

АНАЛИЗ МИНЕРАЛОВ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ МЕТОДОМ КР-СПЕКТРОСКОПИИ (НА ПРИМЕРЕ НЕОГЕНОВЫХ ТОЛЩ СЕВЕРО- ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА О. САХАЛИН)

**А.В. Куликова^{1,2,*}, П.Д. Котлер^{1,2}, Р.Н. Музафаров¹, Е.А. Булгакова³, М.В. Сначев³,
Р.Н. Гайнаншин³, С.Ф. Хафизов⁴**

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, РФ, Казань

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, РФ, Новосибирск

³Группа компаний «Газпром нефть», РФ, Санкт-Петербург

⁴РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, РФ, Москва

Электронный адрес: ak_cool@mail.ru

Введение. В нефтяной геологии анализ минералов тяжелой фракции важен для реконструкции источников сноса, условий транспортировки и диагенеза терригенных пород, но классическая оптическая методика имеет ограничения, которые преодолеваются использованием КР-спектроскопии, поскольку метод даёт возможность надёжно идентифицировать как прозрачные, так и непрозрачные и хорошо окатанные зёрна, фиксировать полиморфные модификации и минералы микронных размеров, что существенно расширяет информативность исследований тяжёлой фракции по сравнению с классической оптической микроскопией. Метод применен для скважин северо-восточного шельфа Сахалина — ключевого нефтегазоносного региона с неогеновыми терригенными коллекторами, для которых ранее почти не было детальных исследований тяжёлой фракции.

Цель. Изучение состава минералов тяжелой фракции песчаников неогеновых нефтегазоносных толщ (нутовский горизонт) северо-восточного шельфа о. Сахалин методом КР-спектроскопии по материалам керна и шлама скважин, удалённых на разное расстояние от берега, для оценки положения источников сноса, минералогической зрелости и пространственных вариаций состава.

Материалы и методы. Проведены исследования методом КР-спектроскопии керна и шлама нутовского горизонта миоцен-плиоценового возраста пяти скважин с разных месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин.

Результаты. Полученные результаты позволили подтвердить предположения о единстве источника сноса для нижне- и верхненутовских отложений и установить близость его расположения. Диагностированные ассоциации тяжёлых минералов могут использоваться в будущем как основа для разработки диагностических реперов для разделения нижне- и верхненутовского горизонтов в скважинах, что актуально в условиях молодых неогеновых осадков, сложно стратифицируемых при отсутствии руководящих биформ, а также для атрибуции керна/шлама, утратившего сопроводительную описательную документацию.

Заключение. КР-спектроскопия — информативный метод для описания источников сноса.

Ключевые слова: анализ минералов тяжелой фракции, рамановская спектроскопия (КР-спектроскопия), нутовский горизонт, терригенные отложения, о. Сахалин, источники сноса

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: разработка метода анализа минералов тяжелой фракции выполнена за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2026-0031.

Для цитирования: Куликова А.В., Котлер П.Д., Музафаров Р.Н., Булгакова Е.А., Сначев М.В., Гайнаншин Р.Н., Хафизов С.Ф. Анализ минералов тяжелой фракции методом КР-спектроскопии (на примере неогеновых толщ северо-восточного шельфа о. Сахалин). ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2026;11(2):6–17.
<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2026-11-2-6-17>

Статья поступила в редакцию 16.04.2026

Принята к публикации 06.05.2026

Опубликована 30.06.2026

MINERAL ANALYSIS OF THE HEAVY FRACTION VIA RAMAN SPECTROSCOPY: INSIGHTS FROM NEOGENE DEPOSITS OF THE NORTHEASTERN SAKHALIN SHELF

Anna V. Kulikova^{1,2,*}, Pavel. D. Kotler^{1,2}, Rafael N. Muzafarov¹, Ekaterina A. Bulgakova³,
Michail V. Snachev³, Rustam N. Gainanshin³, Sergey F. Khafizov⁴

¹Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, RF, Novosibirsk

³Gazprom нефть company group, RF, Saint Peterburg

⁴Gubkin Russian State University of Oil and Gas, RF, Moscow

E-mail: ak_cool@mail.ru

Introduction. In petroleum geology, heavy mineral analysis is an important tool for reconstructing sediment provenance, transport conditions, and diagenetic history of terrigenous rocks. However, the classical optical method has certain limitations that can be overcome by Raman spectroscopy, as this technique enables reliable identification of both transparent and opaque as well as well-rounded grains, and allows the detection of polymorphic modifications and micron-sized minerals. This significantly enhances the informational value of heavy mineral studies compared to conventional optical microscopy. The method was applied to wells drilled on the northeastern Sakhalin shelf—a key petroleum-bearing region with Neogene terrigenous reservoirs that have been only poorly investigated in terms of their heavy mineral composition.

Aim. To study the composition of heavy mineral assemblages in sandstones of the Neogene petroleum-bearing succession (Nutov Horizon) on the northeastern Sakhalin shelf using Raman spectroscopy on core and cuttings samples from wells located at varying distances from the coast, in order to assess source area position, mineralogical maturity, and spatial variations in composition.

Materials and methods. A Raman spectroscopy study was carried out on core and drill cuttings material from the Nutov Horizon (Miocene–Pliocene) across five wells representing various fields on the northeastern shelf of Sakhalin Island.

Results. The results confirm the assumption of a common provenance for the Lower and Upper Nutov deposits and indicate the proximal position of the source area. The identified heavy mineral associations can serve in the future as diagnostic markers for distinguishing between Lower and Upper Nutov subhorizons in well sections—particularly useful for young Neogene sediments that are difficult to stratify in the absence of index fossils, as well as for attributing core or cuttings samples that have lost their descriptive documentation.

Conclusion. Raman spectroscopy is an informative method for characterizing sediment provenance.

Keywords: heavy mineral analysis, Raman spectroscopy, Nutov Horizon, terrigenous sediments, Sakhalin Island, sediment provenance

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financing: the development of the method for analyzing minerals of the heavy fraction was funded by a subsidy allocated to Kazan Federal University to fulfill a state assignment in the field of scientific activity, project No. FZSM-2026-0031.

For citation: Kulikova A.V., Kotler P.D., Muzafarov R.N., Bulgakova E.A., Snachev M.V., Gainanshin R.N., Khafizov S.F. Mineral analysis of the heavy fraction via raman spectroscopy: insights from neogene deposits of the northeastern Sakhalin shelf. PRONEFT. Professionally about oil. 2026;11(2):6–17. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2026-11-2-6-17>

Manuscript received 16.04.2026

Accepted 06.05.2026

Published 30.06.2026

ВВЕДЕНИЕ

Состав тяжёлой фракции песчаников определяется комплексом факторов, включающих состав пород в области сноса, условия транспортировки и осаднения, а также процессы растворения минералов при диагенезе и катагенезе [1, 2].

Традиционно изучение минералов тяжёлой фракции проводится методами оптической микроскопии в иммерсионных препаратах, однако данный подход имеет ряд существенных ограничений, связанных с трудностями идентификации мелких зёрен, метамиктных разновидностей минералов и фаз со сходными оптическими свойствами [3].

В последние десятилетия всё более широкое применение в минералогических исследованиях находит метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР-спектроскопии или рамановской спектроскопии), позволяющий проводить неразрушающую экспресс-идентификацию минералов на основе их характеристических колебательных спектров [4]. В отличие от классического анализа минералов тяжёлой фракции с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния обладает рядом преимуществ: исключается человеческий фактор, значительно повышается точность диагностики, появляется возможность надёжно определять непрозрачные или хорошо окатанные минералы,

а также полиморфные модификации [5]. Кроме того, метод позволяет уверенно идентифицировать минералы размером всего в несколько микрон, что открывает новые возможности в исследовании пород. Исследования являются первым этапом в работе по изучению положения, состава и возраста источников сноса неогеновых толщ северо-восточного шельфа о. Сахалин.

ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ ПЕСЧАНИКОВ НЕОГЕНОВЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТОЛЩ ШЕЛЬФА О. САХАЛИН ПРЕДЛОЖЕН МЕТОД КР-СПЕКТРОСКОПИИ, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ ПО КЕРНУ И ШЛАМУ СКВАЖИН ОПРЕДЕЛЯТЬ ПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ СНОСА, МИНЕРАЛОГИЧЕСКУЮ ЗРЕЛОСТЬ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СОСТАВА ТОЛЩ.

ПОЛОЖЕНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод применен на песчаниках керна и шлама пяти поисково-разведочных скважин месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин нутовского горизонता плиоцен-четвертичного возраста кайнозоя (рис. 1), различающихся по степени удалённости от современной береговой

линии. Стратиграфия и общая литологическая характеристика кайнозойских отложений Сахалина рассмотрены в ряде фундаментальных работ [6–9], однако детальные минералогические исследования тяжёлой фракции песчаников продуктивных горизонтов восточного шельфа до настоящего времени оставались крайне ограниченными. Подобные исследования необходимы для решения задач корреляции разрезов, реконструкции палеогеографических обстановок и определения источников терригенного материала, что имеет непосредственное значение для прогноза качества коллекторов и оптимизации геолого-разведочных работ.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Остров Сахалин расположен в зоне перехода от Евразийского континента к Тихому океану и принадлежит к северной части Западно-Тихоокеанского орогенного пояса, сформированного в результате длительной прерывистой субдукции Тихоокеанской плиты под восточную окраину Азии начиная с раннего мезозоя (рис. 1) [10, 11]. Современный структурный облик о. Сахалин сформирован двумя основными тектоническими процессами: 1) позднемезозойско-раннепалеогеновой

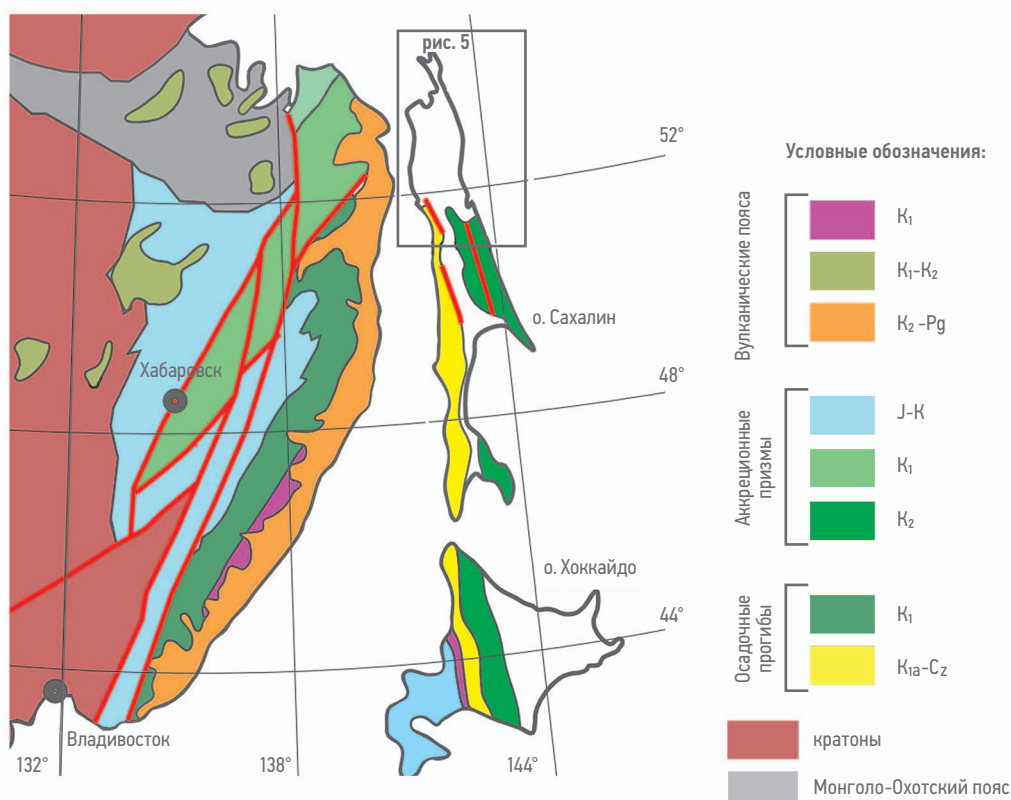


Рис. 1. Тектоническая схема Сихотэ-Алинского региона и прилегающих территорий [12]
Fig. 1. Tectonic scheme of the Sikhote-Alin region and adjacent territories [12]

субдукцией и аккрецией и 2) позднепалеогеново-неогеновой правосторонней транс-прессией вдоль Центрально-Сахалинского разлома.

Фундамент о. Сахалин гетерогенен и состоит из мезозойских и кайнозойских образований, при этом палеозойские и докембрийские породы на острове не обнажаются [13, 14]. Центрально-Сахалинский разлом, являющийся надвигом со сдвиговой компонентой и рассматриваемый рядом исследователей как граница между Евразийской и Охотоморской литосферными плитами, разделяет остров на две основные структурные области [15].

Западно-Сахалинский террейн представляет собой преддуговой бассейн, связанный с позднемеловым–палеогеновым Восточно-Сихотэ-Алинским вулканическим поясом [16]. В пределах Западно-Сахалинских гор сохранена 5-километровая поздне-раннемеловая–раннепалеогеновая терригенная осадочная последовательность, перекрытая мощной (до 12 км) толщей эоцен-плиоценовых кластических отложений [17, 18]. Восточно-Сахалинский аккреционный комплекс обнажается в Восточно-Сахалинских горах и на полуострове Тонино-Анива. Он сложен

преимущественно юрско-меловыми терригенными породами в фации зеленосланцевого метаморфизма, а также подчинёнными гемипелагическими кремнистыми и туффитово-кремнистыми аргиллитами, океаническими пелагическими радиоляриевыми кремнями и офиолитовым меланжем с блоками ультрабазитов, габбро, известняков и базальтов пермского–позднемелового возраста [12, 15, 19]. Метаморфический и деформированный аккреционный комплекс несогласно перекрыт кайнозойскими осадочными толщами. Отложения чехла представлены терригенными отложениями семи горизонтов (рис. 2), среди которых дагинский, окобыкайский и нутовский горизонты являются основными нефтегазоносными комплексами региона.

В нутовском горизонте выделяется нижний и верхний подгоризонты. Нижненутовский подгоризонт верхнего миоцена представлен терригенно-кластическими отложениями. Согласно [21] в северо-восточной части о. Сахалин для нижненутовского подгоризонта выражены уменьшение песчаности в восточном направлении и вниз по разрезу, характерные для дельтовой системы. Верхненутовский подгоризонт верхнего

Система	Отдел	Подотдел	Горизонт (подгоризонт)	Пласты, выделяемые в нутовско-окобыкайских отложениях	Литология
Неоген	Плиоцен		Дерюгинский		Прибрежно-морские пески с гравийно-галечным материалом и прослоями глин
			Помырский		От разнотерригенных песков с гравийно-галечным материалом до глин и диатомитов
	Миоцен	Верхний	Верхне-нутовский	I-IV V, VI, VII, VIII, IX-X	Переслаивание слаболигитизированных песчаников, алевролитов, глин
			Нижне-нутовский	IX XII, XIII-XIV XVI-XVII, XVIII XIX, XX XXI, XXII XXIII, XXIV, XXV XXVI, XXVII XXVIII, XXIX	
		Средний	Окобыкайский	XXX XXXI, XXVII	Переслаивание песчаников, алевролитов и глин, встречаются кремнисто-глинистые породы, которым подчинены глинистые песчанники
			Дагинский		Алевролито-глинистые породы и заглинизированные песчанники (Даги-1, Пильтун-Астоская-18)
		Нижний	Уйнинский		
	Олигоцен		Даехурийский+Мачигарский		Переслаивание перекристаллизованных диатомитов и кремнистых аргиллитов (даехурийский горизонт, в скв. Даги-1 мощность 232 м; в скв. Пильтун-Астоская-18 вскрытая мощность 52 м); переслаивание туфогенных алевролитов с темно-серыми аргиллитами (мачигарский горизонт, скв. Даги-1 вскрытая мощность 26 м)
Палеоген	Эоцен				
	P ₁				
Акустический фундамент (K)					

Рис. 2. Сводная стратиграфическая схема кайнозойских отложений северо-восточного шельфа Сахалина [20]
Fig. 2. Summary stratigraphic scheme of the Cenozoic succession on the NE Sakhalin shelf [20]

миоцена—нижнего плиоцена сложен ритмичным чередованием разномерных пород: от песчаников с псефитовым составом до пелитового. Вверх по разрезу наблюдается уменьшение песчаности пород.

МЕТОД АНАЛИЗА МИНЕРАЛОВ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ КР-СПЕКТРОСКОПИЕЙ

Спектроскопия комбинационного рассеяния основана на неупругом рассеянии фотонов, известном как комбинационное рассеяние. Лазерный свет взаимодействует с колебаниями атомов в молекулах или другими возбуждениями в системе, в результате чего энергия лазерных фотонов смещается в область высоких или низких значений. Сдвиг энергии даёт информацию о колебательных модах в системе. В результате формируется КР-спектр с определенной позицией и геометрией пиков, которые отражают информацию о химических соединениях, составе и структуре вещества. После получения КР-спектра выполняется его обработка, которая включает вычитание базовой линии и сглаживание шумов для улучшения соотношения сигнал/шум. Обработанный спектр сравнивается с эталонными спектрами из баз данных для идентификации вещества (рис. 3). В Центре геотермохронологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета анализ минералов тяжелой фракции методом КР-спектроскопии выполняется следующим образом. Образцы измельчают с помощью щековой дробилки, после чего просеивают на сите для выделения зерен меньше 0,25 мм. Затем пробы промывают под проточной водой

для удаления легких пылеватых частиц. Далее пробы разделяют на легкую и тяжелую фракцию с использованием тяжелой жидкости ГПС-В (концентрированный водный раствор гетерополивольфрамата натрия) плотностью $2,80 \pm 0,05$ г/мл (по ТУ). Часть тяжелой фракции образца, отобранную после квартования, помещают на клеопереносную ленту и заливают эпоксидной смолой. Затем препарат шлифуют примерно на треть — половину толщины зерна и полируют.

Анализ проводился на рамановском спектрометре с дифракционной решеткой 1800 шт/мм с микроскопом с длиной волны излучения 532 нм. Калибровка выполнялась на монокристаллическом кремниевом стандарте. Препараты устанавливались на предметном столике спектрометра, после чего создавалось мозаичное изображение образца, охватывающее площадь съемки. В пределах участка проводилась съемка спектров комбинационного рассеяния зёрен методом картирования по сетке. Точкой съемки являются узлы сетки. В среднем сетка характеризуется плотностью около 2000 узлов и соответственно содержит 2000 спектров. Параметры съемки, тип лазера и дифракционной решетки определялись методом подбора. Диапазон спектров комбинационного рассеяния — $73\text{--}1836\text{ см}^{-1}$. Результатом являлся набор спектров комбинационного рассеяния по узлам сетки, характеризующий состав минеральных фаз зёрен. Набор спектров подвергался кластеризации, в результате чего, аналогичные спектры объединяются в отдельные кластеры (рис. 4). Каждый кластер характеризует одну из разновидностей минеральных фаз тяжелой фракции. Затем путем сравнения

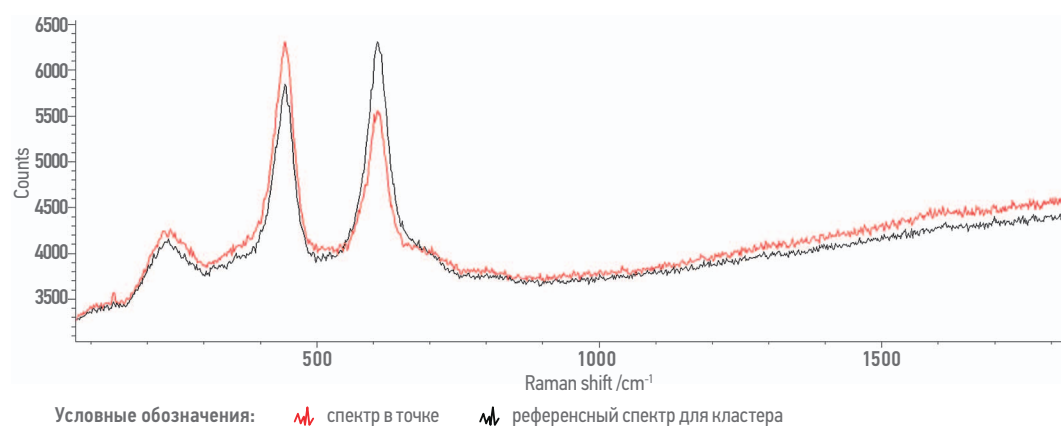


Рис. 3. Полученные спектры комбинационного рассеяния рутила. Составлено авторами
Fig. 3. Obtained Raman spectra of rutile. Prepared by the authors

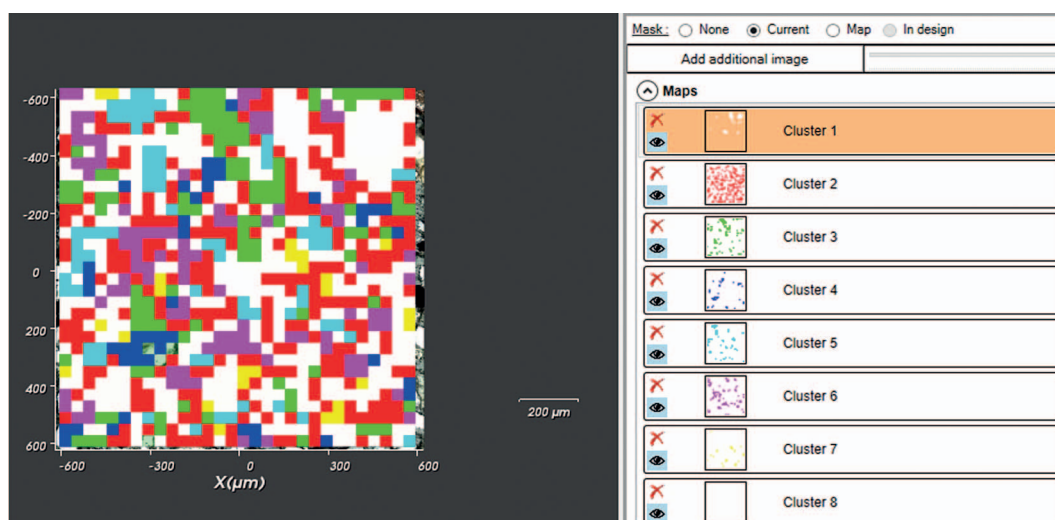


Рис. 4. Окно кластерного анализа по результатам проведённого картирования. Составлено авторами
 Fig. 4. Cluster analysis window based on the results of the mapping performed. Prepared by the authors

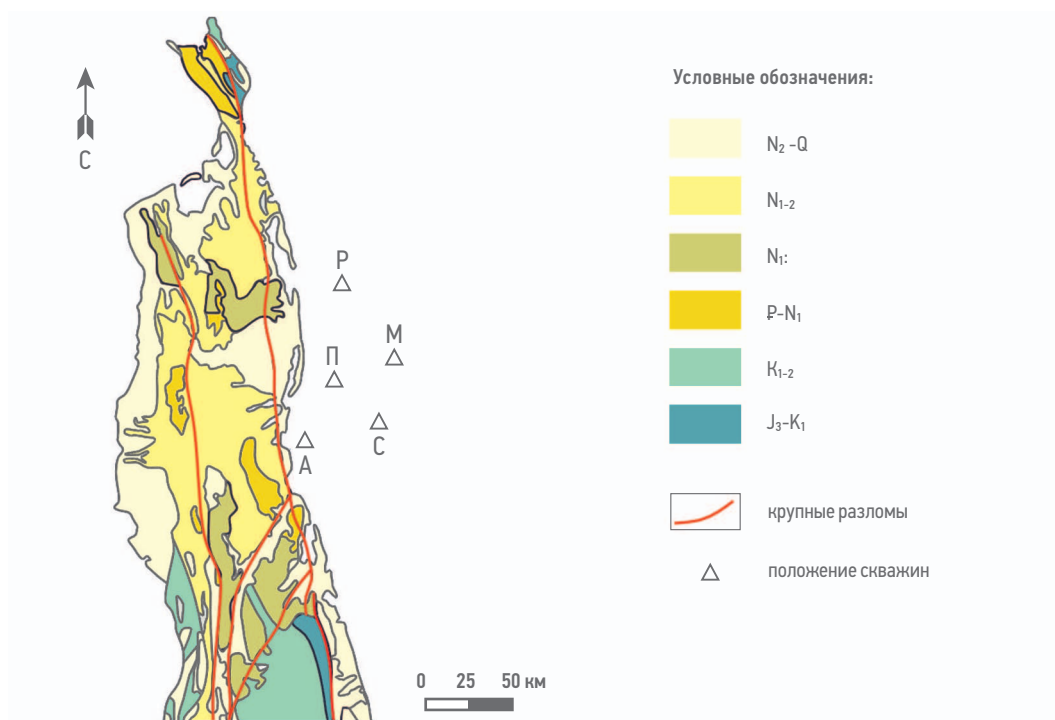


Рис. 5. Геологическая схема северной части о. Сахалин с положением изучаемых скважин [15]
 Fig. 5. Geological map of northern Sakhalin Island with locations of studied wells [15]

с базами данных осуществляется идентификация спектров каждого кластера. Параллельно проводится подсчёт спектров (точек съёмки) в соответствии с распределением по минеральным фазам, получая объёмные проценты.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МИНЕРАЛОВ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ

Всего было изучено 8 образцов шлама и керны песчаников нутовской свиты

из пяти скважин северо-восточного шельфа о. Сахалин (рис. 5). Результаты анализа минералов тяжелой фракции представлены в таблице 1.

В трех образцах шлама, отобранных из скважины М (верхненутовский подгоризонт) преобладает барит (90–97 %) (табл. 1). Так как это образцы шлама, то такое количество барита можно связать с буровым раствором, в состав которого входит данный минерал, но не исключена также и аутигенная природа этого минерала. Среди аутигенных минералов в данных пробах следует отметить пирит

Таблица 1. Результаты анализа минералов тяжелой фракции песчаников из скважин северо-восточного шельфа о. Сахалин. Составлено авторами
Table 1. Heavy-mineral analysis results for sandstones from northeastern Sakhalin shelf wells. Prepared by the authors

№	Образец (св. и глубина, м)	Стратиграфия	Материал	Ана- таз	Апа- тит	Ру- тил	Цир- кон	Тита- нит	Гра- нат	Мо- на- цит	Тур- ма- лин	Иль- ме- нит	Бру- кит	Пи- рок- сен	Био- тит	Хром- шпи- нель	Пи- рит	Си- де- рит	Маг- нетит	Ба- рит	ZTR	АТі
1	М 1525	нутовская свита, верхняя подсвита	шлам	кол-во	23	20	3	6	26	5	8	0	0	0	0	0	8	0	15	1036	1	
				%	2,00	1,74	0,26	0,52	2,26	0,43	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	1,30	90,09		
2	М 1735	нутовская свита, верхняя подсвита	шлам	кол-во	10	11	4	7	23	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1071	1	
				%	0,89	0,97	0,35	0,62	2,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	94,86		
3	М 1830	нутовская свита, верхняя подсвита	шлам	кол-во	3	2	5	3	2	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	667	1	
				%	0,44	0,29	0,73	0,44	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	96,81		
4	М 2698	нутовская свита, нижняя подсвита	кern	кол-во	6	14	8	18	6	8	0	0	0	0	0	0	90	568	0	42	3	
				%	0,79	1,84	1,05	2,37	0,79	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,84	74,74	0,00	5,53		
5	С 1222	нутовская свита, верхняя подсвита	кern	кол-во	60	74	8	36	134	56	0	8	44	2	0	0	76	0	0	12	10	90
				%	11,76	14,51	1,57	7,06	26,27	10,98	0,00	1,57	8,63	0,39	0,00	0,00	14,90	0,00	0,00	2,35		
6	А 1644	нутовская свита, нижняя подсвита	кern	кол-во	60	62	67	76	0	87	0	20	0	7	0	0	0	0	38	0	30	76
				%	14,08	14,55	15,73	17,84	0,00	20,42	0,00	4,69	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	8,92	0,00		
7	П 2088	нутовская свита, нижняя подсвита	кern	кол-во	69	26	118	3	92	32	0	13	17	4	0	0	2	0	44	1	32	67
				%	16,35	6,16	27,96	0,71	21,80	7,58	0,00	3,08	4,03	0,95	0,00	0,00	0,47	0,00	10,43	0,24		
8	Р 1672	нутовская свита, нижняя подсвита	кern	кол-во	53	79	102	62	20	170	2	10	0	1	5	1	3	12	44	40	29	89
				%	8,76	13,06	16,86	10,25	3,31	28,10	0,33	1,65	0,00	0,17	0,83	0,17	0,50	1,98	7,27	6,61		

в виде сферического агрегата (0,7–1,2 %). Среди терригенных минералов образцов шлама скважины М выделяются анатаз, апатит, рутил, циркон, титанит, которые не превышают 2,5 % (рис. 6, табл. 1). Помимо этого, в образце М 1525 присутствует гранат (0,4 %) и монацит (0,7 %), а также выделяется магнетит (1,3 %).

Тяжелая фракция образца керна, отобранного из интервала 2698 м скважины М (нижненутовский подгоризонт), преимущественно сложена сидеритом аутигенного происхождения (74,74 %). Помимо этого, в породе среди аутигенных минералов присутствуют пирит (11,84 %) и барит (5,53 %) (табл. 1). Детритовые минералы в составе тяжелой фракции представлены анатазом, апатитом, рутилом, цирконом, титанитом и гранатом, которые не превышают 2,5 % (рис. 6, табл. 1).

Для образцов керна нижненутовского подгоризонта скважин А, П и Р тяжелая фракция сложена в основном детритовыми минералами (84–91 %) — анатазом, апатитом, рутилом, цирконом, титанитом, гранатом, а также турмалином, ильменитом и брукитом. Преобладающим среди этих минералов являются анатаз (9–16 %), апатит (6–15 %), рутил (16–28 %), циркон (1–18 %), гранат (8–28 %), в меньшей степени встречаются титанит (0–22 %), турмалин (2–5 %), ильменит (1–10 %), брукит (0,2–1,6 %), хромшпинели (до 2 %)

(рис. 6, табл. 1). Для образца скважины Р характерны пироксены и биотиты (0,83 и 0,17 %). Аутигенные минералы в рассматриваемых образцах представлены пиритом, магнетитом, баритом и сидеритом, не превышающие 16 % (табл. 1).

В образце керна С 1222 верхненутовского подгоризонта скважины С среди терригенных минералов преобладают анатаз (12 %), апатит (15 %), циркон (7 %), титанит (26 %), гранат (11 %) и ильменит (9 %). В меньшей степени при анализе минералов тяжелой фракции встречаются рутил (1,5 %), турмалин (1,5 %), брукит (0,4 %) (рис. 6, табл. 1). Аутигенные минералы в образце С 1222 представлены пиритом и сидеритом (14,9 и 2,4 % соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В трех образцах шлама из скважины М (верхненутовский подгоризонт) доля барита составляет 90–97 %, что является аномально высоким значением для природных терригенных осадков. Учитывая, что данные образцы отобраны из шлама, наиболее вероятным объяснением является техногенное заражение буровым раствором, в состав которого он входит. Это подтверждается отсутствием сопоставимых концентраций барита в керновых образцах из других скважин

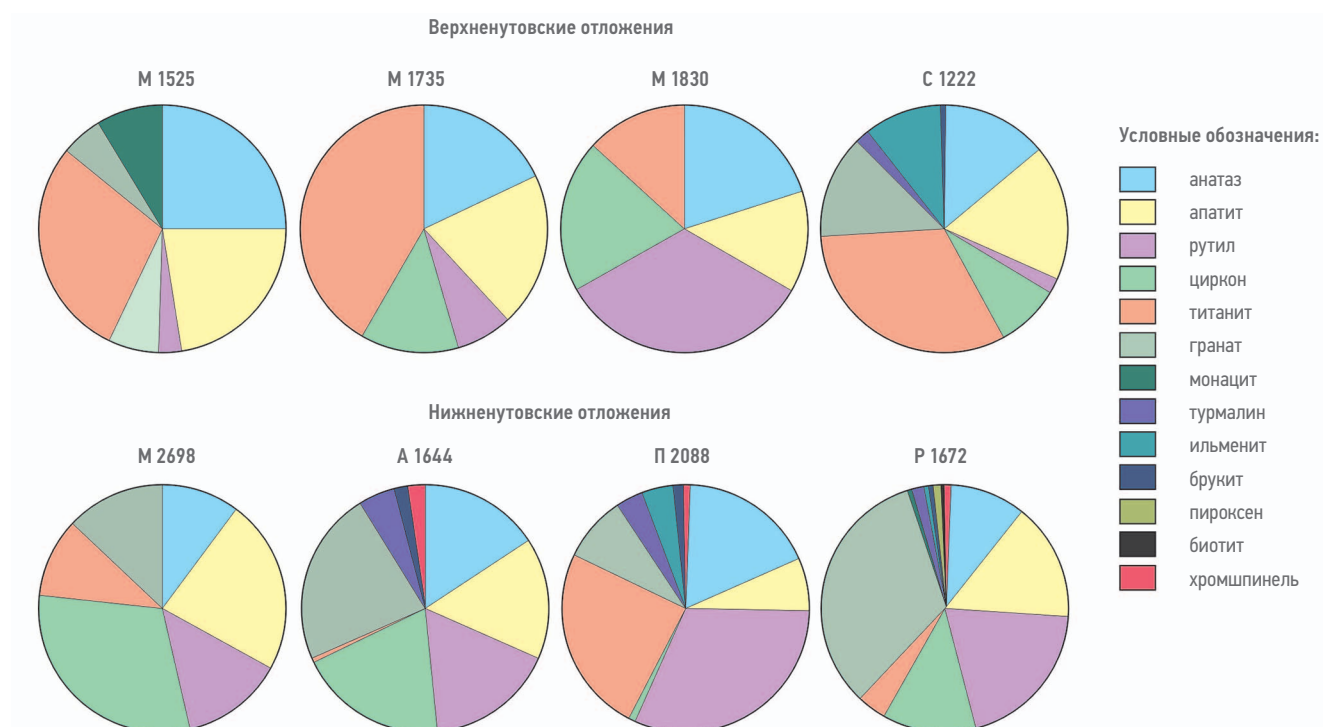


Рис. 6. Распределение терригенных минералов тяжелой фракции в песчаниках из скважин северо-восточного шельфа о. Сахалин. Составлено авторами

Fig. 6. Terrigenous heavy-mineral distribution in sandstones from northeastern Sakhalin shelf wells. Prepared by the authors

региона. Среди аутигенных минералов в данных пробах следует отметить пирит в виде сферического агрегата. Это может указывать на восстановительные, анаэробные (бескислородные) условия, часто в морских и прибрежно-морских обстановках. Также пирит иногда ассоциируется с зонами выделения метана, где сульфатредукция (бактериальное восстановление сульфатов с участием органики и метана) приводит к образованию пирита [22].

Тяжелая фракция образца керна № М 2698 (нижненутовский подгоризонт) преимущественно сложена сидеритом аутигенного происхождения (74,74 %). Образование агрегатов сидерита, вероятнее всего, происходило на этапе раннедиагенетического преобразования осадка в восстановительных или слабовосстановительных условиях [23]. Помимо этого, в породе среди аутигенных минералов присутствуют пирит и барит. Среди терригенных минералов образцов скважины М преимущественно выделяются анатаз, апатит, рутил, циркон, титанит, реже гранат и монацит (рис. 6). В образце № М 1525 также выделяется магнетит, который может формироваться на разных стадиях, включая осадконакопление и эпигенез, часто в присутствии органики.

Стоит отметить, что необходимо с осторожностью относиться к результатам по анализу минералов тяжелой фракции образцов шлама верхненутовских отложений, так как может присутствовать статистическая ошибка из-за большого количества (более 90 %) барита, входящего в состав бурового раствора, а также вероятность заражения пробы из нижележащих горизонтов. Для образца керна М 2698 нижненутовского подгоризонта более 90 % аутигенных сидерита, пирита и барита может свидетельствовать о глубоководной или лагунной восстановительной обстановке с активной сульфатредукцией. Незначительная доля терригенных минералов в скважине (менее 10 %) может отражать особенности образца — не представительность выборки терригенных минералов тяжелой фракции в образце, что не позволяет корректно количественно описать минералы тяжелой фракции. Однако общность состава терригенных минералов тяжелой фракции в скважине с остальными скважинами указывает на единство источника сноса (рис. 6). Для образцов керна нижненутовских отложений скважин А, П и Р тяжелая фракция сложена преимущественно анатазом, апатитом, рутилом, цирконом, титанитом, гранатом, реже встречаются турмалин, ильменит, брукит и хромшпинели (рис. 6). Для образца скважины Р также характерны пироксены

и биотиты. Аутигенные минералы в рассматриваемых образцах представлены пиритом, магнетитом, баритом и сидеритом, не превышающими 16 %.

В образце керна верхненутовского подгоризонта скважины С (№ С 1222) среди терригенных минералов преобладают анатаз, апатит, циркон, титанит, гранат, ильменит. В меньшей степени при анализе минералов тяжелой фракции встречаются рутил, турмалин, брукит (рис. 6).

По составу терригенных минералов тяжелой фракции изученных образцов можно предположить, что источники сноса для образцов верхне- и нижненутовского подгоризонтов были единые. Минеральный состав указывает на поступление терригенного материала из нескольких комплексов. Гранат, рутил, биотит, ильменит/брукит, как и циркон, могут быть связаны с метаморфическими комплексами. Данные комплексы развиты западнее изучаемого региона и представлены мел-кайнозойскими образованиями аккреционных призм и отложениями осадочных прогибов (рис. 1). Циркон, титанит и турмалин, как правило, результат разрушения средних и кислых пород. Хромшпинелиды и пироксены свидетельствуют о размыве ультраосновных пород. Апатит, как правило, связан с основными породами, но также может являться результатом разрушения комплексов среднего и кислого состава. Продукты разрушения магматических пород среднего, кислого и основного состава, вероятно, связаны с также развитыми западнее вулканическими поясами мел-палеогенового возраста (рис. 1). Высокое содержание анатаза может свидетельствовать о том, что часть обломочного материала прошла через этап выветривания или была переотложена из древних нор выветривания, что находит отражение в признаках эрозии мощных толщ отложений на сейсмических разрезах.

Для оценки дальности переноса детритового материала широко применяют индексы ZTR (циркон-рутил-турмалин) и ATi (apatит-турмалин). Данные индексы основаны на факте, что рутил, циркон и турмалин в отличие от апатита стабильны к физическому и химическому выветриванию. Чем больше индексы ZTR и соответственно меньше индекс ATi, тем фиксируются более дальняя транспортировка материала, более длительная его переработка и более зрелые осадки [1, 2].

Для образцов нижненутовского горизонта №А 1644, П 2088 и Р 1672 индекс ZTR равен 30, 32 и 29, в то время как индекс ATi равен 76, 67 и 89 соответственно (табл. 1).

Это свидетельствует о достаточно близком источнике сноса терригенного материала для всех образцов. Для образца верхненутовских отложений №С 1222 характерно отсутствие высоких концентраций циркона, рутила, турмалина на фоне обилия неустойчивых минералов ($ZTR = 10$, $ATi = 90$), что указывает на незрелый осадок, поступивший с близлежащего источника. Это хорошо согласуется с представлениями о том, что в верхненутовское время, несмотря на трансгрессию моря, интенсивный рост Одоптинско-Шмидтовской зоны вывел ее выше базиса эрозии, что способствовало формированию локальных источников сноса [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ минералов тяжелой фракции методом КР-спектроскопии подтвердил общность источников сноса для нижненутовских и верхненутовских отложений и их формирование вблизи области питания, а также показал потенциальную применимость выделенных ассоциаций в качестве маркеров для стратиграфического расчленения и корреляции разрезов скважин на северо-восточном шельфе Сахалина. Полученные выводы о положении областей сноса нутовских отложений и их возраста требуют дальнейшей проверки с привлечением U–Pb датирования циркона и других методов.

Список литературы

1. Morton A.C., Hallsworth C.R. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones // *Sedimentary Geology*. — 1994. — Vol. 90. — Pp. 241–256.
2. Morton A.C., Hallsworth C.R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones // *Sedimentary Geology*. — 1999. — Vol. 124. — Pp. 3–29.
3. Mange M.A., Wright D.T. (Eds.) *Heavy Minerals in Use. Developments in Sedimentology*, 58. Amsterdam: Elsevier, 2007. — 1283 p.
4. Nasdala L., Smith D.C., Kaindl R., Zemann M.A. Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research // *EMU Notes in Mineralogy*. — 2004. — Vol. 6. — Pp. 281–343.
5. Andò S., Garzanti E. Raman spectroscopy in heavy-mineral studies // *Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production* / Eds. R.A. Scott et al. Geological Society, London, Special Publications. — 2014. — Vol. 386. — Pp. 395–412.
6. Геология СССР. Т. XXXIII. Остров Сахалин. М.: «Недра». 1970. — 207 с.
7. Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И. и др. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность. М.: «ГЕОС», 2002. — 225 с.
8. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: «Научный мир», 2010. — 276 с.
9. Шейн В.С., Игнатова В.А. Геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Дальнего Востока. — М.: «Научный мир». — 2007. — 276 с.
10. Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to present // *Island Arc*. — 1997. — Vol. 6. — Pp. 121–142.
11. Sengör A.M.C., Natal'in B.A. Palaeotectonics of Asia: fragments of a synthesis // *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: C.U.P. — 1996. — Pp. 486–640.
12. Zhabrev S. Stratigraphy and structure of the central East Sakhalin accretionary wedge (Eastern Russia) // *Russian Journal of Pacific Geology*. — 2011. — Vol. 5. — Pp. 313–335.
13. Khanchuk A.I. Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: a view from the Russian side // *Earth Science (Chikyū Kagaku)*. — 2001. — Vol. 55. — Pp. 275–291.
14. Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2016. — Vol. 120. — Pp. 117–138.
15. Zhao P., Li J., Alexandrov I., Ivin V., Jahn B. Involvement of old crustal materials during formation of the Sakhalin Island (Russian Far East) and its paleogeographic implication: constraints from detrital zircon ages of modern river sand and Miocene sandstone // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2017. — Vol. 146. — Pp. 412–430.
16. Abrajewitch A., Zhabrev S., Didenko A.N., Kodama K. Palaeomagnetism of the West Sakhalin Basin: evidence for northward displacement during the Cretaceous // *Geophysical Journal International*. — 2012. — Vol. 190. — Pp. 1439–1454.
17. Golozubov V.V., Kasatkin S.A., Grannik V.M., Nechayuk A.E. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane // *Geotectonics*. — 2012. — Vol. 46. — Pp. 333–351.
18. Zharov A.E. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous–Paleogene accretion of the East Asian continental margin // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2005. — Vol. 7. ES5002.
19. Александров И.А., Ивин В.В., Малиновский А.И., Будницкий С.Ю. Первые данные по U/Pb датированию детритовых цирконов из терригенных пород Восточно-Сахалинского аккреционного террейна // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2022. — № 13(2). — С. 0612. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0612>
20. Гайнаншин Р.Н. Шельф о. Сахалин — новые горизонты / Р.Н. Гайнаншин, Е.А. Жуковская, М.В. Сначев [и др.]. // *Нефтяное хозяйство*. — 2018. — № 12. — С. 22–24.
21. Шегай В.И., Толстиков А.В. Особенности структурно-тектонической эволюции северо-восточного шельфа о-ва Сахалин с учетом новых сейсмических данных // *Геология нефти и газа*. — 2022. — № 4. — С. 39–51.
22. Lin Q., Wang J., Algeo T.J., Sun F., Lin R. Enhanced framboidal pyrite formation related to anaerobic oxidation of methane in the sulfate-methane transition zone of the northern South China Sea // *Marine Geology*. — 2016. — Vol. 379. — Pp. 100–108.
23. Mozley P.S., Carothers W.W. Elemental and isotopic composition of siderite in the Kuparuk Formation, Alaska: effect of microbial activity and water/sediment interaction on early pore-water chemistry // *Journal of Sedimentary Research*. — 1992. — Vol. 62. — Pp. 681–692.

References

1. Morton A.C., Hallsworth C.R. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*. 1994, vol. 90, pp. 241–256.
2. Morton A.C., Hallsworth C.R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*. 1999, vol. 124, pp. 3–29.

3. Mange M.A., Wright D.T. (Eds.) *Heavy Minerals in Use. Developments in Sedimentology*, 58. Amsterdam: Elsevier, 2007. 1283 p.
4. Nasdala L., Smith D.C., Kaindl R., Ziemann M.A. Raman spectroscopy: Analytical perspectives in mineralogical research. *EMU Notes in Mineralogy*. 2004, vol. 6, pp. 281–343.
5. Andò S., Garzanti E. Raman spectroscopy in heavy-mineral studies // *Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production* / Eds. R.A. Scott et al. *Geological Society*. London, Special Publications. 2014, vol. 386, pp. 395–412.
6. *Geology of the USSR*. Vol. XXXIII. Sakhalin Island. Moscow: Nedra, 1970. 207 p. (In Russ.)
7. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I. et al. *Cenozoic of Sakhalin and Its Petroleum Potential*. Moscow: GEOS, 2002. 225 p. (In Russ.)
8. Kharakhinov V.V. *Oil and Gas Geology of the Sakhalin Region*. Moscow: Nauchnyy Mir, 2010. 276 p. (In Russ.)
9. Shein V.S., Ignatova V.A. *Geodynamics and Petroleum Potential of Sedimentary Basins of the Russian Far East*. Moscow: Nauchnyy Mir, 2007. 276 p. (In Russ.)
10. Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to present. *Island Arc*. 1997, vol. 6, pp. 121–142.
11. Sengör A.M.C., Natal'in B.A. *Palaeotectonics of Asia: fragments of a synthesis*. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: C.U.P., 1996. P. 486–640.
12. Zybrev S. Stratigraphy and structure of the central East Sakhalin accretionary wedge (Eastern Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2011, vol. 5, pp. 313–335.
13. Khanchuk A.I. Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: a view from the Russian side. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*. 2001, vol. 55, pp. 275–291.
14. Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016, vol. 120, pp. 117–138.
15. Zhao P., Li J., Alexandrov I., Ivin V., Jahn B. Involvement of old crustal materials during formation of the Sakhalin Island (Russian Far East) and its paleogeographic implication: constraints from detrital zircon ages of modern river sand and Miocene sandstone. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017, vol. 146, pp. 412–430.
16. Abrajeyvich A., Zybrev S., Didenko A.N., Kodama K. Palaeomagnetism of the West Sakhalin Basin: evidence for northward displacement during the Cretaceous. *Geophysical Journal International*. 2012, vol. 190, pp. 1439–1454.
17. Golozubov V.V., Kasatkin S.A., Grannik V.M., Nechayuk A.E. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane. *Geotectonics*. 2012, vol. 46, pp. 333–351.
18. Zharov A.E. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous–Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005, vol. 7, ES5002.
19. Alexandrov I.A., Ivin V.V., Malinovsky A.I., Budnitskiy S.Yu. First Detrital Zircon Geochronology Data for Clastic Rocks of the East Sakhalin Accretionary Terrane. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022, vol. 13, no. 2s, p. 0612. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0612>
20. Gainanshin R.N. Shelf, Sakhalin Island — new horizons / R.N. Gainanshin, E.A. Zhukovskaya, M.V. Snachev [et al.]. *Oil industry*. 2018, no. 12, pp. 22–24. (In Russ.)
21. Shegay V.I., Tolstikov A.V. Features of the Structural and Tectonic Evolution of the Northeastern Shelf of Sakhalin Island Based on New Seismic Data. *Oil and Gas Geology*. 2022, no. 4, pp. 39–51. (In Russ.)
22. Zharov A.E. South Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous–Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005, vol. 7, ES5002.
23. Mozley P.S., Carothers W.W. Elemental and isotopic composition of siderite in the Kuparuk Formation, Alaska: effect of microbial activity and water/sediment interaction on early pore-water chemistry. *Journal of Sedimentary Research*. 1992, vol. 62, pp. 681–692.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.В. Куликова — написание статьи, разработка методики, организация проведения работ.

П.Д. Котлер — написание статьи, интерпретация результатов.

Р.Н. Музафаров — разработка методики, проведение аналитических работ, обработка аналитических данных.

Е.А. Булгакова — формирование коллекции образцов, сопровождение исследований, постановка целей и задач, редактирование статьи.

М.В. Сначев — сопровождение исследований, интерпретация.

Р.Н. Гайнаншин — редактирование статьи, интерпретация данных.

С.Ф. Хафизов — редактирование статьи, интерпретация данных.

Anna V. Kulikova — writing an article, developing a methodology, organizing the work.

Pavel. D. Kotler — writing an article, interpreting the results.

Rafael N. Muzafarov — developing a methodology, conducting analytical work, processing analytical data.

Ekaterina A. Bulgakova — creation of samples collection, organization and management of the research, setting research goals and objectives, editing.

Michail V. Snachev — organization of research and support, editing.

Rustam N. Gainanshin — article editing, data interpretation.

Sergey F. Khafizov — article editing, data interpretation.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анна Викторовна Куликова* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ИГиНГТ Казанского (Приволжского) федерального университета; Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18. e-mail: ak_cool@mail.ru

Павел Дмитриевич Котлер — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН; ИГиНГТ Казанского (Приволжского) федерального университета

Рафаэль Нургалиевич Музафаров — младший научный сотрудник, ИГиНГТ Казанского (Приволжского) федерального университета

Михаил Владимирович Сначев — кандидат геолого-минералогических наук, руководитель проекта по разработке продуктов, Группа компаний «Газпром нефть»

Екатерина Александровна Булгакова — руководитель программ по геологическому сопровождению проектов, Группа компаний «Газпром нефть»

Рустам Наилевич Гайнаншин — кандидат геолого-минералогических наук, руководитель проекта по экспертизе продуктов, Группа компаний «Газпром нефть»

Сергей Фаизович Хафизов — доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой поисков и разведки нефти и газа, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

Anna V. Kulikova* — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Senior researcher, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University; Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 18, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russia. e-mail: ak_cool@mail.ru

Pavel D. Kotler — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Senior researcher, Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University

Rafael N. Muzaferov — Junior researcher, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University

Michail V. Snachev — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Product development manager, Gazprom нефт company group

Ekaterina A. Bulgakova — Geological support program manager, Gazprom нефт company group

Rustam N. Gainanshin — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Product expertise manager, Gazprom нефт company group

Sergey F. Khafizov — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Head of the Department of Oil and Gas Prospecting and Exploration, Russian State University of Oil and Gas

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author