manifestations spatially associated with the ore deposits in the Kaitbinskaya lithological-facies zone of the Yenisei Ridge. The purpose of the research is to obtain scientifically based data on the genesis of gaseous and vaporous fluids in various sampling environments of the Vostochny open-pit mine of the Olympiadinskoye gold deposit: rocks, natural waters, free-flowing gases from blastholes and air of the surface atmosphere. It has been conducted a complex of field and analytical works including degassing, gas chromatography, pyrolysis of the organic substance of lithified and metamorphosed deposits, analysis of carbon isotopic composition in carbon dioxide and methane in fluidal systems. In order to study normal gas-geochemical field (natural background) of the work area an atmospheric geochemical survey was carried out at the reference site – an “environmentally friendly” site with the minimal influence of technogenic factors. It has been determined that the surface atmosphere of the site had been formed due to the landscape and geomorphological conditions of the Kaitbinskaya lithological-facies zone as well as fluidal systems of deep horizons. The latter, due to the presence of an extensive network of disruptive disturbances and diffusion-filtration processes of mass transfer reached the zone of exploratory geochemical sounding. The conducted pyrolytic studies of rocks have proved that within the open section of the Vostochny open-pit mine the organic substance of the Kordinskaya series of the lower Riphean deposits has implemented its oil and gas generation potential and cannot serve the formation source of abnormal gas fields of the Olympiadinskoye gold deposit. The studied gas systems are polygenic in nature and, being allochthonous to the host sediments, are formed without the participation of gases from the upper generating (bio) zone. According to isotope-geochemical criteria, these are mainly endogenous and naphthidogenic fluids identical to the gas condensate accumulations of the Yurubcheno-Tokhomskaya oil and gas accumulation zone.

Keywords: gas systems, gas manifestations, genesis, Yenisei Ridge, isotope studies, oil and gas generation potential, organic substance of rocks, Olympiadinskoye deposit

For citation: Kovalev A.A., Karpov V.A., Makarov V.A., Padalko N.L. Using isotope-geochemical criteria for Olympiadinskoye gold deposit gas system genesis diagnosis. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2024;47(1):17-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-17-34>. EDN: MFIMTQ.

Введение

Олимпиадинское месторождение является крупнейшим на территории Енисейского края и одним из самых масштабных золоторудных объектов в России и в мире. Месторождение расположено в пределах Верхне-Енашиминского рудного узла, приуроченного к Каитьбинской литолого-фациальной зоне. Флюидный режим формирования золотоносных зон детально освещен в работах, посвященных определению параметров рудогенеза и характеристике составляющих газо-жидкостных включений, в том числе окклюдированных углеводородных и неуглеводородных соединений в кварце руд и вмещающих пород [1, 2].

На этапе доразведки месторождения при бурении одной из скважин в контуре карьера «Восточный» зафиксирован самопроизвольный перелив промывочной жидкости, сопровождавшийся интенсивным газовыделением. По данным санитарно-промышленной лаборатории горного предприятия, в составе газа определены углеводородные и неуглеводородные компоненты с содержанием пожаро-взрывоопасных соединений, в основном метана, до 9,5–18 % об. [1, 3].

Согласно действующим нормативным документам (Федеральные нормы и правила¹ и др.), с целью прогноза возникновения «внештатных ситуаций» фрагментарный анализ

свободных газов на рудных месторождениях выполнялся и выполняется промышленными газоанализаторами; вместе с тем до настоящего времени комплексных научных исследований современного газового потока на объектах Енисейского края не проводилось.

Целью исследования являлось получение научно-обоснованных данных о генезисе современных проявлений газообразных и парообразных флюидов на Олимпиадинском золоторудном месторождении на основе изучения изотопно-геохимических критериев – качественных параметров, количественных характеристик и изотопных показателей составляющих газовых смесей различных природных сред.

В карьере «Восточный» детально рассмотрены газовые системы: сорбированные минеральной частью отложений кординской свиты (R_{1kd}); растворенные в природных (подземных) водах; свободно выделяющиеся из буровзрывных скважин; приземной атмосферы. Изучен остаточный нефте-, газогенерационный потенциал органического вещества вскрытых отложений.

Материалы и методы исследования

При изучении современных газовых систем природных объектов Олимпиадинско-

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» // Docs.cntd.ru. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 26.02.2024).



го золоторудного месторождения применен комплекс методов, разработанный на основе опыта и наработок при исследовании природных газов рудных месторождений [4, 5], а также методических подходов к разностадийным геохимическим поискам нефти и газа². Научно-исследовательская работа включала определение качественного состава и количественных характеристик свободных, растворенных в водах и сорбированных породой газовых систем, изотопного состава углерода углекислого газа и метана, пиролитических характеристик органического вещества пород в варианте Rock-Eval [6].

Газо-геохимическая съемка приземной атмосферы экологически «чистого» полигона. Для получения данных о нормальном газо-геохимическом поле вариациям в пространстве количественных показателей и компонентном составе воздушных газовых систем района исследований проведена атмогеохимическая съемка [7] на эталонном полигоне с минимальным влиянием, по розам ветров, техногенных факторов (рис. 1).

Исследования проводились в летний и зимний периоды на пятикилометровом участке, расположенном в горно-таежной местности, на значительном удалении от основных техногенных объектов – золоторудных месторождений Олимпиадинское, Благодатное и Эльдorado.

В карьере «Восточный» выполнено газо-керновое опробование пород раннерифейских отложений кординской свиты (R₁kd) и водногазовое флюидов буровзрывных, наблюдательных и дренажных гидрогеологических скважин. Изучены свободные газы, спонтанно выделявшиеся из буровзрывных скважин и содержащиеся в воздухе рабочей зоны горного сооружения.

Газо-керновое опробование. Для анализа газов, сорбированных породами, в контуре карьера Восточный отобран керн по разрезу разведочной скважины в интервале 0,3–370 м с шагом 10–30 м, который уменьшался до 2–3 м при наличии трещиноватости пород, обуславливающей повышенные фильтрационно-емкостные параметры керна, а также при смене литологического состава отложений.

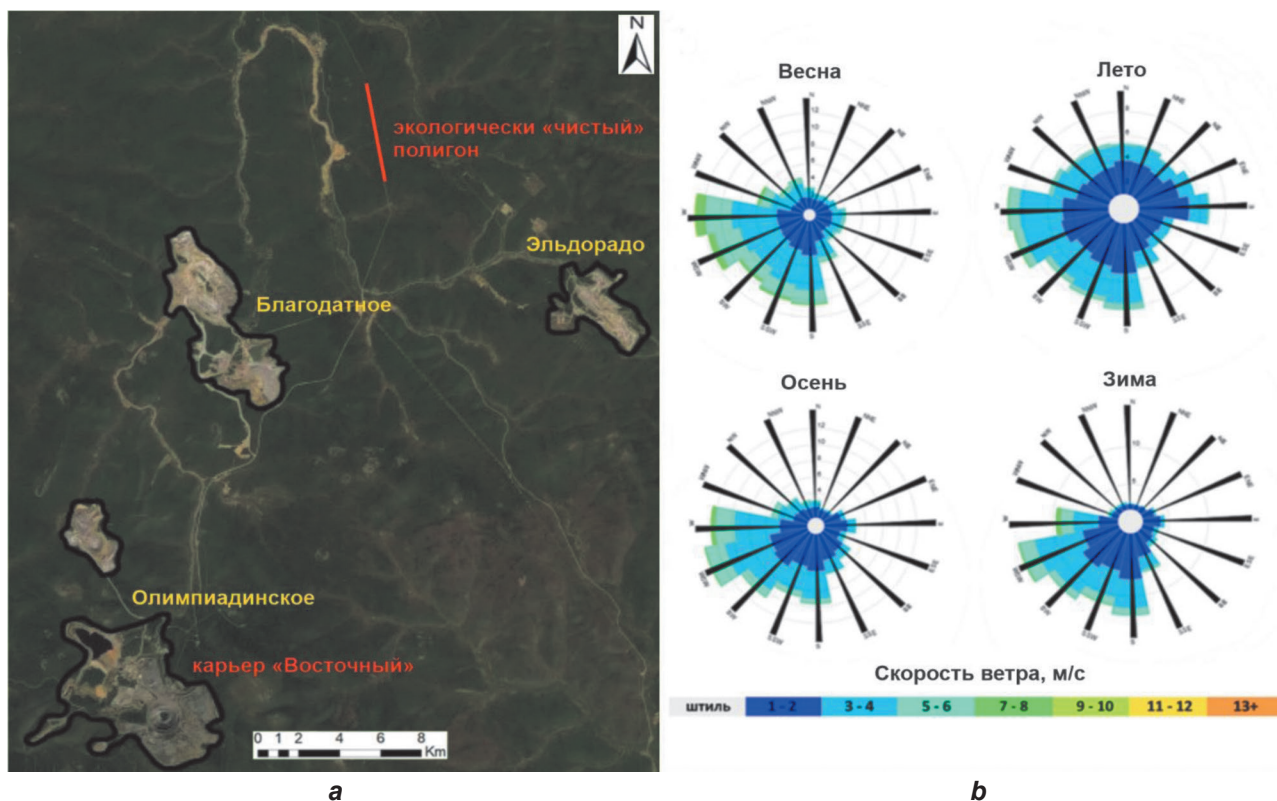


Рис. 1. Схема расположения экологически «чистого» полигона (а) и сезонные розы ветров Северо-Енисейского района (по данным Красгидромета) (б)

Fig. 1. The layout of the "environmentally-friendly" testing area (a) and seasonal wind roses of the Severo-Yeniseysky District (according to Krashydromet data) (b)

² Зорькин Л.М., Лопатин Н.В., Барташевич О.В. Методические рекомендации по геохимическим методам поисков месторождений нефти и газа. М.: Изд-во отдела научно-технической информации ВНИИЯГГ, 1975. 285 с.



Отбор вод с целью изучения растворенных газов. Для решения вопроса о вкладе водорастворенных газов в общий газовый баланс нижних слоев приземной атмосферы предусматривалось исследование вод из буровзрывных (шаг 10–20 м), дренажных и мониторинговых гидрогеологических скважин (отбор из приустьевых частей).

Десорбция предварительно герметизированных образцов керна и природных (подземных) вод проводилась методом термовакуумной дегазации в полевой лаборатории на приборе ПДП-М, согласно методическим рекомендациям [7].

Отбор газовых смесей свободного выделения из буровзрывных скважин. Исследования газовых систем, спонтанно выделяющихся из пород и вод буровзрывных скважин глубоких горизонтов карьера «Восточный», выполнялись согласно разработанной авторами методике с герметизацией устьев скважин паккерами (рис. 2). В зависимости от конкретной горно-геологической обстановки, шаг опробования между скважинами изменялся от 5 до 25 м, а расстояние между профилями составляло около 30 м.

Исследования приземной атмосферы в карьере «Восточный». Основная цель данных работ – изучение пространственно-временных вариаций качественного состава и объемных характеристик составляющих газовых полей в рабочей зоне карьера в зависимости от климатических и конкретных горно-геологических

условий. Отбор проб воздуха эксплуатационных горизонтов карьера осуществлен аналогично опробованию приземной атмосферы на экологически «чистом» полигоне. При газовой съемке в каждый из сезонов (зима, лето) отбирались газы вдоль кольцевых участков бермы, с шагом от 70 до 130 м.

Газохроматографические исследования. Комплекс химико-аналитических работ выполнен в аккредитованной международной Ассоциации аналитических центров «Аналитика» (№ AAC.A.00067) химико-аналитической лаборатории ООО «Центр геотехнологических исследований «Прогноз»» (г. Красноярск). Газовые системы анализировались в соответствии с аттестованной методикой³ на программно-аналитическом комплексе «Кристалл – Хроматек-5000.2» с пламенно-ионизационным детектором и двумя детекторами по теплопроводности с пределами измерений от $n \cdot 10^{-6}$ до 98 % об.

Исследования изотопного состава углерода метана и углекислого газа. Измерения изотопного состава углерода выполнены в лаборатории изотопных методов Томского филиала АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», аккредитованного в национальной системе аккредитации (№ RA.RU.517930) по аттестованной методике⁴ на масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE фирмы Thermo Finnigan (Германия). В качестве эталонов использованы стан-



а
б
Рис. 2. Газовый пробоотборник в комплекте с пакером (а)
и установка пакера в ствол буровзрывной скважины (б)

Fig. 2. Gas sampler with a packer (a) and installation of the packer in the blasthole (b)

³ Методика выполнения измерений объемной доли углеводородных (C1–C6) и неуглеводородных (кислород, азот, водород, диоксид углерода, гелий) компонентов в приземной атмосфере и в природных газовых системах, извлеченных из горных пород и вод при геологоразведочных работах (ГРП) на нефть и газ. МВИ № СПЭК-01-2009/ЭТ-ГХ-01-09: ФР.1.31.2017.27366. Красноярск, 2009.

⁴ Методика выполнения измерений смещения изотопного состава углерода в пробах природных газов методом масс-спектрометрии: ФР.1.31.2010.07129. СПб., 2010.



дарты Международного агентства по атомной энергии и аттестованные образцы сравнения по углероду. Полученные значения изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) приведены относительно международного стандарта VPDB, представляющего собой карбонат кальция белемнита позднемелового возраста из формации Пи-Ди (Южная Каролина). Погрешность изотопных анализов с учетом химической подготовки не превышала $\pm 0,5 \text{ ‰}$.

Пиролитические исследования пород. Работы с целью изучения остаточного газо-генерационного потенциала органического вещества вмещающих пород осуществлены в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН) на пироллизаторе Source Rock Analyzer в варианте Rock-Eval [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Газогеохимические и изотопные характеристики изученных газовых систем приземной атмосферы эталонного полигона и различных сред в карьере «Восточный» приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, для большей части изученных газовых систем Каитыбинской литолого-фациальной зоны характерен углекислотно-кислородно-азотный состав. Исключением является часть газов, полученных при самодегазации буровзрывных скважин и водорастворенных газов, извлеченных методом термовакuumной дегазации, с метан-кислородно-азотным составом.

Экологически «чистый» полигон. На эталонном участке (полигоне) опробование выполнено в летний и зимний периоды. Всего исследовано 109 проб воздушных газовых систем.

Основными неуглеводородными компонентами приземной атмосферы эталонного полигона являются: азот, кислород, углекислый газ, водород и гелий. Объемные значения кислорода, азота и гелия характеризуются низкой вариабельностью, а их среднестатистические показатели, близки к кларковому содержанию данных компонентов в атмосферном воздухе (см. табл. 1). Вместе с тем средние содержания углекислого газа и водорода приземной атмосферы кратно превышают справочные значения и варьируют от летнего сезона к зимнему от 0,27 до 0,37 % об. и от 0,06 до 0,014 % об. соответственно.

В летний сезон углеводородная часть газовых систем состоит из метана и его высокомолекулярных соединений до iC_4H_{10} включительно, а в зимний период состав обогащается *n*-бутаном (C_4H_{10}), бутиленом (C_4H_8), пентаном нормальной (C_5H_{12}) и изомерных (iC_5H_{12}) форм. При этом вне зависимости от сезона опробования средние содержание метана меняется незначительно (% об.): 0,21 (зима) – 0,23 (лето) и близко к его значению в приповерхностном слое атмосферы (0,2 % об.) согласно источнику [9].

Отмечается [12] положительная корреляция между группой составляющих «метан – высокомолекулярные углеводороды – водород» при исчезновении взаимосвязи последних с CO_2 в зимний период (табл. 2).

Учитывая сложное геолого-тектоническое строение эталонного экологически «чистого» полигона, обусловленное наличием разветвленной сети дизъюнктивных нарушений, полученные результаты можно объяснить вкладом в приповерхностную атмосферу газов глубинного генезиса.

И.С. Старобинцем [13] установлено, что парообразные углеводороды не образуются в зоне гипергенеза, а приурочены главным образом к термokatалитической зоне генерации углеводородов; мигрируют только в ретроградном состоянии и из-за размеров своих молекул, практически не сорбируются минеральной частью пород, нерастворимы в водах, плохо растворяются в нефтях. Присутствие данных углеводородов (nC_5H_{12} и iC_5H_{12}) в приповерхностной атмосфере эталонного участка однозначно свидетельствует о процессах диссипации из пород и вод.

Для подтверждения вышеприведенных выводов измерен изотопный состав углерода CO_2 приземной атмосферы в зимний и летний периоды в количестве 19 проб (рис. 3).

Как следует из рисунка, CO_2 обогащен тяжелым изотопом углерода, диапазон $\delta^{13}\text{C}$ варьируется от -3,1 до -9,1 и свидетельствует об их преимущественно глубинном (магматогенном и/или метаморфогенном) генезисе [8, 14–16 и др.].

При прочих равных геологических условиях полученные данные свидетельствуют, что качественные и количественные критерии компонентного состава приземной атмосферы экологически «чистого» полигона обязаны своим формированием двум основным факторам: конкретным ландшафтным и



Таблица 1. Показатели индивидуальных составляющих и групп компонентов газовых систем объектов исследований Енисейского края и Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции
Table 1. Characteristics of gas systems individual components and group of components in the objects of research (Yenisei ridge and the Yurubchen-Tokhomsky oil and gas accumulation zone)

Район	Объект исследования	Диапазон значений объемного содержания газов, средние значения							Диапазон значений d ¹³ C d ¹³ C _{сп.} , ‰	
		n·10 ⁻³ % об.			% об.					
Справочные параметры атмосферного воздуха ⁵		CH ₄	ΣC ₂ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He	CH ₄	CO ₂
		0,2 [8]	–	0,00005	20,95	78,09	0,03	0,0005	He опр.	-7 [9]
		Летний период опробования								
		0,2–0,24 0,21	0,002–0,02* 0,009*	0,006–0,028 0,06	20,43–20,99 20,9	77,63–78,74 78,2	0,16–0,37 0,3	0,0005	He опр.	-6,8...-3,1 -4,9
		Зимний период опробования								
Енисейский край (Каитъбинская литолого-фациальная зона)	1, а. Приземная атмосфера эталонного полигона	0,209–0,457 0,23	0,006–0,157** 0,022**	0,001–0,131 0,014	20,34–21,16 20,7	77,71–79,04 78,4	0,15–0,7 0,4	0,0005	He опр.	-9,1...-5,7 -7,5
		3,4–9,43 6,41	0,042–0,04** 0,041**	0,035–0,028 0,031	4,3–4,1 4,2	84,6–84,5 84,6	10,4–10,6 10,5	0,0004	He опр.	-25,3
		2,52–328,4 57,88	0,161–53,443 7,81	0,001–0,007 0,003	5,15–20,91 19,6	77,11–93,83 79,1	0,11–0,91 0,4	0,0005–0,0024 0,001	He опр.	-15,8...-6,2 -8,8
Енисейский край (Каитъбинская литолого-фациальная зона, Олимпиадинское золоторудное месторождение, карьер «Восточный»)	3, а. Газовые системы вод из буровзрывных скважин	0,35–2250 58,49	0,007–77,68 2,368	0,001–0,378 0,014	1,88–21,45 19,18	74,31–94,42 79,15	0,17–5,05 1,22	0,0004–0,022 0,0008	-41,2...-39 -40,1	-39,9...-8,4 -17,6
		0,23– 25,95 3,26	0,013–0,905 0,114	0,002–0,121 0,013	17,83–21,23 20,56	72,3–80,64 77,93	0,1–8,57 1,03	0,0004–0,0007 0,0004	He опр.	-30,9...-12,2 -19,8
		Зимний период опробования								
	4. Газовые системы свободного выделения из буровзрывных скважин	2,2–1417 337,57	0,292–678,034 23,437	0,001–0,073 0,005	14,35–20,98 20,76	67,37–78,83 77,67	0,11–0,84 0,31	0,0002–0,3632 0,0057	-40,1...-32 -36	-19,9...-10,4 -14,5

⁵ Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 96 с.



Район	Объект исследования	Диапазон значений объемного содержания газов, средние значения										Диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср.1}}$ ‰		
		$n \cdot 10^{-3}$ ‰ об.					% об.							
		CH ₄	ΣC ₂ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He	CH ₄	CO ₂	He	CH ₄	CO ₂	
Справочные параметры атмосферного воздуха ⁵		0,2 [8]	–	0,00005	20,95	78,09	0,03	0,0005				Не опр.	-7 [9]	
		Летний период опробования												
		0,20–0,27 0,218	0,003–0,044* 0,016**	0,001–0,002 0,001	20,57–21,45 20,96	76,83–78,79 77,9	0,07–1,5 0,6	0,0005	Не опр.			-9,7...-5,5 -8,2		
		Зимний период опробования												
		0,156–0,56 0,235	0,004–0,069* 0,02**	0,001–0,08 0,011	20,39–21,3 20,88	77,65–78,92 78,23	0,11–0,7 0,32	0,0005	Не опр.			-11,2...-5,3 -7,2		
Енисейский край (Кайтабынская литолого-фациальная зона, Олимпиадинское золоторудное месторождение, карьер «Восточный»)	5. Приземная атмосфера карьера «Восточный»	0,2–28,84 4,34	0,006–0,633 0,066	Не обн.	20,44–20,98 20,78	77,18–78,79 77,98	0,07–1,02 0,36	0,0005	Не опр.			-9,6...-7,1 -8		
		48320	0,15'	Не опр.	Не опр.	53,8	2,2	0,0008	-55,7	Не опр.				
		74270	12050	Не опр.	Не опр.	13,4	0,35	Не опр.	-42,5; -42,7	Не опр.				
		78950	18830	0,265	1,1	16,9	0,32	0,34	-38,3	-9,8				
		65540	6870	Не опр.	Не опр.	28	0,4	Не опр.	-49	Не опр.				
Юрубчено-Тохомская зона нефтегазо-накопления	Поверхностные газопроявления [12]	80750	7750	Не опр.	Не опр.	11,3	0,1	Не опр.	-38,5	Не опр.		Не опр.		
		Водорастворенные газы из глубокой скважины (Еос) [13–14]												
		Растворенные в нефти газы из глубокой скважины (R) [13–14]												

Примечание. Не опр. – параметр (компонент) не определялся; не обн. – компонент не обнаружен; * – $\Sigma \text{C}_2\text{-C}_4$; ** – $\Sigma \text{C}_2\text{-C}_6$; количественные показатели компонентов газовых систем из скважин, опробованных в пределах Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазо-накопления, взяты из каталога пластовых флюидов⁶.

⁶ Правоторов С.Б., Жуковин Ю.А., Зоценко Н.А., Битнер А.К., Битнер Н.Я., Каминская О.С. [и др.]. Каталог пластовых флюидов запада Сибирской платформы и ее обрамлений (по состоянию на 01.12.87 г.). Красноярск: Изд-во ПГО «Енисейнефтегазгеология», 1988. 171 с.



Таблица 2. Корреляционная матрица компонентов приземной атмосферы экологически «чистого» полигона (лето, зима)
Table 2. Correlation matrix of the surface atmosphere components of the “environmentally-friendly” site (summer, winter)

Летний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₄	0,96	1				
H ₂	0,73	0,78	1			
O ₂	0,26	0,24	0,15	1		
N ₂	-0,14	-0,21	-0,34	-0,34	1	
CO ₂	0,4	0,44	0,59	0,17	-0,42	1
Зимний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,98	1				
H ₂	0,93	0,92	1			
O ₂	-0,15	-0,17	-0,29	1		
N ₂	-0,13	-0,13	0,01	-0,58	1	
CO ₂	-0,14	-0,09	-0,06	-0,4	0,06	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

геоморфологическим условиям и сложному геолого-тектоническому строению, наличию разветвленной сети дизъюнктивных нарушений способствующих процессам диффузионно-фильтрационного массопереноса флюидальных систем из глубоких горизонтов.

Карьер «Восточный». В карьере выполнено газокерновое и водногазовое опробование: пород, вод буровзрывных, наблюдательных и дренажных гидрогеологических скважин, а также изучены свободные газы, спонтанно выделяющиеся из буровзрывных скважин и содержащиеся в воздухе рабочей зоны горного сооружения.

Газовые системы, сорбированные породой. При бурении одной из разведочных скважин вскрыты породы кординской свиты

нижнего рифея (R₁kd), представленные тремя чередующимися литологическими разностями (пачками): 1 – кварц-сланцевые сланцы; 2 – кварц-карбонатные сланцы; 3 – черные углеродистые сланцы. Основная часть разреза сложена литифицированными и метаморфизованными осадками углеродистых сланцев.

В десорбированных из пород газах определены содержания углеводородной и неуглеводородной компонент газовой системы (100 исследований) и изотопный состав углерода CO₂ (22 анализа).

Исследованы флюидные компоненты открытых (полуоткрытых) пор и трещин керна пород. Особенностью состава сорбированных газов являлось присутствие в отдельных интервалах разреза экстремальных содержаний

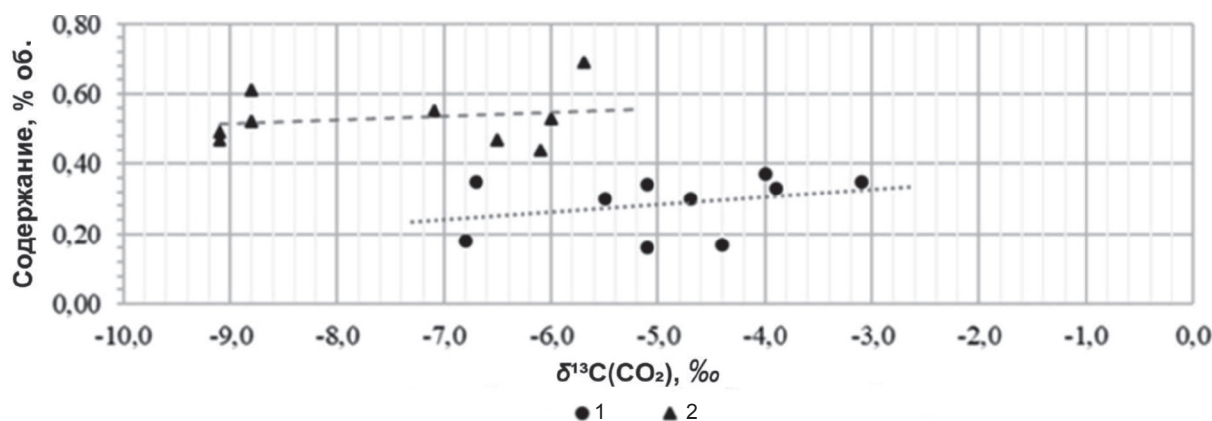


Рис. 3. Значения $\delta^{13}\text{C}$ CO₂ приземной атмосферы экологически «чистого» полигона:
1 – летний период; 2 – зимний период

Fig. 3. Values of $\delta^{13}\text{C}$ CO₂ of the surface atmosphere of the “environmentally-friendly” site:
1 – summer period; 2 – winter period



кислорода (5,15 % об.) и азота (93,83 % об.), характерных для «мертвого воздуха» [17]. Углеводородная составляющая представлена: метаном, газообразными и парообразными его гомологами (ΣC_1-C_6), включая изомерные и непредельные углеводородные соединения: этилен, пропилен и бутилен.

Посредством корреляционного анализа [12] установлена значимая связь между: гелием и метаном, парообразными и газообразными углеводородами, гелием и парообразными соединениями; азотом и парообразными гомологами метана; слабая корреляционная зависимость существует между гелием и азотом; выявлена отрицательная корреляция между кислородом и: парообразными углеводородами, азотом, гелием (табл. 3).

По данным изотопных исследований углерод углекислого газа имеет значительные вариации количественных показателей и $\delta^{13}C$ от -6,2 до -15,8 ‰ (рис. 4).

До 90 % проб выборки имеют узкий диапазон значений $\delta^{13}C$ от -12,2 до -15,8 ‰, однако разброс данных $\delta^{13}C$, практически в 10 ‰, свидетельствует о разных источниках, участвующих в формировании данных газовых систем.

Согласно изотопным критериям диагностики генезиса газов [8, 14–16], а также наличию парообразных углеводородов (C_5-C_6) с незначительными сорбционными и высокими диффузионно-фильтрационными свойствами [13], можно констатировать, что в формировании состава газовых систем отложений принимают участие в основном термokatалитические и глубинные флюиды с низкой долей газов приземной атмосферы.

Газовые системы природных (подземных) вод. В пределах Олимпиадинского месторождения распространение подземных вод контролируется водоносными зонами открытой трещиноватости, формирующими безнапорные, пресные, гидрокарбонатные, слабо

Таблица 3. Корреляционная матрица компонентов газовых смесей, сорбированных породами
Table 3. Correlation matrix of gas mixture components sorbed by rocks

	CH ₄	ΣC_2-C_4	ΣC_5-C_6	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC_2-C_4	0,73	1						
ΣC_5-C_6	0,4	0,4	1					
H ₂	-0,15	-0,08	0	1				
O ₂	-0,15	-0,24	-0,62	0,12	1			
N ₂	0,15	0,24	0,63	-0,1	-0,99	1		
CO ₂	-0,22	-0,27	-0,33	-0,26	0,15	-0,23	1	
He	0,81	0,58	0,55	-0,16	-0,43	0,44	-0,36	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

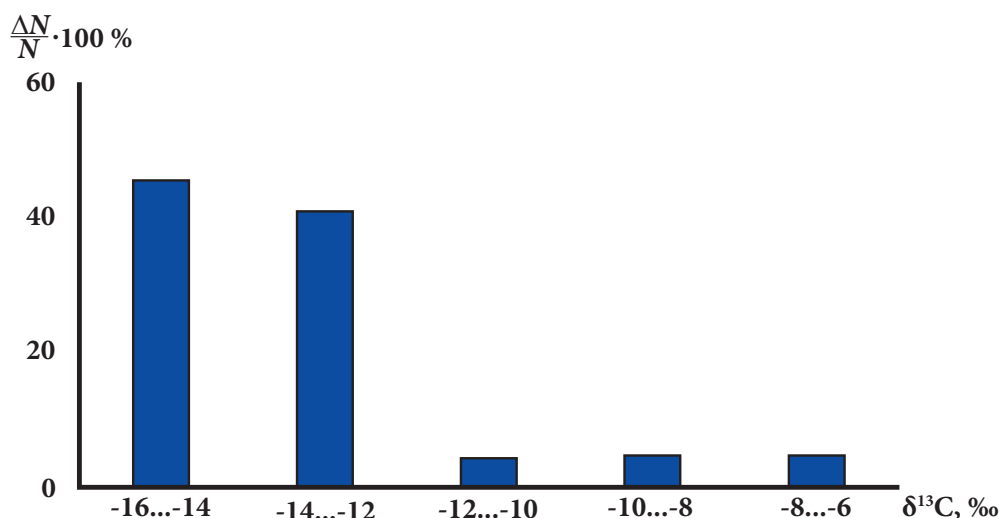


Рис. 4. Вариации изотопного состава углерода CO₂, десорбированного из керна разведочной скважины
Fig. 4. Variations in the isotopic composition of carbon CO₂ desorbed from the exploration well core



Таблица 4. Корреляционная матрица компонентов водорастворенных газовых систем карьера «Восточный»

Table 4. Correlation matrix of water dissolved gas system components of the Vostochny open-pit mine

	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	ΣC ₅ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC ₂ -C ₄	0,87	1						
ΣC ₅ -C ₆	0,06	0,08	1					
H ₂	-0,04	-0,05	-0,01	1				
O ₂	-0,21	-0,29	-0,22	-0,06	1			
N ₂	0,13	0,22	0,2	0,08	-0,87	1		
CO ₂	-0,05	-0,03	0,08	-0,12	-0,25	-0,08	1	
He	0,96	0,83	0	-0,04	-0,21	0,14	-0,06	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

минерализованные воды с преимущественно инфильтрационным питанием [18].

Для исследования водорастворенных газовых систем природных вод буровзрывных, дренажных, наблюдательных скважин карьера «Восточный» выполнены отбор, термовакuumная дегазация и хроматографические исследования 300 проб.

Часть газов характеризуется аномально высокими содержаниями метана (2,25 % об.), азота (94,42 % об.) и низкими – кислорода (1,88 % об.); идентифицированы водород и гелий (см. табл. 1).

Наряду с неуглеводородными компонентами в газовых смесях определены углеводороды от метана до его парообразного гомолога – нормального гексана включительно, а также этан, этилен, пропан, пропилен, бутан, изобутан, бутилен, пентан, изопентан и изомерные соединения гексана (2,2-диметилбутан, 2,3-диметилбутан, 2-метилпентан и 3-метилпентан).

Установлена [12] сильная корреляция между: метаном и его газообразными гомологами; CH₄ и гелием; ΣC₂-C₄ и гелием; отрицательная корреляция между азотом и кислородом (табл. 4).

В представительной выборке водорастворенных газовых смесей определен изотопный состав углерода углекислого газа (46 проб) и метана (2 образца). Согласно исследованиям и теоретическим наработкам [8, 14–16], всю изученную коллекцию можно дифференцировать на три группы.

Первая группа (24 пробы) с низким содержанием CO₂ от 1,13 до 2,18 % об., при среднем значении 1,66 % об., обогащена тяжелым изотопом углерода δ¹³C от -8,4 ‰ до -16,6 ‰ при δ¹³C_{ср.} = -12,8 ‰, что указывает на глубинный источник формирования – термогенные газы, связанные со скоплениями углеводородов.

Подтверждением данного вывода является δ¹³C метана в двух представительных пробах (-39 ‰ и -41,2 ‰), который, согласно диагностической схеме М. Шоэла, характерен для аквигенного органического вещества и соответствует автономным газовым высоко конденсатным углеводородным системам III класса (пентан + высшие – < 3,5 %) [19] (рис. 5).

Согласно данным источников [10–11] (см. табл. 1), полученные характеристики δ¹³C метана близки к значениям δ¹³C CH₄ нефтегазоконденсатных скоплений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления (δ¹³C_{ср.} от -38,3 до -49 ‰) и не характерны для газов верхней газогенерирующей (био)зоны (δ¹³C_{ср.} = -55,7 ‰).

Вторая группа (15 проб) имеет более широкий диапазон содержания CO₂ от 1,3 до 8,57 % об. при среднестатистическом показателе 3,5 % об. с δ¹³C от -17,9 ‰ до -25,1 ‰ (δ¹³C_{ср.} = -18,5 ‰). Газовые смеси этой группы, по генезису, являются термогенными. В изотопно-легких пробах (δ¹³C < -23 ‰) возможно присутствие небольшой доли (примеси) биохимических (микробиальных) газов; вместе с тем, как определено изотопными исследованиями углерода углекислоты, из зоны разгрузки природных вод на экологически «чистом» полигоне, данная группа может быть обязана своим формированием продуктам преобразования органического вещества почвенно-растительного слоя со значениями δ¹³C = -25,3 ‰ (см. табл. 1).

Третья группа (7 проб) диоксида углерода с содержанием от 1,87 до 4,78 % об. при среднем содержании 3,2 % об. значительно обогащена легким изотопом при широком диапазоне значений δ¹³C от -26,1 ‰ до -39,9 ‰, δ¹³C_{ср.} = -31,5 ‰, что указывает на значительную роль биохимических, микробиальных процессов в формировании этих газов.

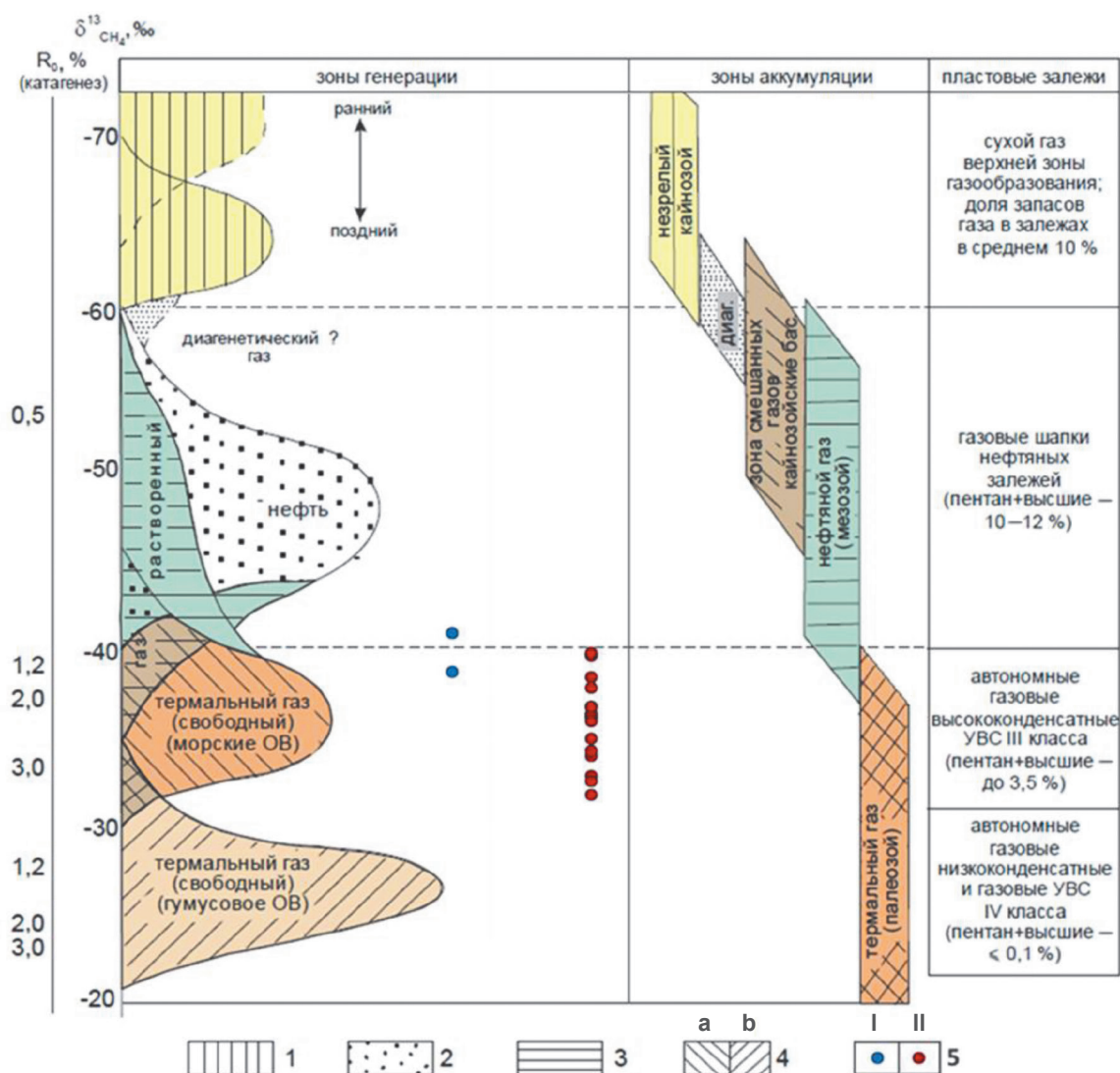


Рис. 5. Принципиальная схема формирования и диагностики газовых углеводородных систем (по источнику [22] с добавлениями авторов):

1 – сухой газ ранней генерации; 2 – нефть; 3 – растворенный газ; 4 – термальный свободный газ: морское органическое вещество (а); гумусовое органическое вещество (b); 5 – $\delta^{13}\text{C}$ метана, растворенного в природных (подземных) водах карьера «Восточный» (I), свободного выделения из буровзрывных скважин (II)

Fig. 5. Schematic diagram of gas hydrocarbon systems formation and diagnosis (according to the source [22] with authors' additions):

1 – dry gas of early generation; 2 – oil; 3 – dissolved gas; 4 – thermal free gas: marine organic substance (a), organic humus (b); 5 – $\delta^{13}\text{C}$ methane dissolved in natural (underground) waters of the Vostochny open-pit mine (I), free release from blastholes (II)

Газовые системы свободного выделения из буровзрывных скважин. Для изучения газов спонтанного выделения из буровзрывных скважин отобрано 206 проб. Установлено, что средние объемные доли азота и кислорода близки к нормальным воздушным содержаниям, а среднестатистические значения CO_2 , H_2 и He превышают таковые (см. табл. 1).

В газовых системах зафиксирован углеводородный ряд от метана до его высококипящего гомолога – нормального гексана включительно. В 100 % исследованных проб метан присутствует в количествах, превышающих

его средневзвешенную объемную долю в приземной атмосфере ($2 \cdot 10^{-4}$ % об.) [9]; вместе с тем наличие газообразных углеводородов и высококипящих соединений с молекулярной массой C_5 и C_6 , учитывая их незначительные сорбционные и высокие диффузионно-фильтрационные свойства [13], еще раз свидетельствует о наличии подтока нафтидов из глубины. Относительное содержание метана в углеводородной части варьируется от 70,1 до 97,1 %, при среднем значении 92,7 % отн., то есть газы из разрезов буровзрывных скважин – «жирные».



Таблица 5. Корреляционная матрица компонентов газовых смесей спонтанного выделения из буровзрывных скважин

Table 5. Correlation matrix of the components of blasthole spontaneous gas mixtures

	CH ₄	ΣC ₂ -C ₄	ΣC ₅ -C ₆	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	He
CH ₄	1							
ΣC ₂ -C ₄	0,89	1						
ΣC ₅ -C ₆	0,72	0,87	1					
H ₂	0,81	0,47	0,21	1				
O ₂	-0,91	-0,68	-0,46	-0,93	1			
N ₂	-0,94	-0,87	-0,71	-0,73	0,79	1		
CO ₂	0,24	0,23	0,16	0,35	-0,24	-0,36	1	
He	0,94	0,73	0,49	0,92	-0,97	-0,86	0,22	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

Установлена тесная корреляция [12] между метаном и: его тяжелыми гомологами, водородом; гелием и: CH₄, C₂-C₄, водородом; определена положительная корреляция между O₂ и N₂ (табл. 5). Существует обратная зависимость всех составляющих газовых систем спонтанного выделения за исключением CO₂ с кислородом и азотом, что также указывает на различный генезис этих компонентов.

Для газов спонтанного выделения исследован изотопный состав углерода CO₂ (56 проб) и CH₄ (17 проб).

Для углекислого газа характерен широкий интервал значений δ¹³C: от -9,9 до -28,6 ‰, при среднем значении -13,7 ‰. Согласно изотопным критериям генезиса газов [8, 14–16], выделено четыре группы:

– первая (9 проб) – с вариациями δ¹³C от -9,9 до -10,9 ‰ и δ¹³C_{ср.} = -10,5 ‰, генетически связана с ювенильной двуокисью углерода; источник газов – глубинный, метаморфогенный;

– вторая (15 проб) – δ¹³C = -11,1...-11,9 ‰, δ¹³C_{ср.} = -11,4 ‰, характеризуется значениями близкими для CO₂ приземной атмосферы Сибирской платформы и углекислотой глубинного генезиса;

– третья (30 проб) – с диапазоном δ¹³C = -12,1...-19,9 ‰, средний показатель – δ¹³C = -14,8 ‰; обусловлен влиянием на газовую смесь водо-растворенного органического вещества;

– четвертая (2 пробы) – с параметрами δ¹³C = -25,6 и -28,6 ‰ генетически связана с биохимическим углекислым газом почвенно-растительного слоя.

Двуокись углерода газовых систем буровзрывных скважин главным образом обязана своим генезисом процессам смешивания в различных соотношениях ювенильного угле-

кислого газа, водорастворенной углекислоты, двуокиси углерода нижней зоны каталитической преобразованности органического вещества морского генезиса и атмосферного CO₂.

В представительных пробах газовых систем буровзрывных скважин карьера «Восточный» вариации значений δ¹³C метана от -28,6 до -40,1 ‰ соответствуют изотопным соотношениям водорастворенного метана, характерны для аквагенного органического вещества и присущи газовым высоко конденсатным углеводородным системам скоплений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления [20] (см. рис. 5, рис. 6).

Газовые системы приземной атмосферы карьера «Восточный». Методом сорбционной хроматографии изучены газообразные и парообразные компоненты приземной атмосферы рабочей зоны карьера «Восточный». В независимости от периода опробования, установлен углекислотно-кислородно-азотный состав образцов приземной атмосферы, являющийся идентичным газовым системам пород и природных вод изученного разреза (см. табл. 1).

Содержания объемной доли азота, кислорода и гелия в воздухе рабочей зоны близки к значениям нормального газо-геохимического поля; от летнего этапа к зимнему отмечается увеличение среднего количественного показателя водорода с превышением нормального фона в 1,4 раза. Обратная зависимость наблюдается для CO₂, значения которого снижаются в зимний период.

В летний сезон опробования в атмосфере карьера, в отличие от полигона, гомологический ряд метана увеличивается до C₅ включительно: идентифицированы *n*-бутан, бутилен, пентан и изо-пентаны. В зимний этап исследований качественный состав газовых систем приземной атмосферы карьера и нормально-

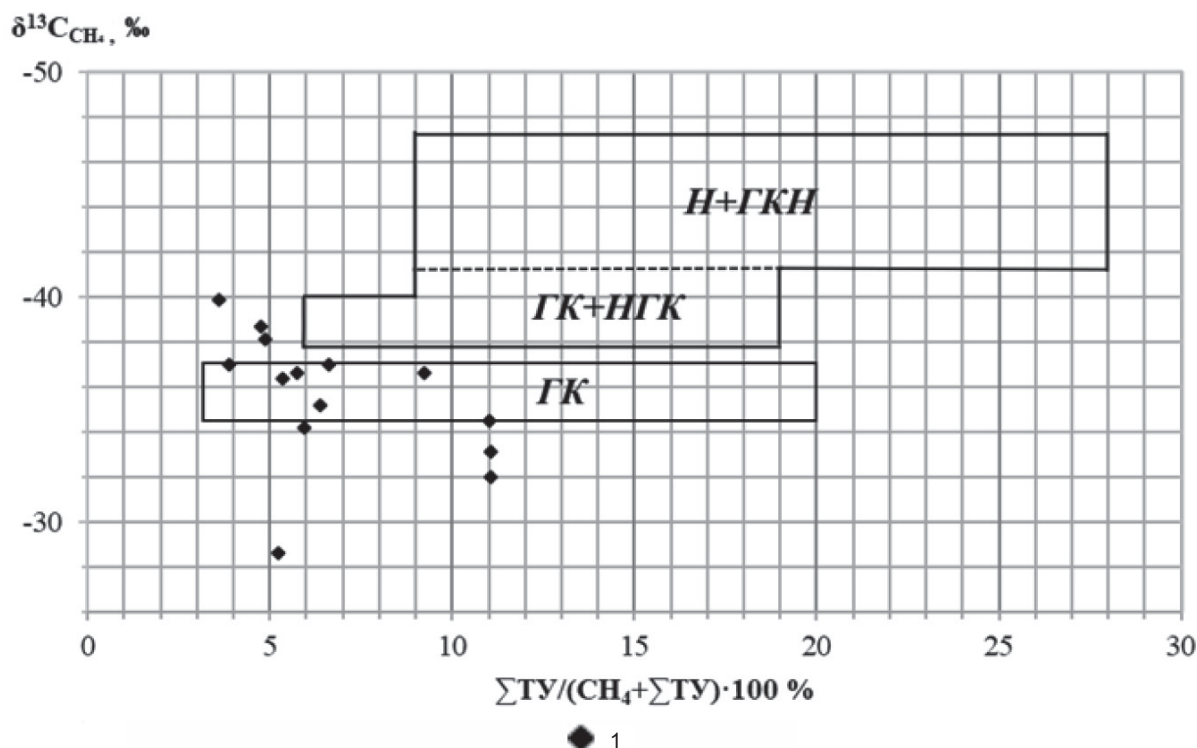


Рис. 6. Изотопно-геохимические показатели газов рифей-нижнекембрийских отложений Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции [20] и Олимпиадинского месторождения:

1 – углеводородные газовые системы Олимпиадинского месторождения

Типы газов: H+ГКН – нефтяные и газоконденсатные; ГК+НГК – вторичные газоконденсатные и нефтегазоконденсатные; ГК – первичные газоконденсатные

Fig. 6. Isotope-geochemical indicators of gases of Riphean-Lower Cambrian deposits from the Yurubcheno-Tokhomskaya oil and gas accumulation zone [20] and Olimpiadinskoye field:

1 – hydrocarbon gas systems of the Olimpiadinskoye field

Types of gases: H+ГКН – oil and gas condensate; ГК+НГК – secondary gas condensate and oil and gas condensate; ГК – primary gas condensate

го газо-геохимического поля Татарско-Аяхтинской литолого-фациальной зоны идентичен. Значение относительной доли тяжелых гомологов метана в составе углеводородной части достигает 16–19 %.

Для летнего периода работ наблюдается сильная положительная корреляция [12] между метаном и его тяжелыми гомологами, а также взаимосвязь каждого из последних с изотопно-тяжелым CO_2 . Определена обратная зависимость углеводородных компонентов с кислородом и азотом, что указывает на наличие существующего газового потока из глубоких горизонтов разреза (табл. 6).

В зимний этап исследований выявлены значимые корреляционные связи между: углеводородными составляющими; водородом и тяжелыми гомологами метана; установлена слабая зависимость H_2 с эндогенным CO_2 , последнее свидетельствует как о глубинном генезисе водорода, так и возможном образовании водорода вследствие химических реакций.

Для диагностики источников формирования газовых систем рабочей зоны карьера наряду с анализом их качественных показателей, количественных характеристик, корреляционных соотношений использовались результаты исследований смещения изотопного состава углерода CO_2 (рис. 7).

Как в летний, так и в зимний период для углекислого газа характерен тяжелый изотопный состав – $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср.}} = -8,2; -7,2 \text{ ‰}$ соответственно, связанный с преобладанием во флюиде преимущественно глубинной двуокиси углерода.

Результаты пиролитических исследований. Для оценки остаточного нефтегазогенерационного потенциала органического вещества рифейской толщи на Олимпиадинском месторождении в карьере «Восточный» выполнены пиролитические исследования 27 образцов различных литологических разностей пород. Результаты представлены в табл. 7.

В соответствии с классификацией нефтегазоматеринских пород Тиссо, Вельте [21] и



Табл. 6. Корреляционная матрица составляющих воздуха приземной атмосферы карьера «Восточный» в разные периоды опробования

Table 6. Correlation matrix of the surface atmosphere air components in the Vostochny open-pit mine in different periods of testing

Летний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,69	1				
H ₂	0,08	-0,03	1			
O ₂	-0,39	-0,47	0,14	1		
N ₂	-0,41	-0,64	0,19	0,20	1	
CO ₂	0,54	0,84	-0,12	-0,46	-0,76	1
Зимний период						
	CH ₄	ΣC ₂ -C ₅	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	1					
ΣC ₂ -C ₅	0,62	1				
H ₂	0,16	0,53	1			
O ₂	0,21	0,2	-0,02	1		
N ₂	-0,17	-0,24	-0,32	-0,37	1	
CO ₂	0,09	0,26	0,42	-0,01	-0,18	1

Примечание. Курсивом отмечены коэффициенты корреляции со значениями > 0,4 (по модулю).

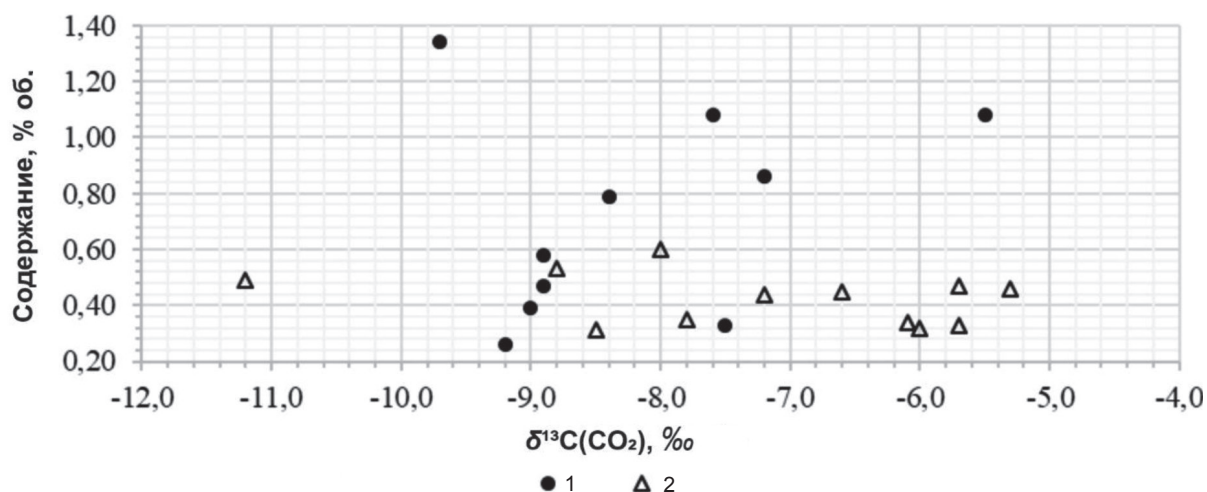


Рис. 7. Значения $\delta^{13}\text{C CO}_2$ приземной атмосферы рабочей зоны карьера «Восточный»:

1 – летний период; 2 – зимний период

Fig. 7. Values of $\delta^{13}\text{C CO}_2$ of the surface atmosphere of the working zone of the Vostochny open-pit mine:

1 – summer period; 2 – winter period

Таблица 7. Основные пиролитические параметры органического вещества горных пород разреза карьера «Восточный»

Table 7. Main pyrolytic parameters of the rock organic substance in the Vostochny open-pit mine

Показатель	S_1 , мг УВ/г породы	S_2 , мг УВ/г породы	$PI = S_1/(S_1 + S_2)$	S_3 , мг CO_2 /г породы	TOC , % на породу	$HI = S_2 \cdot 100/TOC$, мг УВ/г $C_{орг.}$	$OI = S_3 \cdot 100/TOC$, мг CO_2 /г $C_{орг.}$
$X_{мин}$	0	0	0	0,16	0,04	0	36
$X_{макс}$	0,06	0,08	1	0,29	0,54	113	630
$X_{ср}$	0,01	0,02	0,29	0,22	0,24	16	142,4

Примечание. S_1 – количество свободных углеводородов, присутствующих в образце и выделившихся при $T = 300^\circ\text{C}$, мг/г породы; S_2 – количество тяжелых нефтяных углеводородов и углеводородов крекинга органического вещества или органических соединений, выделившихся в интервале температур 300–600 $^\circ\text{C}$, мг УВ/г породы; S_3 – количество CO_2 , выделившееся в ходе пиролиза при температурах до 400 $^\circ\text{C}$; PI – степень выработанности керогена; TOC – суммарное содержание органического углерода в образце (породе), % масс.; HI – водородный индекс мг УВ/г TOC , показывает наличие водородных структур в молекуле органических соединений, для пород используется в качестве характеристики литолого-фациальных особенностей и типа органического вещества; OI – индекс кислорода, мг CO_2 /г TOC , показывает наличие кислородных структур в молекуле органических соединений, для пород используется как характеристика степени преобразования органического вещества.



Петерса [22] установлено, что остаточное органическое вещество изученных литифицированных и метаморфизованных осадков исчерпало свой нефтегазогенерационный потенциал и не может служить источником формирования аномальных полей концентраций Олимпиадинского месторождения. Идентифицированные в зоне поисково-геохимического зондирования газовые системы являются аллохтонными по отношению к вмещающим отложениям кординской свиты нижнего рифея.

Заключение

По материалам изотопно-геохимических исследований авторами получены научно-обоснованные данные о генезисе современных проявлений газообразных и парообразных флюидов на Олимпиадинском золоторудном месторождении.

На основании результатов, изложенных в настоящей работе, можно сделать выводы:

– нормальное газовое поле приземной атмосферы экологически «чистого» полигона обязано своим формированием конкретным ландшафтным и геоморфологическим услови-

ям района исследований, а также флюидальным системам глубоких горизонтов, которые в результате наличия разветвленной сети дизъюнктивных нарушений и диффузионно-фильтрационным процессам массопереноса достигли зоны поискового зондирования;

– на Олимпиадинском месторождении органическое вещество рудовмещающих черносланцевых отложений кординской свиты исчерпало нефтегазогенерационный потенциал и не принимает участия в формировании современного газового потока;

– доминирующий вклад в становление полей концентраций газообразных и парообразных углеводородных и неуглеводородных флюидов природных сред Олимпиадинского золоторудного месторождения вносят аллохтонные по отношению к вмещающим породам (R_1kd) эндогенные и нефтидогенные системы, без участия газов верхней газогенерирующей (био)зоны;

– по изотопно-геохимическим критериям газовые системы Олимпиадинского месторождения идентичны газоконденсатным скоплениям Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазоаккумуляции.

Список источников

1. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Сильянов С.А., Лобанов К.В., Леонтьев С.И., Калинин Ю.А. [и др.]. Рудогенез месторождения золота Олимпиада (Енисейский край, Россия) // Геосферные исследования. 2019. № 1. С. 17–43. <https://doi.org/10.17223/25421379/9/2>. EDN: WLSEZA.
2. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак Т.А., Рябуха М.А., Сильянов С.А. [и др.]. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский край): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}S$ сульфидов, $^3He/^4He$ флюидов, Ar-Ar возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9. С. 1310–1329. <https://doi.org/10.15372/GiG2019073>. EDN: ТРҮКРҮ.
3. Петрова М.А., Шапаренко Е.О., Хоменко М.О. Метан-азот-углекислотный состав газовой фазы флюидных включений в кварце с глубоких горизонтов месторождения Олимпиада по данным рамановской спектроскопии // Геология: материалы 58-й Междунар. науч.-студ. конф. (г. Новосибирск, 10–13 апреля 2020 г.). Новосибирск, 2020. С. 81. EDN: GQUKIF.
4. Фридман А.И. Природные газы рудных месторождений. М.: Недра, 1970. 192 с.
5. Матвиенко Н.Г. Выделение природных газов при освоении рудных месторождений. М.: Недра, 1988. 229 с.
6. Behar F., Beaumont V., Penteado H.L.D.B. Rock-Eval 6 technology: performances and developments // Oil & Gas Science and Technology. 2001. Vol. 56. Iss. 2. P. 111–134. <http://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
7. Старобинец И.С., Калинин М.К. Отбор проб и анализ природных газов нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 1985. 239 с.
8. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии: монография. М.: Недра, 1973. 379 с.
9. Кузовкин В.В., Семенов С.М. Метан в приповерхностном слое атмосферы: современное содержание, многолетние тренды и внутригодовая изменчивость // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 3. С. 5–21. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-05-21>. EDN: LLQIDM.
10. Рытькова Е.И., Якунина И.И., Блохина Г.Г. Изотопный состав углерода метана поверхностных газопоявлений // Изотопные и битуминологические методы при поисках нефти и газа: сб. науч. тр. / под ред. Л.М. Зорькина. М.: Изд-во ВНИИгеоинформсистем, 1988. С. 42–49.
11. Дахнова М.В., Баженова Т.К., Лебедев В.С., Киселев С.М. Изотопные критерии прогноза фазового состава углеводородов в рифейских и венд-кембрийских отложениях Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 8. С. 1199–1209. EDN: NYJKNF.
12. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. Кн. 1. / пер. с англ. М.: Недра, 1990. 319 с.
13. Старобинец И.С. Газогеохимические показатели нефтегазоносности и прогноз состава углеводородных скоплений. М.: Недра, 1986. 198 с.



14. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии: монография. М.: ГЕОС, 2018. 341 с. EDN: XXTSYR.
15. Алексеев Ф.А., Войтов Г.И., Лебедев В.С., Несмелова З.Н. Метан. М.: Недра, 1978. 310 с.
16. Голышев С.И., Падалко Н.Л., Соболев П.Н., Дыхан С.В., Праздничных М.И., Черников Е.В. [и др.]. Поверхностная геохимическая съемка, сопровождающая региональные сейсмические исследования Тегульдetsкой впадины (юго-восток Томской области) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № S. С. 94–101. EDN: PIDGHP.
17. Матвиенко Н.Г., Воронюк А.С. Основы обеспечения безопасности освоения газоносных и склонных к самовозгоранию рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S1. С. 160–171. EDN: QCLETH.
18. Пинкевич М.Н., Дворецкая Ю.Б. Оценка естественных ресурсов подземных вод в пределах Олимпиадинской площади (Енисейский край) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 144–149. EDN: VVSIZV.
19. Соболев В.С., Полякова Л.Л. Некоторые особенности размещения и формирования крупнейших газосодержащих месторождений мира // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009. Т. 4. № 4. С. 8. Режим доступа: https://ngtp.ru/rub/6/41_2009.pdf (дата обращения 01.04.2024). EDN: KXSTTP.
20. Зорькин Л.М., Крылова Т.А. Использование изотопного состава углерода метана при геохимических поисках залежей нефти и газа // Изотопные и битуминологические методы при поисках нефти и газа: сб. науч. тр. / под ред. Л.М. Зорькина. М.: Изд-во ВНИИгеоинформсистем, 1988. С. 3–15.
21. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 503 с.
22. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis // AAPG Bulletin. 1986. Vol. 70. Iss. 3. P. 318–329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.

References

1. Sazonov A.M., Zvyagina Ye.A., Silyanov S.A., Lobanov K.V., Leontyev S.I., Kalinin Yu.A., et al. Ore genesis of the Olimpiada gold deposit (Yenisei ridge, Russia). *Geosfernye issledovaniya*. 2019;(2):17-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/10/2>. EDN: WLSEZA.
2. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Shaparenko E.O., et al. The Olimpiadinskoe gold deposit (Yenisei ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, $\delta^{34}\text{S}$ in sulfides, $^3\text{He}/^4\text{He}$ of fluids, Ar–Ar age, and duration of formation. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 2019;60(9):1310-1329. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2019073>. EDN: TPYKPU.
3. Petrova M.A., Shaparenko E.O., Khomenko M.O. Methane-nitrogen-carbon dioxide composition of the gas phase of fluid inclusions in quartz from deep horizons of the Olimpiada deposit according to Raman spectroscopy data. In: *Geologiya: Materialy 58-i Mezhdunar. nauch.-stud. konf. = Geology: Materials of the 58th International scientific and student conference*. 10–13 April 2020, Novosibirsk. Novosibirsk; 2020, p. 81. (In Russ.). EDN: GQUIKF.
4. Fridman A.I. *Natural gases of ore deposits*. Moscow: Nedra; 1970, 192 p. (In Russ.).
5. Matvienko N.G. *The release of natural gases during the development of ore deposits*. Moscow: Nedra; 1988, 229 p. (In Russ.).
6. Behar F., Beaumont V., Penteado H.L.D.B. Rock-Eval 6 technology: performances and developments. *Oil & Gas Science and Technology*. 2001;56(2):111-134. <http://doi.org/10.2516/ogst:2001013>.
7. Starobinets I.S., Kalinko M.K. *Sampling and analysis of natural gases of oil and gas basins*. Moscow: Nedra; 1985, 239 p. (In Russ.).
8. Galimov E.H.M. *Carbon isotopes in oil and gas geology*. Moscow: Nedra; 1973, 379 p. (In Russ.).
9. Kuzovkin V.V., Semenov S.M. Methane in the surface layer of the atmosphere: current content, long-term trends and intra-annual variability. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2020;3:5-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-3-05-21>. EDN: LLQIDM.
10. Rytikova E.I., Yakunina I.I., Blokhina G.G. Isotopic composition of carbon methane of surface gas occurrences. In: Zorkin L.M. (ed.). *Izotopnye i bituminologicheskie metody pri poiskakh nefi i gaza = Isotopic and bituminological methods in the search for oil and gas*. Moscow: All-Russian Research Institute of Geological, Geophysical and Geochemical Systems; 1988, p. 42-49. (In Russ.).
11. Dakhnova M.V., Kiselev S.M., Bazhenova T.K., Lebedev V.S. Isotopic criteria for predicting the phase composition of hydrocarbons in Riphean and Vendian deposits of the Lena-Tunguska petroleum province. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(8):1199-1209. EDN: NYJKNF.
12. Davis J.C. Statistics and data analysis in geology; 1973, 584 p. (Russ. ed.: *Statisticheskii analiz v geologii. Book 1*. Moscow: Mir; 1990, 319 p.).
13. Starobinets I.S. *Gas-geochemical indicators of oil and gas potential and the forecast of the composition of hydrocarbon accumulations*. Moscow: Nedra; 1986, 198 p. (In Russ.).
14. Shakirov R.B. *Gasgeochemical fields of the Eastern Asia marginal seas. Monograph*. Moscow: GEOS; 2018, 341 p. (In Russ.). EDN: XXTSYR.
15. Alekseev F.A., Voitov G.I., Lebedev V.S., Nesmelova Z.N. *Methane*. Moscow: Nedra; 1978, 310 p. (In Russ.).
16. Golyshev S.I., Padalko N.L., Soboлев P.N., Dykhan S.V., Prazdnichnykh M.I., Chernikov E.V., et al. Surface geochemical survey attendant on regional seismic investigations of the Teguldetskaya depression (the south-east of the Tomsk region). *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri = Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2012;(S): 94-101. (In Russ.). EDN: PIDGHP.



17. Matvienko N.G., Voronyuk A.S. Fundamentals of ensuring development safety of gas-bearing and spontaneous combustion-prone ore deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(S1):160-171. (In Russ.). EDN: QCLETH.
18. Pinkevich M.N., Dvoretzskaya J.B. Using the hydrometer method for Olympiadinskoye area zoning by exceedance probability of natural groundwater resources. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2016;(1):144-149. (In Russ.). EDN: VVSIZV.
19. Sobolev V.S., Polyakova L.L. Some peculiarities of distribution and formation of the world's largest gas fields. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2009;4(4):8. Available from: https://ngtp.ru/rub/6/41_2009.pdf [Accessed 1st March 2024]. (In Russ.). EDN: KXSTTP.
20. Zorkin L.M., Krylova T.A. Using carbon isotopic composition of methane in geochemical prospecting for oil and gas. In: Zorkin L.M. (ed.). *Izotopnye i bituminologicheskie metody pri poiskakh nefti i gaza = Isotopic and bituminological methods in oil and gas exploration*. Moscow: All-Russian Research Institute of Geological, Geophysical and Geochemical Systems; 1988. p. 3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.
21. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration; 1978, 702 p. (Russ. ed.: *Obrazovaniye i rasprostraneniye nefti*. Moscow: Mir; 1981, 503 p.).
22. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *AAPG Bulletin*. 1986;70(3):318-329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>.

Информация об авторах / Information about the authors



Ковалев Артем Андреевич,
инженер-геолог,
ООО Центр геотехнологических исследований «Прогноз»,
г. Красноярск, Россия,
✉ kovalevartom@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5748-5762>
Artem A. Kovalev,
Geologist Engineer,
LLC CGI "PROGNOZ",
Krasnoyarsk, Russia,
✉ kovalevartom@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5748-5762>



Карпов Виктор Александрович,
главный горняк,
АО «Полюс Красноярск»,
г. Красноярск, Россия,
karpovv159@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9981-3750>
Victor A. Karpov,
Chief Miner,
JSC "Polyus Krasnoyarsk",
Krasnoyarsk, Russia,
karpovv159@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-9981-3750>



Макаров Владимир Александрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой геологии месторождений и методики разведки,
Институт цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия,
VMakarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5971-8070>
Vladimir A. Makarov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Department of Deposit Geology and Exploration Methods,
School of Non-Ferrous Metals,
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia,
VMakarov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5971-8070>



Падалко Наталия Львовна,
кандидат химических наук,
научный сотрудник,
Томский филиал АО «Сибирский научно-исследовательский
институт геологии, геофизики и минерального сырья»,
г. Томск, Россия,
isotopnata@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-6440-2036>
Nataliya L. Padalko,
Cand. Sci. (Chem.),
Researcher,
JSC "SNIGG and MS",
Tomsk, Russia,
isotopnata@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-6440-2036>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.А. Ковалев – формулировка ключевых целей и задач исследования, проведение исследований, анализ и интерпретация полученных данных, визуализация данных, составление черновика рукописи.

В.А. Карпов – формирование идеи исследования, сбор данных, участие в научном дизайне, ресурсное обеспечение проекта.

В.А. Макаров – администрирование и ресурсное обеспечение проекта, научное редактирование рукописи.

Н.Л. Падалко – проведение лабораторных исследований, анализ и интерпретация полученных данных, редактирование и доработка рукописи.

A.A. Kovalev set the key research goals and objectives, conducted the research, analyzed and interpreted the data obtained, performed data visualization, prepared the manuscript.

V.A. Karpov formed the research idea, collected data, participated in scientific designing, ensured resource support of the project.

V.A. Makarov provided administrative and resource support of the project, performed scientific editing of the manuscript.

N.L. Padalko carried out the laboratory research, analyzed and interpreted the data obtained, edited and revised the manuscript.

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 01.03.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024; принята к публикации 21.03.2024.

The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 15.03.2024; accepted for publication 21.03.2024.