

УДК 550.370

**Картирование Западно-Якутского барьерного рифа в зоне сочленения
Вилуйской синеклизы и Алданской антеклизы
с помощью электрофациального анализа**

А. А. Кравченко

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
ОП АО «Росгео» «ИГП», г. Иркутск, Россия
e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru*

Аннотация. Целью исследования служила апробация метода электрофациального анализа для картирования рифовых построек в условиях зоны сочленения Вилуйской синеклизы и Алданской антеклизы. В работе приводятся результаты изучения геоэлектрических характеристик разреза с привлечением метода электрофациального анализа. Установлена приуроченность погребенных биогермов к разломным зонам. Выделены электрофациальные зоны, соответствующие палеографическим представлениям о развитии района. Построена карта распространения электрофаций для кембрийского интервала разреза, с границами распространения рифогенных отложений в пределах района исследований. Приведен типовой геоэлектрический разрез, отображающий геоэлектрические свойства участка Западно-Якутского барьерного рифа.

Выделение фаций на основе электроразведочных данных способно дать оперативную информацию о границах исследуемой зоны. При недостаточном количестве данных бурения электрофациальный анализ способен ускорить процесс интерпретации электроразведочных данных.

Ключевые слова: Западно-Якутский барьерный риф; фации; электроразведка

**Mapping of the West Yakut barrier reef in the junction zone
of the Vilyui synecise and Aldan antecise using electro-facies analysis**

Anastasia A. Kravchenko

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
Separate subdivision "Irkutsk Geophysical Subdivision", "Rosgeologiya" JSC, Irkutsk, Russia
e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru*

Abstract. The aim of the study was to test the method of electro-facies analysis for mapping reef structures in the conditions of the junction of the Vilyui synecise and Aldan antecise. The article presents the results of a study of geoelectric characteristics using the method of electro-facies analysis. The confinement of buried bioherms to fault zones has been established. Facies zones corresponding to paleographic representations of the development of the region were identified. A map of the distribution of electrofacies for the Cambrian section interval was constructed, with boundaries of the distribution of reef deposits in the aisles of the study area. A typical geoelectric section showing the geoelectric properties of a section of the West Yakut barrier reef is given.

Separation of facies based on electrical exploration data is able to provide operational information on the boundaries of the studied area. With insufficient drilling data, electro-facies analysis can speed up the interpretation of electrical exploration data.

Key words: West Yakut barrier reef; facies; electrical exploration

Введение

Изучение погребенных рифовых построек давно интересует ученых. Интерес вызван в большей мере возможными нефтяными перспективами, связанными с неоднородным строением биогермов и другими условиями, созданными вторичными геологическими процессами, располагающими к накоплению углеводородов.

Западно-Якутский барьерный риф (рис. 1) формировался на протяжении нижнего и среднего кембрия на фоне трансгрессивно-регрессивных процессов, преобладающих в регионе в это время. Юг Виллюйской синеклизы включает в себя 3 фациальных области, приуроченных к морской и лагунной областям, с переходной между ними рифовой зоной [1]. Ее образование связывается с системой глубинных разломов фундамента, о чем свидетельствует линейное распространение органогенного барьера. Восточнее исследуемого региона образование органогенных банок связывается с уступом рифейского фундамента, что являлось благоприятным условием для развития органогенных построек [2]. Это дает основание предполагать схожую ситуацию в районе исследований.

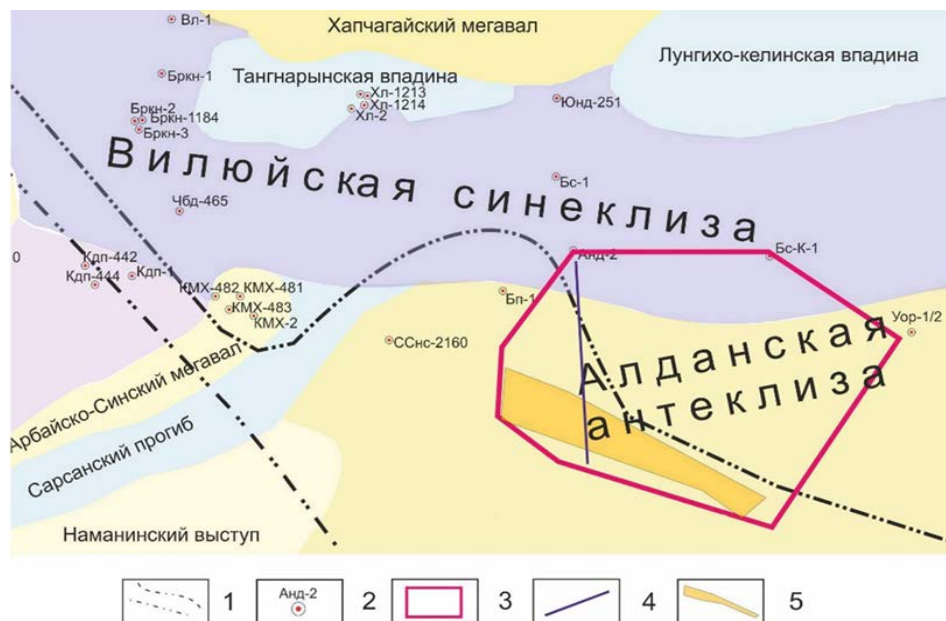


Рис. 1. Схема района исследований: 1 — ранее предполагаемая зона развития Западно-Якутского барьерного рифа; 2 — участок исследования; 3 — скважины глубокого бурения; 4 — рассматриваемый электроразведочный профиль; 5 — зона рифового барьера, картирующаяся по данным электроразведки

Юдомо-Оленекский бассейн, распространенный на северо-востоке Сибирской платформы, многими учеными трактуется как источник рассеянного органического вещества [3–5]. Залегающая в его разрезе куонамская (синская, иниканская и другие аналоги) свита глинисто-кремнисто-карбонатного состава насыщена органическим веществом, преимущественно доманикоидного типа концентрации углеводов (Снк = 0,5–5 %). На северном склоне Алданского щита происходит фациальное замещение иниканской и куонамской свит толщей одновозрастных известняков и доломитов, мощностью до 1 000 м, включающих рифовый комплекс [6]. Западная граница бассейна с рифовым комплексом является объектом для поиска неантиклинальных ловушек: тектонически экранированных, структурно-литологических, приразломных, а также рифогенных, приуроченных к эвстатическим колебаниям региона [7]. По мнению М. М. Грачевского, рифогенное и шельфовое карбонатное обрамление синхронных ему нефтепроизводящих доманикоидных отложений является высокоперспективным объектом для обнаружения залежей УВ [8].

Материалы и методы исследования

Выделение рифовых построек в осадочном чехле выполняется методами бурения, каротажа и сейсморазведки. Органогенные постройки, как отдельная фация, картируются в соответствии с изменением геоэлектрических свойств, зависящих от петрофизических и коллекторских свойств породы. Большинство проведенных исследований, затрагивающих вопрос картирования рифов методом электроразведки, выполнены модификациями магнито-теллурического зондирования [9, 10]. В данной работе исследования выполнены методом зондирования становления поля в ближней зоне (ЗСБ), разрешающая способность которого позволяет анализировать аномалии глубиной до 5 000 м.

Для картирования органогенных построек использовался сейсмofациальный анализ в пакете Stratimagic, интегрированный для электроразведочных данных. Электрофациальный анализ осуществляет автоматическую классификацию полевых материалов ЗСБ (кривых StauHtau) по заданным интервалам глубин, выбранным в соответствии с данными бурения и/или сейсморазведки [11].

Результатом проведенных операций, на основе технологии искусственных нейронных сетей, распознающей изменение сигнала, служат карты распределения классов (фаций)¹. Фациальный анализ лежит в основе метода секвенс-стратиграфии, который позволяет картировать распространение фациальных ассоциаций надежнее, чем литостратиграфическая корреляция и моделирование [12]. В районе исследований выделение секвенсов затруднено, в связи с малым количеством скважин глубокого бурения. Поэтому на данном этапе исследований фациальный анализ — оптимальный вариант для оперативного получения информации об условиях образования органогенных построек.

¹ Руководство по Stratimagic. Основной учебный курс. Paradigm Geophysical Ltd. Guide to Stratimagic. Basic training course. Paradigm Geophysical Ltd. May, 2002.

Результаты и их обсуждение

В результате интерпретации полевых данных ЗСБ построены геоэлектрические разрезы и карты по границам, соответствующим сейсмическим опорным горизонтам (рис. 2). Исследуемый интервал, включающий рифовые постройки, относится к кембрийскому периоду и характеризуется неоднородным распределением сопротивлений. В региональном плане указанный интервал относится к терригенно-карбонатной и карбонатной толщам. Верхний — средний кембрий сложен джуктинской и бордонской свитами, включающими в себя известняки, мергели, диабазы с прослоями глинистых известняков, конгломераты. Горизонты отмечаются широким диапазоном изменения значений сопротивления от 15 до 150 Ом · м. В северной части исследуемой территории в погруженных участках разреза преобладают пониженные сопротивления 15–30 Ом · м. Такой уровень сопротивлений связывается с ослабленной водонасыщенной толщей, развитием коллекторов. К югу отложения выклиниваются. Это место отображается косослоистым рисунком сейсмозаписи.

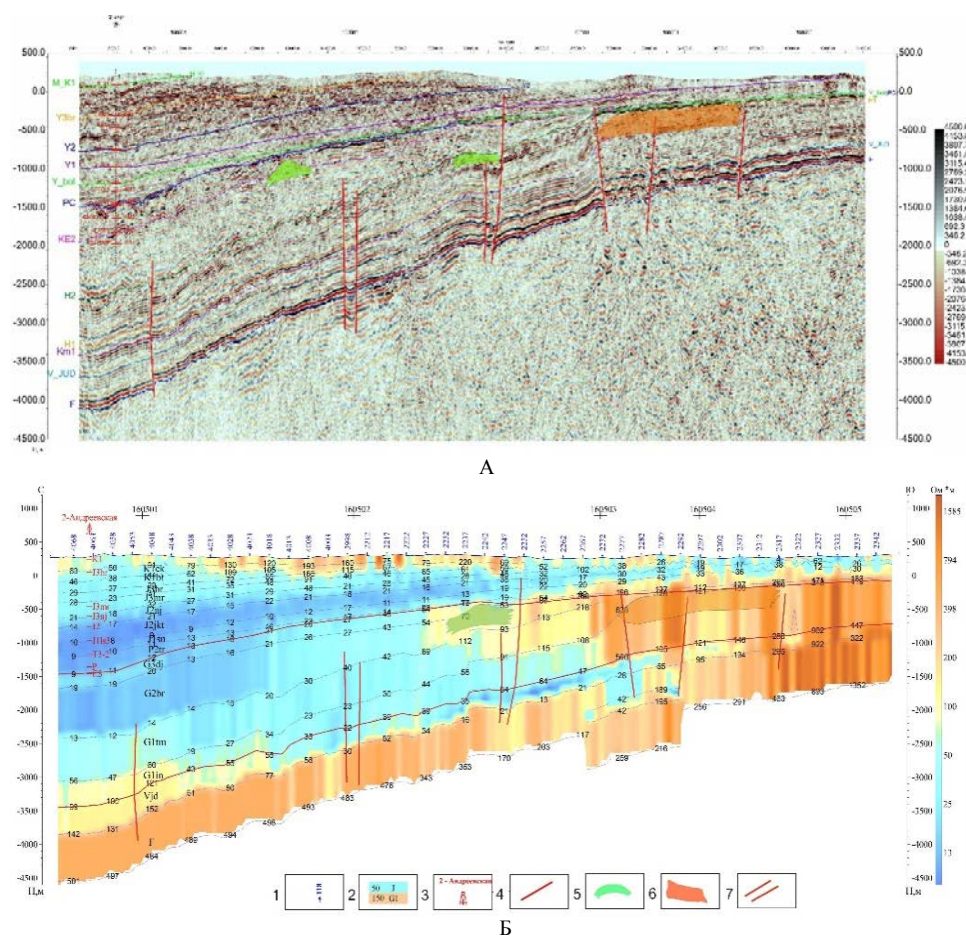


Рис. 2. Корреляция сейсмического и геоэлектрического разрезов.

А — сейсмический, Б — геоэлектрический: 1 — пункты ЗСБ; 2 — геоэлектрические горизонты; 3 — скважины глубокого бурения; 4 — тектонические нарушения, выявленные по комплексу геофизических методов; 5 — одиночные рифовые постройки; 6 — область Западно-Якутского барьерного рифа; 7 — исследуемый интервал

Нижний кембрий сложен тымпынской и иниканской свитами, представленными доломитами, мергелями, известняками, аргиллитами. Сопротивление изменяется с севера на юг зонально. Они обогащены органическим веществом, благодаря своему составу обладают аномально низкими акустическими характеристиками, по сравнению с вмещающими доломитами [13]. На геоэлектрическом разрезе северные постройки, расположенные в среднем кембрии, характеризуются сопротивлением от 50 до 150 Ом · м, что может свидетельствовать о высокой пористости и разрушении процессами эрозионного характера. Пониженные сопротивления относительно основной линии Западно-Якутского барьерного рифа позволяют рассуждать о развитии вторичных процессов, повлиявших на сохранность рифов. Возможное наличие порового пространства ставит вопрос о перспективности переходной зоны в плане коллекторских свойств. Стоит отметить, что сам риф составляет всего несколько процентов от объема цепочки рифовых образований, в то время как основной объем комплекса состоит из обломков предрифовой и зарифовой частей [14].

Для проведения электрофациального анализа выбрано начальное значение классов в размере 11 для обнаружения соответствий или несоответствий картине, прослеженной по геоэлектрическим разрезам и картам сопротивлений (рис. 3). В дальнейшем количество фаций объединено до четырех, две из которых (b, c) соответствуют одной зоне, разделенной в рамках исследования, ввиду ее неоднозначности.

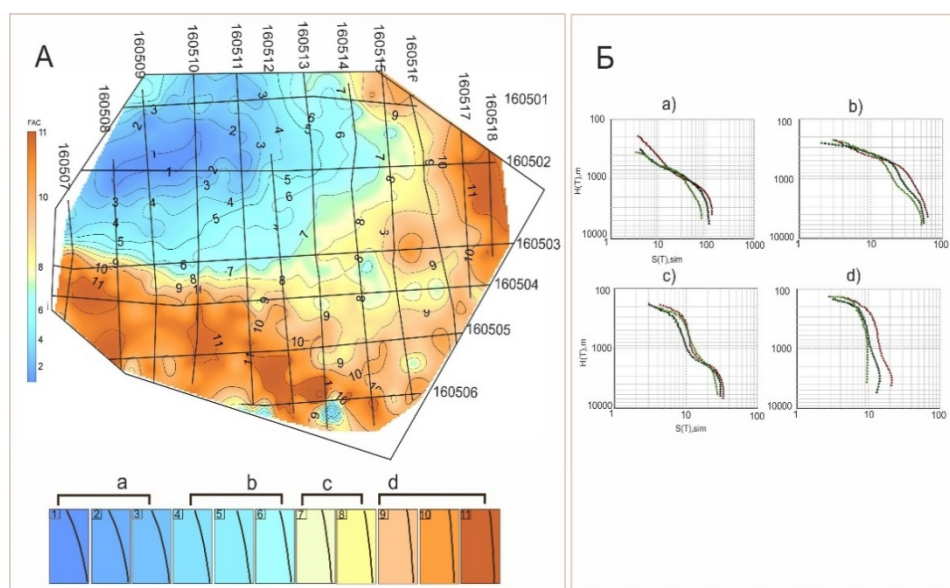


Рис. 3. Результаты электрофациального анализа в программе Stratimagic:

А — карта распределения электрофаций;

Б — типы кривых $S(\tau)/N(\tau)$, соответствующие электрофациям

Выполненный электрофациальный анализ для интервала от нижнего кембрия до венда позволил ускорить процесс картирования погребенных

рифовых построек, выделив классы, соответствующие фациям с разным значением проводимости и глубины. Фация «а» на севере участка относится к глубоководной зоне, находившейся в эпицентре трансгрессивно-регрессивных процессов.

Породы этой фации подразделяются на хемогенно-биогенную и терригенную группы [15].

Существующие данные позволяют предполагать их битуминозную насыщенность [16]. Фации «b, c» согласно теоретическим основам секвенс-стратиграфии могут быть отнесены к склоновым областям алеврито-песчаного состава. Фация «с» также может включать молодые рифы, последовательно наращивающие друг друга [17]. Фация «d», на юге участка, картирует границы распространения рифовых отложений в пределах Алданской антеклизы и может трактоваться как область перехода к континентальной фациальной зоне [18]. На сейсмических разрезах эти зоны характеризуются прерывистым сигналом или его отсутствием, на геоэлектрических — сменой низких сопротивлений ($5\text{--}30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) на относительно высокие ($100\text{--}500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) в пределах небольшой протяженности и большой мощности.

Для проверки результатов границы электрофациальных зон исследуемого интервала соотнесены с кривыми ЗСБ StauHtau (рис. 4). Границы фаций отвечают смене типа кривой.

Стоит отметить, что приуроченность рифовой зоны к тектоническим нарушениям прослеживается и на кривых ЗСБ. Для качественной интерпретации результатов электрофациального анализа проводилась сверка с геоэлектрическими разрезами и типами кривых.

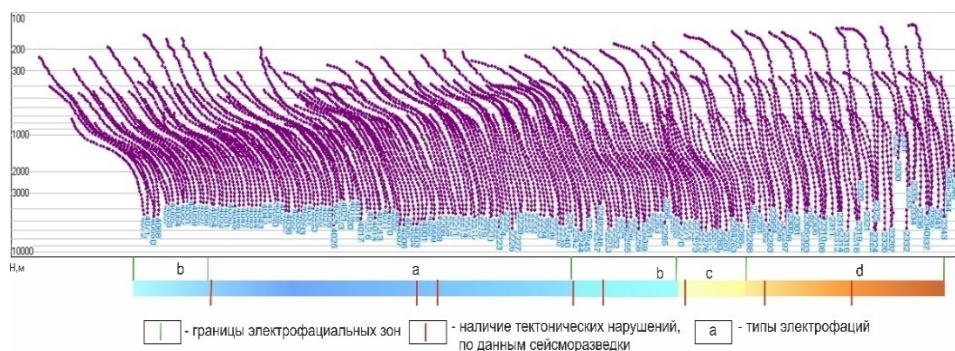


Рис. 4. Корреляция кривых StauHtau исследуемого профиля с результатами электрофациального анализа для кембрийских отложений

Выводы

В результате электрофациального анализа выделены фациальные зоны, отвечающие основным современным представлениям об обстановке осадконакопления в бортовых зонах синеклиз.

Разные интервалы сопротивлений в пределах отдельных стратиграфических границ, характеризующиеся как проводящие или высокоомные, как и электрофациальный анализ, выделяют латеральную неоднородность, связанную с изменением физических свойств горных пород, а иногда и состава.

В рассматриваемом разрезе изменения сопротивлений кембрийского интервала свидетельствуют о смене фаций, одна из которых, сопротивлением 500–1 000 Ом · м и отдельными проницаемыми зонами 100–150 Ом · м, относится к зоне развития Западно-Якутского барьерного рифа.

Следующим этапом работ по изучению характеристик Западно-Якутского барьерного рифа в районе сочленения Вилуйской синеклизы и Алданской антеклизы служит секвенс-стратиграфический анализ области развития, который до появления параметрических скважин на южном участке работ не представляется возможным. Результатом применения этого метода может стать выделение циклов осадконакопления и рифообразования, помогающих при интерпретации геофизических данных и прогнозе перспективных нефтяных залежей.

Библиографический список

1. Писарчик, Я. К. Палеогеографическая характеристика Сибирской платформы в кембрийское время / Я. К. Писарчик, М. А. Минаева, Г. А. Русецкая // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов. Материалы Всесоюзного совещания по оценке нефтегазоносности территории Якутии. Москва : Недра, 1968. – С. 81–90. – Текст : непосредственный.
2. Старосельцев, В. С. Обстановки накопления углеродистых пород кембрия Сибирской платформы / В. С. Старосельцев, Б. Б. Шишкин. – DOI 10.15372/GiG20140506. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 5–6. – С. 787–796.
3. Арчegov, В. Б. Доманикоидные формации Сибирской платформы — Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация / В. Б. Арчegov. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С. 53–59.
4. Баженова, Т. К. Оценка ресурсов УВ битуминозных толщ нефтегазоносных бассейнов России / Т. К. Баженова. – Текст : непосредственный // Геология нефти и газа. – 2017. – № 5. – С. 37–50.
5. О возможном открытии на юге Вилуйской синеклизы нового нефтеносного района (Сибирская платформа) / В. С. Ситников, И. А. Кушмар, О. М. Прищепа, А. В. Погодаев. – Текст : непосредственный // Геология нефти и газа. – 2013. – №. 4. – С. 2–12.
6. Савицкий, В. Е. Роль и масштабы рифообразования в кембрийской истории Сибирской платформы / В. Е. Савицкий, В. А. Асташкин. – Текст : непосредственный // Геология рифовых систем кембрия Западной Якутии : сборник научных трудов. Выпуск 270. – Новосибирск, 1979. – С. 5–18.
7. Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилуйской синеклизы / В. С. Ситников, Н. Н. Алексеев, К. А. Павлова [и др.]. – DOI 10.17353/2070-5379/9_2017. – Текст : непосредственный // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – С. [1–20].
8. Корреляция разнофациальных толщ при поисках нефти и газа / М. М. Грачевский, Ю. М. Берлин, И. Т. Дубовской, Г. Ф. Ульмишек ; под ред. В. А. Долицкого. – Москва : Недра, 1969. – 295 с. – Текст : непосредственный.
9. Unsworth, M. New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods / M. Unsworth. – Текст : непосредственный // CSEG Recorder. – 2005. – Т. 30, № 4. – С. 34–38.
10. Мамаева, А. В. Разработка геоэлектрической модели рифовых комплексов в пределах восточного борта Курейской синеклизы по данным магнитотеллурических зондирований / А. В. Мамаева, Е. Н. Махнач. – Текст : непосредственный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 73–77.
11. Кочукова, В. А. Методика интерпретации электромагнитных зондирований в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (электрофациальный анализ) / В. А. Кочукова, А. М. Пашевин. – DOI 10.21285/2541-9455-2019-42-2-165-175. – Текст : непосредственный // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2019. – Т. 42, № 2. – С. 165–175.

12. A sequence stratigraphic based geological model for constraining hydrogeological modeling in the urbanized area of the Quaternary Besòs delta (NW Mediterranean coast, Spain) / V. Velasco, P. Cabello, E. Vázquez-suñé [et al.]. – DOI 10.1344/105.000001757. – Текст : непосредственный // *Geologica Acta : an international earth science journal*. – 2012. – Vol. 10, Issue 4. – P. 373–393.
13. Губин, И. А. Сейсмогеологическая модель и структурная характеристика юго-восточных районов Сибирской платформы по результатам комплексной интерпретации региональных и поисковых сейсморазведочных работ / И. А. Губин, Н. В. Поспеева. – DOI 10.18303/1813-4254-2017-2-93-107. – Текст : непосредственный // *Технологии сейсморазведки*. – 2017. – № 2. – С. 93–107.
14. Longman, M. W. A process approach to recognizing facies of reef complexes / M. W. Longman. – Текст : электронный // *Special Publications of SEPM*. – 1981. – P. 9–40. – URL: http://archives.datapages.com/data/sepm_sp/SP30/A_Process_Approach.htm.
15. Бахтуров, С. Ф. Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация : монография / С. Ф. Бахтуров, В. М. Евтушенко, В. С. Переладов ; под ред. М. А. Жаркова, А. Э. Конторовича. – Новосибирск : Наука, 1988. – 162 с. – (Труды ИГиГ СО АН СССР; Вып. 671). – Текст : непосредственный.
16. Сухов С. С. Депрессионный комплекс нижнего и среднего кембрия востока Сибирской платформы / С. С. Сухов, В. С. Переладов. – Текст : непосредственный // *Геология рифовых систем кембрия Западной Якутии. Сборник научных трудов СНИИГГиМС*. Выпуск 270. – Новосибирск. – 1979. – С. 50–60.
17. Фомин, А. М. Типизация разрезов вендско-кембрийских отложений западной части Северо-Алданской НГО / А. М. Фомин, С. А. Моисеев. – Текст : непосредственный // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 46–51.
18. Маргулис, Л. С. Секвенная стратиграфия в изучении строения осадочных чехлов / Л. С. Маргулис. – Текст : непосредственный // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2008. – Т. 3, № 3. – С. 1–26.

References

1. Pisarchik, Ya. K., Minaeva, M. A., & Ruseckaya, G. A. (1968). Paleogeograficheskaya kharakteristika Sibirskoy platformy v kembriyskoe vremya. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' vostochnoy chasti Sibirskoy platformy i prilgayushchikh rayonov. Materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya po ocnke neftegazonosnosti territorii Yakutii*. Moscow, Nedra Publ., pp. 81-90. (In Russian).
2. Staroseltsev, V. S., & Shishkin, B. B. (2014). Environmental conditions of accumulation of Cambrian carbonaceous rocks in the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5-6), pp. 619-628. (In English). DOI: 10.1016/j.rgg.2014.05.007
3. Archegov, V. B. (2011). Domanikoid formations of Siberian platform - Kuonamskaya bituminous carbonate-shale formation. *Journal of Mining Institute*, (194), pp. 53-59. (In Russian).
4. Bazhenova, T. K. (2017). HC resources estimation of bituminous formations of Russian oil and gas bearing basins. *Oil and Gas Geology*, (5), pp. 37-50. (In Russian).
5. Sitnikov, V. S., Kushmar, I. A., Prischepa, O. M., & Pogodaev, A. V. (2013). On the possible discovery of new oil-bearing region in the south of Vilyuy syncline (Siberian platform). *Oil and Gas Geology*, (4), pp. 1-11. (In Russian).
6. Savickiy, V. E., & Astashkin, V. A. (1979). Rol' i masshtaby rifoobrazovaniya v kembriyskoy istorii Sibirskoy platformy. *Geologiya rifovykh sistem kembriya Zapadnoy Yakutii: sbornik nauchnykh trudov*. Vypusk 270. Novosibirsk, pp. 5-18. (In Russian).
7. Sitnikov, V. S., Alekseev, N. N., Pavlova, K. A., Pogodaev, A. V., & Sleptsova, M. I. (2017). Newest forecast and development updating of Vilyuiskaya syncline petroleum objects. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 12(1), pp. 1-20. (In Russian). DOI: 10.17353/2070-5379/9_2017
8. Grachevskiy, M. M., Berlin, Yu. M., Dubovskoy, I. T., Ul'mishek, G. F. (1969). *Korrelyatsiya raznofacial'nykh tolshch pri poiskakh nefiti i gaza*. Moscow, Nedra Publ., 295 p. (In Russian).
9. Unsworth, M. (2005). New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods. *CSEG Recorder*, 30(4), pp. 34-38. (In Russian).

10. Mamaeva, A. V., & Makhnach, E. N. (2016). Processing and interpretation technique of magnetotelluric sounding during the study of reefogenic buildup within the eastern limit of Kurei sineclise. *Interexpo Geo Siberia*, 2(2), pp. 73-77. (In Russian).
11. Kochukova, V. A., & Pashevin, A. M. (2019). Procedure of electromagnetic sounding interpretation for geoelectric conditions of Siberian craton south (electric facies analysis). *Proceedings of the Siberian department of the section of earth sciences of the Russian academy of natural sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*, 42(2), pp. 165-175. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-165-175
12. Velasco, V., Cabello, P., Vázquez-suñé, E., López-blanco, M., Ramos, E., & Tubau, I. (2012). A sequence stratigraphic based geological model for constraining hydrogeological modeling in the urbanized area of the Quaternary Besòs delta (NW Mediterranean coast, Spain). *Geologica Acta: an international earth science journal*, 10(4), pp. 373-393. (In English). DOI: 10.1344/105.000001757
13. Gubin, I. A., & Pospeeva, N. V. (2017). Seismogeological model and structural characteristics of south-east regions of the Siberian platform as a results of integrated interpretation of regional and exploration seismic works. *Seismic exploration technologies*, (2), pp. 93-107. (In Russian). DOI: 10.18303/1813-4254-2017-2-93-107
14. Longman, M. W. (1981). A process approach to recognizing facies of reef complexes. *Special Publications of SEPM*, pp. 9-40. (In English). Available at: http://archives.datapages.com/data/sepm_sp/SP30/A_Process_Approach.htm
15. Bakhturov, S. F., Evtushenko, V. M., & Pereladov, V. S. (1988). *Kuonamskaya bituminoznaya karbonatno-slancevaya formaciya*. Novosibirsk, Nauka Publ., 162 p. (In Russian).
16. Sukhov, S. S., Pereladov, V. S. (1979). Depressionnyy kompleks nizhnego i srednego kembriya vostochno Sibirskoy platform. *Geologiya rifovykh sistem kembriya Zapadnoy Yakutii. Cbornik nauchnykh trudov SNIIGiMS. Vypusk 270*. Novosibirsk, pp. 50-60. (In Russian).
17. Fomin, A. M., & Moiseev, S. A. (2017). Vendian-Cambrian sedimentary section typification of western part of North-Aldan petroleum-bearing region. *Interexpo Geo Siberia*, 2(1), pp. 46-51. (In Russian).
18. Margulis, L. S. (2008). Sequence stratigraphy in studying the structure of sedimentary covers. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 3(3), pp. 1-26. (In Russian).

Сведения об авторе

Кравченко Анастасия Анатольевна, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, геофизик 2 категории, ОП АО «Росгео» «ИГП», г. Иркутск, e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru

Information about the author

Anastasia A. Kravchenko, Postgraduate, Irkutsk National Research Technical University, Geophysicist of the 2nd category, Separate subdivision "Irkutsk Geophysical Subdivision", "Rosgeologiya" JSC, Irkutsk, e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru