



УДК 553.98+551.21

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕФТЕГАЗОПРОИЗВОДЯЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ РИФЕЯ ЮГО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

С. И. Голышев¹, П. Н. Соболев², Н. Л. Падалко¹, С. И. Дыхан², П. Ф. Яворов¹,
М. И. Праздничных¹, Е. В. Черников¹

¹Томский филиал Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Томск, Россия; ²Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

На основе изучения изотопного состава углерода и кислорода карбонатной составляющей пород и углерода рассеянного органического вещества выявлены фациальные условия осадкообразования отложений тотинской и малгинской свит среднего рифея и лахандинской серии верхнего рифея Сибирской платформы. Установлены основные изотопные критерии доманикоидной формации среднего рифея Алдано-Майского осадочного бассейна Сибирской платформы. Рассмотрены экзогенные и эндогенные факторы, необходимые для образования доманикоидных отложений малгинской свиты. Предложен механизм, приводящий к образованию в отложениях среднего и верхнего рифея РОВ аномально низкого содержания ¹³C (–33,0...–35,0 ‰). На основе изотопных данных рассмотрены возможные потенциальные нефтепроизводящие горизонты в пределах Алдано-Майской впадины.

Ключевые слова: диагенез, доманикоидные породы, изотопный состав, кислород, органическое вещество, осадкообразование, рифей, углерод, фации, эпигенез.

ISOTOPIC AND GEOCHEMICAL SURVEY OF POTENTIALLY OIL-AND-GAS SOURCE DEPOSITS OF THE RIPHEAN IN THE SOUTH-EAST OF THE SIBERIAN PLATFORM

S. I. Golyshev¹, P. N. Sobolev², N. L. Padalko¹, S. I. Dykhan², P. F. Yavorov¹, M. I. Prazdnichnykh¹,
E. V. Chernikov¹

¹Tomsk Branch of Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Tomsk, Russia; ²Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

Based on the study of the carbon and oxygen isotopic composition of the carbonate constituent of rocks (CCR) and carbon of dispersed organic matter (DOM), the facies conditions of sedimentation of the Middle Riphean Totinskaya and Malginskaya formations and Lakhandinian series of the Upper Riphean in the south-east of the Siberian Platform were revealed. The main isotopic criteria of the Middle Riphean domanicoid formation within the Aldan-Maya sedimentary basin of the Siberian Platform have been determined. The exogenous and endogenous factors necessary for the formation of domanicoid deposits of the Malginskaya Formation are considered. A mechanism leading to the formation of abnormally low ¹³C content in the Middle and Upper Riphean sediments with a range of –33.0...–35.0 ‰ is proposed. On the basis of isotopic data potentially-enable source-bed horizons within the Aldan-Maya depression are examined.

Keywords: Riphean, isotopic composition, carbon, oxygen, facies, sedimentation, diagenesis, epigenesis, domanicoid rocks, organic matter.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-1-48-56

Геологическое строение района исследований, перспективы нефтегазоносности

В региональном плане Алдано-Майская впадина представляет собой краевую юго-восточную часть Алданской антеклизы, крупной надпорядковой структуры на востоке Сибирской платформы. Здесь известен мощный стратотипический разрез рифейских отложений в объеме всех трех отделов системы. Впадина имеет асимметричное строение с пологим западным склоном, плавно погружающимся к востоку с увеличением мощности разреза. Восточный склон впадины характеризуется более крутыми углами наклона и нарушен дислокациями Нелькано-Кыллахской зоны надвигов.

Объект исследования находится на южной периклинали Алдано-Майской впадины, в бассейне

среднего течения р. Мая. Исследовались отложения тотинской и малгинской свит среднерифейского возраста и лахандинской серии позднерифейского. Кроме того, изучено несколько образцов кандыкской свиты позднего рифея, перекрывающей породы лахандинской серии.

Породы тотинской свиты представлены переслаивающимися пестроцветными алевролитами, песчаниками и аргиллитами общей мощностью 170–700 м. Вышележащая малгинская свита имеет двучленное строение: нижняя часть сложена микрозернистыми пестроцветными известняками, верхняя (пачка) – темно-коричневыми битуминозными известняками с прослоями черных мергелей, обогащенных органическим веществом (ОВ). Общая мощность малгинской свиты 95–100 м, верхней битуминозной пачки – до 20–25 м.

Лахандинская серия представлена ритмичной толщей терригенных и карбонатных пород, подразделяемых (снизу вверх) на кумахинскую терригенную, мильконскую карбонатную, нельканскую преимущественно терригенную и игниканскую карбонатную свиты. Общая мощность серии в бассейне р. Мая варьирует в широких пределах – 780–1200 м.

Перспективы нефтегазоносности юго-востока Сибирской платформы в значительной степени связаны с нефтегазопроизводящими отложениями среднего и верхнего рифея [4, 11, 12]. В рифейских отложениях Алдано-Майской впадины (одноименной нефтегазоносной области) выделяется Майский очаг нефтегазообразования [2]. Интерес представляют доманикоидные отложения верхней части малгинской свиты на южной периклинали впадины и терригенные отложения лахандинской серии в центральной части впадины [12].

Параметрическая Усть-Майская скв. 366 была пробурена до глубины 3715 м и не вскрыла ципандинскую и малгинскую свиты среднего рифея, забой остался на уровне вышележащих пород лахандинской серии. Таким образом, вскрыты только отложения верхнего отдела рифея, включающие уйскую и лахандинскую серии. Исследования образцов из этих свит показали, что вклад пород верхнего рифея в нефтегазовый потенциал оценен недостаточно. В керне разреза венда и верхнего рифея обнару-

жены многочисленные нефте- и битумопроявления, которые подтвердили высокие перспективы нефтегазоносности Алдано-Майской впадины [13]. Эти данные свидетельствуют также о значительной роли пород верхнего рифея в процессах нефтегазообразования [12].

С целью получения дополнительных сведений о нефтегазовом потенциале отложений рифея Алдано-Майской впадины проводятся комплексные литогеохимические исследования проб, отобранных из обнажений рифея в бассейнах рек Юдома и Мая (рис. 1). Изотопно-геохимические исследования являются составной частью этого комплекса. При подготовке настоящей статьи использованы материалы изотопных исследований рифейских пород, выполненные в Томском филиале СНИИГГиМС. Для всех проб проведены изотопные определения углерода и кислорода карбонатной составляющей пород (КСП) и углерода рассеянного органического вещества (РОВ). Изотопный состав определялся на масс-спектрометре DELTA V Advantage с погрешностью $\pm 0,5\%$ с учетом химической подготовки.

Изотопный состав проб

Из нижней части разреза, представленной отложениями тотинской свиты, было отобрано пять образцов аргиллитов. Изотопный состав РОВ с небольшими вариациями имеет значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -29,0\%$, что характерно для керогена II типа уровня катагенеза MK_{1-2} . Изотопный состав КСП со значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -0,7\%$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{cp}} = 25,6\%$ отражает осадкообразование в нормально-морском бассейне (табл. 1) [3, 7, 17].

Отложения малгинской свиты были исследованы в пробах, представляющих собой две группы с различным литологическим составом (см. табл. 1). Карбонатные породы представлены пятью пробами, в которых содержание C^{13} РОВ повышено (в среднем $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -27,5\%$), что может быть вызвано спецификой биоценотической основы ОВ [1]. Изотопный состав карбонатного разреза со средними значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = 0,6\%$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{cp}} = 25,1\%$ характеризует карбонаты, осаждение которых происходило в нормально-морском глубоководном бассейне [8].

В сапропелевых аргиллитах и мергелях малгинской свиты РОВ отличается изотопно-легким составом углерода ($\delta^{13}\text{C} = -30,4\text{...}-34,7\%$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -32,8\%$). В этом разрезе независимо от типа пород и изотопного состава углерода и кислорода КСП наблюдается чередование РОВ с изотопно-низким содержанием C^{13} ($-33,0\text{...}-34,7\%$) и более высоким, типичным для керогена II типа ($-30,4\text{...}-31,7\%$) (табл. 1–3) [2, 8, 9, 18]. Такое распространение $\delta^{13}\text{C}$ в разрезе свидетельствует об отсутствии зависимости изотопного состава углерода РОВ от условий осадконакопления в пределах этой фациальной зоны малгинской свиты. Изотопный состав КСП терригенного разреза облегчен относительно проб карбонатного разреза и соответствует

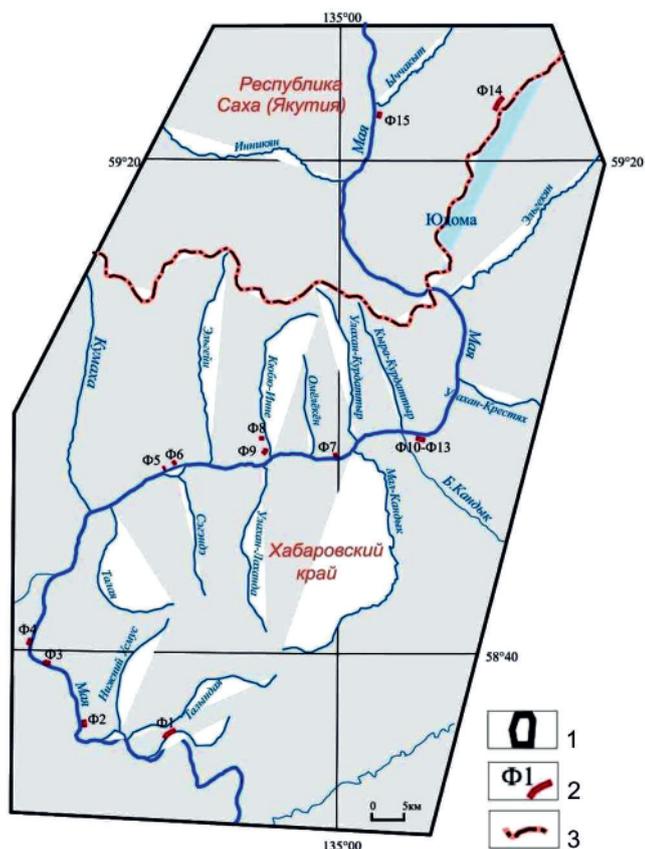


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб 1 – контур района работ; 2 – обследованные обнажения коренных пород; 3 – административная граница



Таблица 1

Изотопный состав проб отложений среднего и верхнего рифея

Свита, серия (возраст)	Тип породы	Кол-во проб	ОВ, $\delta^{13}\text{C}$, ‰	КСП	
				$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
Тоттинская (R ₂)	Аргиллиты	5	$\frac{-28,2...-29,2}{-29,0}$	$\frac{1,5...-1,7}{-0,7}$	$\frac{26,5...24,5}{25,6}$
Малгинская (R ₂)	Карбонаты	5	$\frac{-26,1...-28,0}{-27,5}$	$\frac{1,7...-0,8}{-0,6}$	$\frac{25,9...24,7}{25,1}$
«	Сапропелевые аргиллиты, мергели	13	$\frac{-30,4...-34,7}{-32,8}$	$\frac{-0,2...-1,5}{-0,5}$	$\frac{25,1...23,1}{23,9}$
Лахандинская (R ₃)	Аргиллиты	12	$\frac{-24,7...-29,3}{-27,4}$	$\frac{0,5...-3,1}{-1,1}$	$\frac{26,4...16,5}{23,1}$
«	Карбонаты	15	$\frac{-27,3...-33,9}{-30,6}$	$\frac{2,9...0,1}{1,2}$	$\frac{26,8...22,9}{25,2}$
Кандыкская (R ₃)	«	5	$\frac{-26,5...-33,4}{-30,2}$	$\frac{2,0...0,6}{1,4}$	$\frac{25,7...21,6}{24,5}$

Примечание. В числителе – интервал значений, в знаменателе – среднее.

Таблица 2

Изотопный состав проб отложений малгинской свиты (разрез терригенного фациального типа)

Шифр пробы	Порода	Битумоиды, $\delta^{13}\text{C}$, ‰	ОВ, $\delta^{13}\text{C}$, ‰	КСП		C _{орг} , %
				$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	
Ф1-2-09	Аргиллит алевритовый	–	–30,4	–1,1	24,0	4,75
Ф1-3-09	Известняк глинистый	–30,3	–30,6	–1,5	23,4	3,21
Ф1-4-09	Аргиллит черный	–31,3	–34,0	–1,2	23,3	8,71
Ф1-6-09	Карбонат серый	–	–34,7	–0,8	25,1	–
Ф1-7-09	Доломит	–	–34,0	+0,3	25,1	1,53
Ф1-8-09	Алевролит доломитистый черный	–31,0	–33,0	–0,3	23,9	4,48
Ф1-9-09	Алевролит глинистый	–30,0	–30,5	–0,5	23,8	2,70
Ф1-10-09	Аргиллит, алевролит глинистый, листовой	–	–32,7	–0,4	23,1	15,2
Ф1-11-09	Сланец глинистый темно-серый	–	–32,4	–0,3	23,1	5,91
Ф1-12-09	Аргиллит алевритовый	–	–31,7	–0,4	23,2	3,96
Ф1-13-09	Алевролит глинистый	–	–30,5	–0,6	23,9	3,25
Ф1-14-09	Мергель черный	–	–33,4	–0,2	24,1	4,56
Ф1-15-09	Карбонат с прослоями аргиллитов	–30,2	–34,2	–0,8	23,4	17,23

Таблица 3

Изотопный состав проб отложений малгинской свиты (разрез карбонатного фациального типа)

Шифр пробы	Порода	ОВ, $\delta^{13}\text{C}$, ‰	Карбонатная составляющая	
			$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
Ф3-1-09	Известняк светло-серый	–28,0	–0,8	24,7
Ф3-2-09	Карбонат кремовый	–26,1	+0,5	24,8
Ф3-3-09	Карбонат	–26,2	+1,0	25,5
Ф3-4-09	Карбонат буро-вишневый	–28,5	+0,5	24,8
Ф3-5-09	Известняк серый	–27,1	+1,7	25,9

более мелководным прибрежно-морским фациям с $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -0,5$ ‰ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{cp}} = 23,9$ ‰.

Образование РОВ с аномально низким содержанием $\delta^{13}\text{C}$ происходит в процессе эпигенеза из миграционных битумоидов при их конденсации и полимеризации, в также синтезе «вторичного» керогена [5, 14, 16]. Это подтверждается более низким содержанием ^{13}C в РОВ относительно битумо-

идов из тех же образцов (см. табл. 2). Изотопный состав углерода битумоидов в пяти образцах варьирует в интервале $-30,0...-31,3$ ‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -30,6$ ‰, а в РОВ тех же образцов $\delta^{13}\text{C}_{\text{cp}} = -32,5$ ‰ в интервале $-30,5...-34,2$ ‰. Отложения этого разреза содержат 1,4–16 % (в среднем 6 %) ОВ, что дает основание относить эти породы к типичным доманикоидным формациям. ОВ терригенного разреза малгинской



свиты характеризуется высоким остаточным генерационным потенциалом S_2 (более 100 мг УВ/1 г породы) и высоким водородным индексом (300–600 мг/г породы при зрелости MK_{1-2}) [2].

Согласно теоретически обоснованному и общепринятому положению о распределении изотопного состава в парах кероген – битумоид более высокое содержание ^{13}C должно быть в керогене относительно битумоида при условии их сингенетичности [1, 8, 9, 19]. Такое распределение $\delta^{13}C$ наблюдается для ОВ большинства проб из потенциальных нефтепроизводящих отложений. Отклонение от подобной взаимосвязи чаще проявляется в битуминозных отложениях кембрия и докембрия, чем в битуминозных отложениях фанерозоя. Понижены значения $\delta^{13}C$ в РОВ относительно битумоидов, например, в образцах битуминозных доломитов из отложений венда – нижнего кембрия разреза Кугасской скв. 264 (Непско-Богоубинская антеклиза, Сибирская платформа) [6]. Необычайно низкие значения $\delta^{13}C$ (–34,3...–37,1 ‰) в нерастворимом органическом веществе (НОВ) образцов, отобранных из обнажений жербинской и тиновской свит Патомского нагорья, объясняется образованием изотопно-лег-

кого вторичного НОВ [16]. Как правило, изотопное облегчение керогена относительно битумоида наблюдается в породах с аномально легким изотопным составом углерода НОВ (–34...–38 ‰).

Изотопный состав углерода из пород лахандинской серии также был исследован в двух литологических разностях: карбонатной и терригенной (табл. 4). Изотопный состав РОВ карбонатного разреза имеет значение $\delta^{13}C_{cp} = -30,6$ ‰, свойственное керогену II типа среднего уровня катагенеза (MK_{1-3}). В РОВ также наблюдается большие вариации $\delta^{13}C$ (–27,3...–33,9 ‰) независимо от литологического состава пород. Образование РОВ с низкими значениями $\delta^{13}C$ объясняется содержанием вторичного керогена, как и в отложениях малгинской свиты. Осаждение карбонатов этого разреза согласно изотопному составу кислорода и углерода происходило в условиях нормальной морской обстановки ($\delta^{13}C_{cp} = 1,4$ ‰, $\delta^{18}O_{cp} = 25,2$ ‰).

РОВ в образцах терригенного разреза этой свиты отличается наиболее высоким содержанием ^{13}C со значениями $\delta^{13}C_{cp} = -27,4$ ‰ относительно других разрезов рифея. Такое содержание ^{13}C в РОВ может быть обусловлено вторичными процессами,

Таблица 4

Изотопный состав отложений лахандинской серии

Шифр пробы	Порода	ОВ, $\delta^{13}C$, ‰	Карбонатная составляющая	
			$\delta^{13}C$, ‰	$\delta^{18}O$, ‰
Ф4-1-09	Аргиллит зеленовато-коричневый	–28,4	+0,1	22,6
Ф4-2-09	Карбонат светло-серый	–29,1	–11,2	19,4
Ф5-1-09	«	–28,8	+1,0	24,3
Ф5-2-09	«	–27,8	+1,5	26,1
Ф5-3-09	Известняк серый	–32,4	+1,3	24,5
Ф5-4-09	Карбонат светло-серый	–29,2	+0,4	24,0
Ф5-5-09	Известняк темно-серый	–28,8	+1,5	22,9
Ф5-6-09	«	–32,6	+1,2	23,5
Ф6-1-09	Карбонат серый	–27,3	+1,4	24,7
Ф6-2-09	«	–31,2	+2,0	26,8
Ф6-3-09	Известняк серый	–29,1	+1,9	25,3
Ф6-4-09	«	–33,9	+1,3	25,5
Ф6-5-09	«	–32,3	+1,4	24,7
Ф6-6-09	«	–33,5	+1,3	24,8
Ф6-7-09	Известняк темно-серый	–31,9	+1,9	24,4
4	Аргиллит серый	–34,5	–	–
11	Аргиллит зеленовато-серый	–26,2	–	–
5	Аргиллит серый	–29,0	–	–
6	Аргиллит	–26,0	–0,6	25,6
7	Аргиллит серый	–28,9	–0,7	18,5
8	Доломит серый	–29,3	–0,6	25,9
9	Мергель вишневым	–26,5	+0,5	26,2
10	Аргиллит серый	–26,1	+0,2	16,5
Ф7-1-09	Аргиллит коричневый	–25,3	–2,8	25,9
Ф7-2-09	«	–26,7	–3,1	26,4
Ф7-3-09	Аргиллит черно-коричневый	–24,7	–2,0	21,9
Ф7-4-09	Аргиллит	–24,7	–1,8	22,8

что наглядно показано на рис. 2–4. В КСП этого разреза также большие вариации изотопного состава кислорода и углерода, что вызвано фракционированием на стадии эпигенеза ($\delta^{13}\text{C} = +0,5 \dots -3,1 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 26,4 \text{--}16,5 \text{ ‰}$).

В отложениях кандыкской свиты содержится изотопно-легкое РОВ со значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{сп}} = -30,2 \text{ ‰}$, свойственными керогену II типа уровня катагенеза (МК_{1–2}). Изотопный состав КСП характеризует осаждение карбонатов этих отложений в условиях нормально-морской обстановки.

Основные закономерности вариаций изотопного состава углерода и кислорода КСП и углерода РОВ отложений среднего и верхнего рифея

Средние значения изотопного состава кислорода образцов исследованных свит среднего и верхнего рифея лежат в узком интервале (25,6–23,1 ‰), который характерен для изотопного состава карбонатов нормально-морских и прибрежно-морских бассейнов. Более облегченный изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{сп}} = 23,1 \text{--}16,5 \text{ ‰}$) наблюдается в пробах терригенных разрезов малгинской свиты и лахандинской серии, что отражает осадконакопление в более мелководных бассейнах относительно бассейнов карбонатных фаций данных свит (см. табл. 3, 4). Изотопный состав углерода КСП облегчен во всех терригенных разрезах сравнительно с пробами карбонатных разрезов: средние значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{сп}}$ КСП терригенных разрезов тотинской, малгинской свит и лахандинской серии составляют $-0,7 \dots -0,5 \text{ ‰}$ и $-1,1 \text{ ‰}$, а в карбонатных разрезах они имеют положительные значения: $0,6 \text{ ‰}$, $1,4 \text{ ‰}$ и $1,3 \text{ ‰}$ (см. табл. 1).

На примере образцов малгинской свиты и лахандинской серии, в которых отобрано большее количество проб, опробованы породы двух литологических типов – карбонатного и терригенного. Рассмотрены взаимосвязи $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ карбонатной составляющей пород, а также изотопного состава РОВ с изотопным составом углерода и кислорода КСП.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ КСП образцов из отложений карбонатных и терригенных разрезов малгинской и лахандинской свит представлены в графическом виде на рис. 2, на котором также нанесена линия уравнения, характеризующая взаимосвязь изотопного состава углерода и кислорода нормально-морских не измененных на стадии эпигенеза карбонатов [7, 11, 16]:

$$\delta^{13}\text{C} = 0,4\delta^{18}\text{O} - 10,3. \quad (1)$$

На рис. 2 выделяется область распределения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для большого числа проб, которая выражается следующим уравнением линейной регрессии:

$$\delta^{13}\text{C} = 0,54\delta^{18}\text{O} - 13, \quad (2) \\ R^2 = 0,292.$$

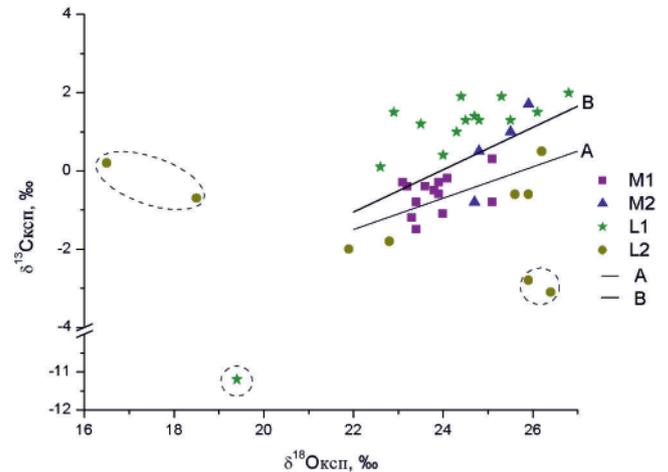


Рис. 2. Изотопный состав углерода и кислорода КСП отложений малгинской и лахандинской свит

M1 – малгинская свита терригенный разрез, M2 – малгинская свита карбонатный разрез, L1 – лахандинская свита карбонатный разрез, L2 – лахандинская свита терригенный разрез; пунктир – область эпигенетических карбонатов и карбонатных цементов; сплошная линия: А – морские не измененные в эпигенезе карбонаты по уравнению (1); В – регрессия $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ КСП отложений по уравнению (2)

Коэффициент аппроксимации линейной функции (2) близок к достоверному уровню приближения ($R^2 \geq 0,3$).

Отклонения от этой зависимости наблюдается в пяти образцах лахандинской свиты с более легким изотопным составом углерода ($-2,8 \dots -11,0 \text{ ‰}$) и кислорода (19,5–16,5 ‰), которые претерпели наибольшее преобразование в эпигенезе (образцы выделены пунктирной обводкой). Прямая корреляция значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ КСП с угловыми коэффициентами 0,4–0,6 определяется термодинамическим фракционированием на стадиях седиментогенеза и диагенеза [6, 7, 17]. Разница значений $\delta^{18}\text{O}$ линии регрессии в 5 ‰ (26,8–21,8 ‰) согласно угловому коэффициенту уравнения (2), равному 0,54, должна привести к изменению изотопного состава углерода на 2,7 ‰, но фактический интервал вариаций равен 4 ‰ (2,0...–2,0 ‰), т. е. на 1,3 ‰ больше расчетного. Это более значительный интервал сравнительно с определяемым термодинамическим фракционированием, что обусловлено различиями условий на стадии осадконакопления карбонатных и терригенных фаций. Повышенное на 1,3 ‰ содержание ^{13}C в карбонатных фациях относительно терригенных при одних и тех же значениях $\delta^{18}\text{O}$ вызвано более активной аэрацией и интенсивным водообменом морского бассейна при образовании карбонатных осадков относительно прибрежно-морских более спокойных режимов, при которых формируются осадки терригенного типа. При активной аэрации повышается содержание ^{13}C в карбонатах за счет более полного достижения изотопного равновесия в системе $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3 - \text{CaCO}_3$ [3, 16].

Для оценки влияния фациальных условий седиментации на изотопный состав углерода РОВ рассмотрена взаимосвязь $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ с $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}}$. Между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$, как показано на рис. 3, также проявляется прямая корреляция, которая может быть выражена следующими уравнениями:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 1,52\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}} - 66,7, \quad (3)$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 1,96\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}} - 76,2. \quad (4)$$

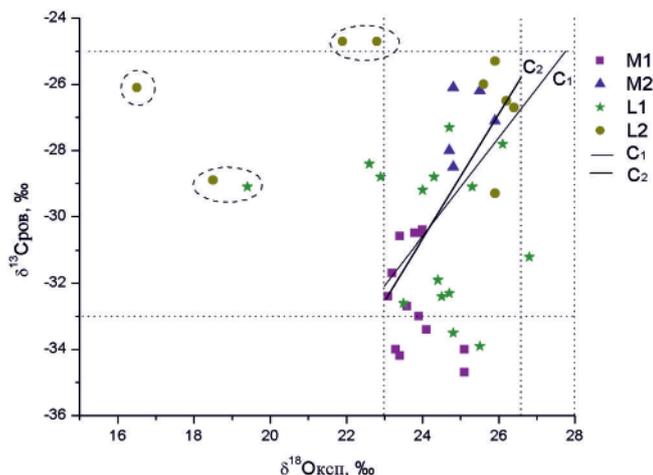


Рис. 3. Изотопный состав углерода РОВ и кислорода КСП C_1 , C_2 – линии регрессии $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ по уравнениям (3–5); остальные усл. обозн. см. на рис. 2

При расчете коэффициентов уравнения (3) и построении линий регрессии $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}/\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ принят интервал $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ 23–27 ‰, при котором не учитывались значения изотопного состава проб лахандинской серии, преобразованных в эпигенезе, и значения двух проб с $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}} < 23$ ‰. Интервал $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ для этого уравнения принят –26...–33,0 ‰ без учета изотопно-легких образцов, в которых РОВ считается «вторичным». Для уравнения (3) получен коэффициент аппроксимации $R^2 = 0,42$.

При ограничении интервала $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ до 26,5 ‰ (за исключением одной пробы с $\delta^{18}\text{O} = 26,8$ ‰) получено уравнение (4) линии регрессии C_2 с более высоким уровнем аппроксимации $R^2 = 0,60$.

При рассмотрении интервалов значений $\delta^{18}\text{O}$, при котором дополнительно учитывались данные двух проб лахандинской серии $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ (20,6 ‰ и 21,8 ‰), получено следующее уравнение:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 1,12 \delta^{18}\text{O} - 56,8. \quad (5)$$

При таких граничных условиях уравнения (5) коэффициент аппроксимации снижается до $R^2 = 0,29$. Области значений при расчете уравнений (3–5) на рис. 3 выделены пунктирными линиями.

Прямая корреляция $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$ показывает, что особенности морского бассейна, характеризующиеся значениями $\delta^{18}\text{O}_{\text{КСП}}$, оказывали значительное влияние на изменения изотопного состава углерода РОВ в интервале $\delta^{13}\text{C} -26,0$...–33,0 ‰.

Из зависимости, определяемой уравнениями (3–5), следует, что при относительно низких значениях $\delta^{18}\text{O}$, характеризующих более мелководные фации, формируется ОВ более облегченного изотопного состава. Для исследованных образцов без учета значений $\delta^{18}\text{O}$, вызванных процессами эпигенеза, на основе изотопного состава кислорода КСП показано, что более мелководными являются терригенные фации малгинской свиты.

На рис. 4 в графическом виде представлена взаимосвязь изотопного состава углерода РОВ и КСП, которая для двух выборок проб выражена следующими уравнениями:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 0,224 \delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}} - 30,0, \quad (6)$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 0,78 \delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}} - 29,3. \quad (7)$$

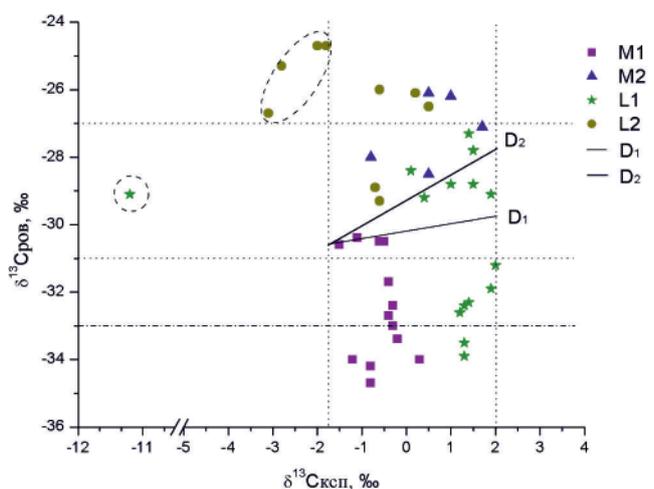


Рис. 4. Изотопный состав углерода РОВ и КСП Пунктир – линии регрессии $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}}$ по уравнениям (6–8); остальные усл. обозн. см. на рис. 2

Уравнение (6) и соответствующая линия регрессии D_1 получены для проб в интервалах значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} -27,0$...–33,0 ‰ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}} +2$...–1,8 ‰. Коэффициент аппроксимации при этом весьма низкий ($R^2 = 0,14$).

Для уравнения (7) и линии регрессии D_2 интервал значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ сужен до –27,0...–31,0 ‰, что увеличило коэффициент аппроксимации до 0,60.

Для промежуточных значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ (–27,0...–32,0 ‰) уравнение регрессии будет иметь вид

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}} = 0,44 \delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}} - 30,4 \quad (8)$$

с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,31$, который соответствует достоверной степени приближения ($R^2 \geq 0,30$).

Прямая корреляция $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{КСП}}$ согласно уравнениям (7, 8) с $R^2 = 0,60$ –0,31 дает основание считать, что фациальные условия на стадиях осадкообразования оказали основное влияние на изотопный состав углерода РОВ в интервале –27...–32,0 ‰. Большой фактический интервал вариаций $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ отражает значительное влияние на изотопный состав

углерода РОВ этих отложений вторичных процессов, не вызванных фаціальными условиями седиментации. Отклонение относительно расчетных значений в сторону увеличения содержания C^{13} (до $-24,7...-26,5\%$) в существенной степени вызвано более высоким уровнем катагенетического преобразования ОВ этих образцов, возможно вследствие динамокатагенеза. Более широкий относительно расчетного интервал значений $\delta^{13}C_{POB}$ в сторону отрицательных показателей обусловлен пробами с изотопно-легким составом углерода РОВ ($-33,0...-34,7\%$), которые могут содержать значительную долю вторичного керогена (РОВ), обедненного изотопом C^{13} и образованного на стадии эпигенеза [5, 6, 15].

Особенностями отложений терригенного разреза малгинской свиты, которые характеризуются как доманикоидные, является облегченный изотопный состав углерода РОВ ($-30,4...-34,7\%$). Если в общем числе проб не учитывать пробы с изотопно-легким составом от $-32,4$ до $-34,7\%$, в которых велик вклад «вторичного» керогена, тогда изотопный состав углерода РОВ, который формировался в зависимости от фаціальных условий, будет $-30,4...-32,4\%$, в среднем $-31,0\%$. Это достаточно близко к расчетным показателям в соответствии с уравнениями (3–5) и (7, 8).

Фаціальные условия седиментации терригенных отложений малгинской свиты, при которых образуются карбонаты и карбонатные цементы с изотопным составом $\delta^{13}C = -0,2...-1,5\%$ (в среднем $-0,5\%$) и $25,5-23,1\%$ ($23,9\%$) характеризуют прибрежно-морские достаточно глубоководные бассейны. Из изотопного состава углерода и кислорода КСП следует, что фаціальные условия осадконакопления отложений малгинской свиты были подобны или близки таковым тотинской свиты рифея и отложений верхнего рифея (лахандинская серия, нельканская и кандыкская свиты). Таким образом, фаціальные условия, соответствующие нормально-морским и прибрежно-морским бассейнам, были необходимыми, но недостаточными условиями образования отложений доманикоидного типа.

Как следует из ранее проведенных полевых работ, в терригенных отложениях разреза малгинской свиты наблюдались широко развитые подводно-оползневые деформации, образование которых обусловлено активацией тектонических (вулканогенных) процессов. Такие нарушения в осадочных отложениях позволяют рассматривать эндогенные факторы в качестве необходимых, способствующих образованию пород с высоким содержанием планктоногенного ОВ, к которым относят доманикоидные отложения малгинской свиты (рис. 5) [10, 12].

Формирование РОВ изотопно-легкого состава ($-33,0...-34,7\%$) обусловлено высоким содержанием миграционных битумоидов в породах малгинской и лахандинской свит, присутствие которых подтверждает нефтепроизводящую роль малгинской свиты в бассейне среднего течения р. Мая.

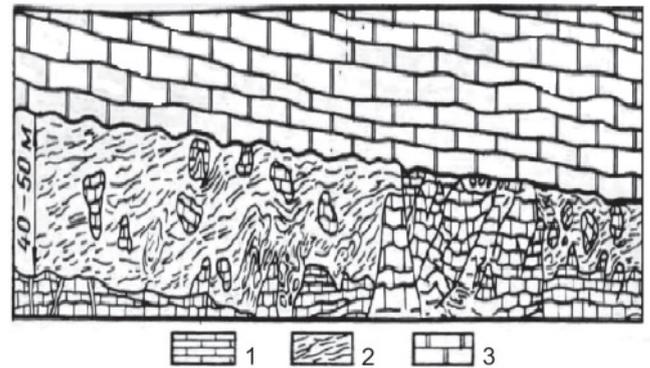


Рис. 5. Сингенетичные подводно-оползневые деформации в обогащенных сапропелевым ОВ малгинских сланцах рифея Восточной Сибири (р. Мая)

1 – известняки малгинской свиты; 2 – черные сланцы; 3 – доломиты ципандинской свиты

Высокое распространение проб с изотопно-легким составом углерода РОВ ($-33,0...-34,7\%$) в разрезах малгинской и лахандинской свит и наличие единичных проб в разрезах всех свит рифея – показатель большого поступления миграционных битумоидов в отложения этих свит. В районе исследований вероятным источником миграционных битумоидов могут быть доманикоидные отложения верхней части малгинской свиты.

Выводы

1. По данным средних значений изотопного состава углерода и кислорода КСП ($\delta^{13}C_{cp} +1,4...-0,7\%$, $\delta^{18}O_{cp} 25,6-23,1\%$) следует, что фаціальные условия осадкообразования отложений среднего (тотинской и малгинской свит) и верхнего (лахандинской серии, нельканской и кандыкской свит) рифея различались незначительно и соответствовали морским и прибрежно-морским фациям.

2. Для изотопного состава углерода и кислорода КСП отложений среднего и верхнего рифея наблюдается прямая корреляция значений $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$, которая характеризует термодинамическое фракционирование на стадии седиментации данных отложений (уравнение 2) и указывает на невысокое воздействие эпигенеза на преобразование КСП.

3. В отложениях малгинской свиты и лахандинской серии изотопный состав углерода и кислорода более облегченный в образцах из терригенных разрезов, что характеризует осадконакопление карбонатных отложений в более глубоководных морских фациях.

4. Единичные образцы из отложений лахандинской серии с более легким изотопным составом углерода ($-2,8...-11,0\%$) и кислорода ($19,5-16,5\%$) в КСП рассматриваются как эпигенетически преобразованные и не учитываются при оценке фаціальных условий осадкообразования отложений этой свиты.

5. Изотопный состав углерода РОВ из отложений тотинской и малгинской свит среднего рифея и лахандинской серии (нельканской и кандыкской свит)



верхнего имеет большие вариации ($-24,7...-34,7$ ‰, в среднем $-27,4...-32,8$ ‰), который характеризует ОВ планктоногенного типа уровня катагенеза МК₁₋₃.

6. Прямая корреляция изотопного состава углерода РОВ с изотопным составом углерода и кислорода КСП в почти 70 % проб показывает, что в более мелководных прибрежно-морских фациях формируется ОВ более облегченного изотопного состава сравнительно с морскими глубоководными фациями. Фациальные условия седиментации, согласно уравнениям (6, 7), приводят к изменению изотопного состава углерода РОВ отложений малгинской свиты и лахандинской серии не более чем на 5 ‰. Более значительные вариации $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ вызваны фракционированием изотопного состава на стадиях диагенеза и катагенеза, а также образованием «вторичного» керогена из миграционных битумоидов.

7. РОВ с наиболее низкими значениями $\delta^{13}\text{C}$ ($-33,0...-34,7$ ‰), которое более всего распространено в отложениях малгинской свиты и лахандинской серии, а также встречается в единичных образцах нельканской и кандыкской свит, может рассматриваться как вторичное, образованное из миграционных битумоидов при их конденсации и полимеризации.

8. Основная часть образцов исследуемых свит среднего и верхнего рифея содержит РОВ с изотопным составом углерода в интервале $-29,0...-32,8$ ‰, который характеризует ОВ преимущественно альгопланктоногенного состава уровня катагенеза МК₁₋₂.

9. Широкое распространение в разрезах малгинской свиты среднего рифея и в разрезах свит верхнего рифея проб, в которых РОВ изотопно-легкого состава ($-33,0...-34,7$ ‰), а также отсутствие сингенетичности между РОВ (керогеном) и битумоидами в этих пробах – показатель больших масштабов миграции битумоидов в породах указанных свит.

10. Условия осадконакопления, соответствующие прибрежно-морским фациям по изотопному составу КСП ($\delta^{13}\text{C}_{\text{СП}} = -0,2...-1,5$ ‰, в среднем $-0,5$ ‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{СП}} = 25,1-23,1$ ‰, в среднем $23,9$ ‰), были необходимыми, но недостаточными для образования в терригенных фациях малгинской свиты пород доманикоидного типа с высоким содержанием РОВ (~ 6 ‰) и изотопно-легким составом $\delta^{13}\text{C}_{\text{РОВ}}$ ($-30,5...-34,7$ ‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{СП}} = 32,8$ ‰).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баженова Т. К., Голышев С. И., Падалко Н. Л.** Связь изотопного состава углерода органического вещества с его историко-генетическими особенностями (Сибирская платформа) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14, № 4. – URL: http://www.hgtp.ru/rub/2019/35_2019/html.

2. **Баженова Т. К., Дахнова М. В., Жеглова Т. П.** Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего – среднего кембрия Сибирской платформы. – М.: ВНИГНИ, 2014. – 127 с.

3. **Галимов Э. М.** Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 224 с.

4. **Геология** нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. – М.: Недра, 1981. – 550 с.

5. **Голышев С. И.** Стабильные изотопы в нефтегазовой и рудной геологии: избр. тр. – Новосибирск, 2010. – 269 с.

6. **Голышев С. И., Перозио Г. Н., Печенкин С. А.** Природные вариации изотопного состава углерода и кислорода рифогенных отложений кембрия Сибирской платформы Восточной Сибири // Геохимия. – 1981. – № 11. – С. 1719–1726.

7. **Карбонаты.** Минералогия и химия / под ред. Р. Дж. Ридера. – М.: Мир, 1987. – 494 с.

8. **Конторович А. Э., Богородская Л. И., Голышев С. И.** Закономерности фракционирования изотопов углерода в седиментах // Геология и геофизика. – 1985. – № 9. – С. 4–42.

9. **Конторович А. Э., Богородская Л. И., Голышев С. И.** Распределение стабильных изотопов в седиментах различной генетической природы // Геология и геофизика. – 1985. – № 7. – С. 3–11.

10. **Неручев С. Г.** Уран и жизнь в истории Земли. – Л.: Недра, 1982. – 206 с.

11. **Нефтегазоносность** рифея Сибирской платформы / А. Э. Конторович, А. К. Башарин, Г. С. Фрадкин и др. // Геология и тектоника платформ и орогенных областей Северо-Востока Азии: матер. совещ. Т. II. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. – С. 21–24.

12. **Новые** данные о перспективах нефтегазоносности Алдано-Майской впадины / П. Н. Соболев, О. В. Шиганова, С. В. Дыхан, А. Р. Ахмедова // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 3–4. – С. 643–656.

13. **Основные** результаты изучения кембрийских, вендских и рифейских пород в параметрической скважине 366 (I этап) / О. В. Шиганова, Н. С. Грибов, В. В. Горбачев и др. // Матер. 2-й науч.-практ. конф. Т. 2. – Новосибирск: СНИИГГИМС, 2015. – С. 163–165.

14. **Особенности** формирования изотопно-легкого углерода органического вещества отложений Сибирской платформы / С. И. Голышев, Н. Л. Падалко, П. Н. Соболев и др. // X Междунар. конф. «Химия нефти и газа». Тез. докл. – Томск, 2018. – С. 716–720.

15. **Соболев П. Н.** Геохимия доманикоидной малгинской свиты Юдомо-Майской впадины // Геология угленосных и горючесланцевых формаций Сибири. – Новосибирск: СНИИГГИМС, 1987. – С. 69–76.

16. **Тимошина Н. Д.** Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юго-восточной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 166 с.

17. **Хёфс Й.** Геохимия стабильных изотопов. – М.: Мир, 1983. – 197 с.

18. **Stable** Isotopes in Source-Bed Organic Matter of West and East Siberia / S. I. Golyshev,



N. A. Verhovskaya, V. N. Burkova, et al. // Organic Geochemistry. – 1991. – Vol. 17, no. 3. – P. 277–291.

19. Stahl W. I. Source rock crude oil correlation by isotopic typecumes // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1978. – Vol. 42. – P. 1573–1577.

REFERENCES

1. Bazhenova T.K., Golyshev S.I., Padalko N.L. [The relationship of the isotopic composition of organic matter with its historical and genetic features (Siberian Platform)]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika – Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 2019, vol. 14, no. 4. URL http://www.hgtp.ru/rub/2019/35_2019/html. (In Russ.).

2. Bazhenova T.K., Dakhnova M.V., Zheglova T.P. *Neftegazomaterinskiye formatsii nefti i gaza dokembriya i nizhnego – srednego kembriya Sibirskoy platformy* [Oil-and-gas source formations of the Precambrian and Lower-Middle Cambrian of the Siberian Platform]. Moscow, VNIGNI Publ., 2014. 127 p. (In Russ.).

3. Galimov E.M. *Geokhimiya stabilnykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable carbon isotopes]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p. (In Russ.).

4. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A., eds. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoy platformy* [Oil and gas geology of the Siberian Platform]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 550 p. (In Russ.).

5. Golyshev S.I. *Stabilnyye izotopy v neftegazovoy i rudnoy geologii: izbrannyye trudy* [Stable isotopes in petroleum and mining geology: selected works]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2010. 269 p. (In Russ.).

6. Golyshev S.I., Perozio G.N., Pechenkin S.A. [Natural variations of carbon and oxygen isotopic composition of the Cambrian reef sediments of the Siberian Platform in East Siberia]. *Geokhimiya – Geochemistry International*, 1981, no. 11, pp. 1719–1726. (In Russ.).

7. Reeder R.J., ed. *Karbonaty: mineralogiya i geokhimiya* [Carbonates: Mineralogy and Geochemistry]. Moscow, Mir Publ., 1987. 494 p. (In Russ.).

8. Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshev S.I. *Zakonomernosti fraktsionirovaniya izotopov ugleroda v sedikakhites* [Patterns of carbon isotope fractionation in sediments]. *Geologiya i geofizika* 1985, no. 9, pp. 34–42. (In Russ.).

9. Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshev S.I. [Distribution of stable carbon isotopes in sediments of different genetic nature]. *Geologiya i Geofizika*, 1985, no. 7, pp. 3–11. (In Russ.).

10. Neruchaev S.G. *Uran i zhizn v istorii Zemli* [Uranus and life in the Earth's history]. Leningrad, Nedra Publ., 1982. 206 p. (In Russ.).

11. Kontorovich A.E., Basharin A.K., Fradkin G.S., et al. [Petroleum potential of the Riphean of the Siberian Platform]. *Geologiya i tektonika platform i orogennykh oblastey severo-vostoka Azii: Materialy soveshchaniya* [Geology and tectonics of platforms and orogenic regions of Northeast Asia: Materials of Conference]. Yakutsk, YaSC SB RAS Publ., 1999, vol. 2., pp. 21–24. (In Russ.).

12. Sobolev P.N., Shiganova O.V., Dykhan S.V., Akhmedova A.R. [New data on the petroleum potential of the Aldan-Maya depression]. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, p. 529–540.

13. Shiganova O.V., Gribov N.S., Gorbachyev V.V., et al. [Main results of the study of Cambrian, Vendian and Riphean rocks in parametric 366 well (Stage I)]. *Materialy vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T.2* [Materials of the 2nd Scientific and Research Conference. Vol. 2]. Novosibirsk, 2015, pp. 163–165. (In Russ.).

14. Golyshev S.I., Padalko N.L., Sobolev P.N., et al. [Features of the formation of isotopically light carbon organic matter of the Siberian Platform deposits]. *X mezhdunarodnaya konferentsiya "Khimiya nefti i gaza". Tesisy* [10th International Conference on Oil and Gas Chemistry. Theses]. Tomsk, 2018, pp. 716–720. (In Russ.).

15. Sobolev P.N. [Geochemistry of the domancoid Malginskaya Formation of the Yudoma-Maya depression]. *Geologiya uglenosnykh i goryuchslantsevykh formatsiy Sibiri* [Geology of coal-bearing and oil shale formations of Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1987, pp. 69–76. (In Russ.).

16. Timoshina N.D. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva nefteproizvodyashchikh porod i neftey verkhnego dokembriya yugo-vostochnoy Sibiri* [Geochemistry of organic matter of oil source rocks and oils from the Upper Precambrian of southern East Siberia]. Novosibirsk, 2005, SB RAS Publ. 166 p. (In Russ.).

17. Hoefs J. *Geokhimiya stabilnykh izotopov* [Stable isotope geochemistry]. Moscow, Mir Publ., 1983. 197 p. (In Russ.).

18. Golyshev, S.I., Verhovskaya, N.A., Burkova V.N., et al. Stable Isotopes in Source-Bed Organic Matter of West and East Siberia. *Organic Geochemistry*, 1991, vol. 17, no. 3, pp. 277–291.

19. Stahl W.I. Source rock crude oil correlation by isotopic typecumes. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1978, vol. 42, pp. 1573–1577.

© С. И. Голышев, П. Н. Соболев, Н.Л. Падалко, С. В. Дыхан, П. Ф. Яворов, М. И. Праздничных, 2022