



RECONSTRUCTION OF PROVENANCE OF JURASSIC DEPOSITS IN THE PRE-YENISEY OIL AND GAS PROMISING AREA OF THE WEST SIBERIAN PETROLEUM PROVINCE

F.A. Sharipov ¹, A.V. Soloviev ^{1,2}, P.D. Kotler ^{3,4}, A.V. Kulikova ^{3,4}, G.D. Ukhlova ¹,
A.M. Kirsanov ¹, K.R. Minnebaev ³, Ya.Ya. Saetgaleeva ³

¹ All-Russian Scientific Research Geological Oil Institute, 36 Rte Entuziastov, Moscow 105118, Russia

² Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

³ Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St, Kazan 420008, Russia

⁴ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results for Jurassic terrigenous rocks of the Urman, Peshkov, Tyumen and Maksimoyar formations, encountered in Severo-Ketskaya 1 parametric well, that have been studied thoroughly to reconstruct the paleogeographic evolution of the southeastern part of the West Siberian petroleum province. Petrographic analysis reveals two sandstone associations: quartz graywackes and arkosic sandstones of the Early – Middle Jurassic age and mesomictic sandstones of the Late Jurassic age. Plotting the samples on the Q–F–L (quartz – feldspar – lithic fragments) ternary diagram shows the upsection decrease in proportion of acidic volcanic clasts with increasing detritus removal from the eroded quartz-rich sediment. Detrital modes on the QFL Dickinson diagram indicate an evolution of terrigenous source areas from volcanic arc settings in the Early – Middle Jurassic to recycled orogens in the Late Jurassic, driven by the Late Jurassic – Early Cretaceous orogenic uplift within the Kolyvan-Tomsk and Ob-Zaisan fold belts. U–Pb dating of detrital zircons documents a provenance shift from predominantly local Early Paleozoic sources in the Early Jurassic to primarily distant Upper Paleozoic and Jurassic source areas in the Middle – Late Jurassic. This evolution reflects the Mesozoic intracontinental orogeny along the southeastern margin of the West Siberian basin and the southern margin of the Siberian Platform, associated with the closure of the Paleo-Tethys and Mongol-Okhotsk oceans. The upsection increase in Mesozoic and Paleoproterozoic zircon populations from Early to Late Jurassic is interpreted as a response to intensification of tectonic activity along the southern margin of the Siberian Platform, whereas the terrigenous material was transported in the Pra-Angara river system. The integrated dataset constrains the likely sediment source areas and improves paleogeographic reconstructions.

KEYWORDS: Jurassic clastic deposits; southeastern part of the West Siberian petroleum province; Pre-Yenisey promising oil and gas area; reconstruction of sediment provenance; U–Pb zircon dating; Mesozoic intracontinental orogeny; southeastern margin of the West Siberian basin; southern margin of the Siberian Platform; Pra-Angara river system; Severo-Ketskaya 1 parametric well

FUNDING: The study was carried out as part of the project of the VNIGNI ("Parametric drilling in the Severo-Ketskaya area of the Pre-Yenisey province aimed at identifying new large oil and gas accumulation zones. Stage 2. Drilling to a depth of 5200 m", 2022–2024), and funded both by the Federal Agency for Mineral Resources and by the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program of the Kazan Federal University.



EDN: KGSDRJ

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Farit A. Sharipov, sharipov@vnigni.ru

Received: April 3, 2026

Revised: June 30, 2026

Accepted: July 13, 2026

FOR CITATION: Sharipov F.A., Soloviev A.V., Kotler P.D., Kulikova A.V., Ukhlova G.D., Kirsanov A.M., Minnebaev K.R., Saetgaleeva Ya.Ya., 2026. Reconstruction of Provenance of Jurassic Deposits in the Pre-Yenisey Oil and Gas Promising Area of the West Siberian Petroleum Province. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (4), 0906. doi:10.5800/GT-2026-17-4-0906

Supplementary files: [Sharipov_et_al_2026_Suppl-1.xlsx](#)

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКОВ СНОСА ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРЕДЪЕНИСЕЙСКОЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Ф.А. Шарипов¹, А.В. Соловьев^{1,2}, П.Д. Котлер^{3,4}, А.В. Куликова^{3,4}, Г.Д. Ухлова¹,
А.М. Кирсанов¹, К.Р. Миннебаев³, Я.Я. Саетгалеева³

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, 105118, Москва, ш. Энтузиастов, 36, Россия

² Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

⁴ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты комплексного изучения терригенных пород урманской, пешковской, тюменской и максимоярской свит юрского возраста скважины Северо-Кетская 1 с целью палеогеографической реконструкции юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Петрографический анализ выявил две ассоциации песчаников: кварцевые граувакки и аркозовые песчаники раннесреднеюрского возраста и мезомиктовые породы позднеюрского возраста. Также по классификационной диаграмме «кварц – полевые шпаты – обломки пород» по мере омоложения рассматриваемых пород фиксируется уменьшение доли обломочного материала, образованного за счет разрушения эффузивных пород кислого состава, в сторону сноса материала, формирование которого связано с разрушением осадочных толщ кварцевого состава. Анализ минерального состава песчаников на диаграмме Дикинсона показывает эволюцию областей сноса терригенного материала с вулканических дуг в раннесреднеюрское время к рециклированным орогенам в позднеюрское время, обусловленную позднеюрско-раннемеловым орогенезом Колывань-Томской и Обь-Зайсанской складчатых систем. U-Pb датирование детритовых цирконов демонстрирует смену питающих провинций: от доминирующей роли местных раннепалеозойских источников в раннеюрское время к преобладанию удаленных верхнепалеозойских и юрских источников сноса в средне- и позднеюрское время. Эта эволюция связана с мезозойским внутриконтинентальным орогенезом юго-восточного обрамления Западно-Сибирского бассейна и южного обрамления Сибирской платформы, вызванным закрытием Палеотетиса и Монголо-Охотского океана. Установлено, что увеличение доли мезозойских и палеопротерозойских цирконов от ранней юры к поздней юре связано с усилением тектонических процессов в пределах южного обрамления Сибирской платформы, а транспортировка терригенного материала осуществлялась Пра-Ангарой. Комплексная интерпретация данных позволила реконструировать возможные источники сноса терригенного материала и уточнить палеогеографические схемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: терригенные отложения юры; юго-восточная часть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции; Предъенисейская ПНГО; реконструкции источников сноса; U-Pb датирование цирконов; мезозойский внутриконтинентальный орогенез; юго-восточное обрамление Западно-Сибирского бассейна; южное обрамление Сибирской платформы; Пра-Ангара; параметрическая скважина Северо-Кетская 1

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках работ по объекту ВНИГНИ («Параметрическое бурение на Северо-Кетской площади Предъенисейской провинции с целью выявления новых крупных зон нефтегазонакопления. Второй этап. Бурение до глубины 5200 м», 2022–2024 гг.), финансировавшихся Федеральным агентством по недропользованию и за счет средств Программы стратегического академического лидерства КФУ (ПРИОРИТЕТ-2030).

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач при восстановлении палеогеографических и геодинамических условий седиментации является определение источников сноса терригенного материала. Данные исследования играют ключевую роль в анализе нефтегазоносных бассейнов, так как именно сведения об источниках обломочного материала напрямую связаны с оценкой фильтрационно-емкостных свойств пород и прогнозированием углеводородного потенциала территории, что

позволяет более точно изучить процесс формирования залежей нефти и газа [Smyth et al., 2014]. Процесс реконструкции источников сноса осадочного материала предполагает применение литолого-петрографических методов (изучение состава терригенных пород), литолого-геохимических методов (исследование индикаторных отношений различных редких и рассеянных элементов), анализ минералов тяжелой фракции и изотопное датирование детритовых минералов [Maslov et al., 2019]. Самый широко используемый метод

датирования детритовых минералов – определение U-Pb возраста обломочных цирконов методом LA-ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерной абляцией). Главным преимуществом данного метода является наличие цирконов во многих осадочных породах как минералов, устойчивых к разрушению и выветриванию, и высокая теоретическая проработанность и доступность этого метода [Fedo et al., 2003; Soloviev, 2008]. Использование этого метода позволяет с высокой точностью установить возраст пород в питающих провинциях осадочных бассейнов, а также оценить максимальный возраст осадконакопления (MDA) для свит, возраст которых невозможно установить биостратиграфическими исследованиями.

Объектом исследования в данной работе являются юрские отложения, вскрытые при бурении параметрической скважины Северо-Кетская 1, расположенной в пределах Предъенисейской перспективной нефтегазоносной области (ПНГО) Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП) (рис. 1). Основные перспективы нефтегазоносности на территории Предъенисейской ПНГО связаны с отложениями доюрского комплекса, а именно с венд-кембрийским терригенно-карбонатным комплексом, к которому приурочен ряд месторождений в Байкитской нефтегазоносной области (НГО) Лено-Тунгусской НГП [Filippov, 2025]. Однако нельзя исключать возможность открытия месторождений в слабоизученных мезозойских отложениях плитного комплекса [Vakulenko et al., 2010]. Несмотря



Рис. 1. Местоположение скв. Северо-Кетская 1 на карте нефтегазогеологического районирования в пределах Западно-Сибирской НГП [Melnikov, 2022; Varlamov et al., 2018].

Fig. 1. Location of the Severo-Ketskaya 1 well on the map of oil and gas geological zoning within the West Siberian petroleum province [Melnikov, 2022; Varlamov et al., 2018].

на отсутствие выраженных антиклинальных форм и регионально распространенных глинистых покровов достаточной мощности в пределах Предъенисейской ПНГО, возможно обнаружение ряда литологических ловушек, связанных с песчаными телами юрского возраста континентального генезиса. Именно с отложениями нижней и средней юры, формировавшимися в пролювиально-аллювиальных и аллювиальных обстановках, связано открытие ряда месторождений в Красноленинской НГО и Каймысовской НГО Западно-Сибирского НГП, в том числе уникального по величине начальных извлекаемых запасов Красноленинского месторождения [Kontorovich et al., 1995; Shimansky et al., 2014].

Целью данной работы является реконструкция источников сноса обломочного материала, поступавше-

го в юго-восточную часть Западно-Сибирского бассейна в юрское время. Для этого в исследовании проанализированы данные по минеральному составу пород урманской (J_{1ur}), пешковской (J_{1-2psh}), тюменской (J_{2tm}) и максимоярской свит (J_{3mks}) и проведено U-Pb датирование обломочных цирконов из песчаников рассматриваемых свит.

2. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СКВ. СЕВЕРО-КЕТСКАЯ 1

Параметрическая скважина № 1 Северо-Кетская расположена в пределах Предъенисейской мегамоноклизы, вблизи зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. На карте тектонического районирования юрского структурного этажа Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции скважина

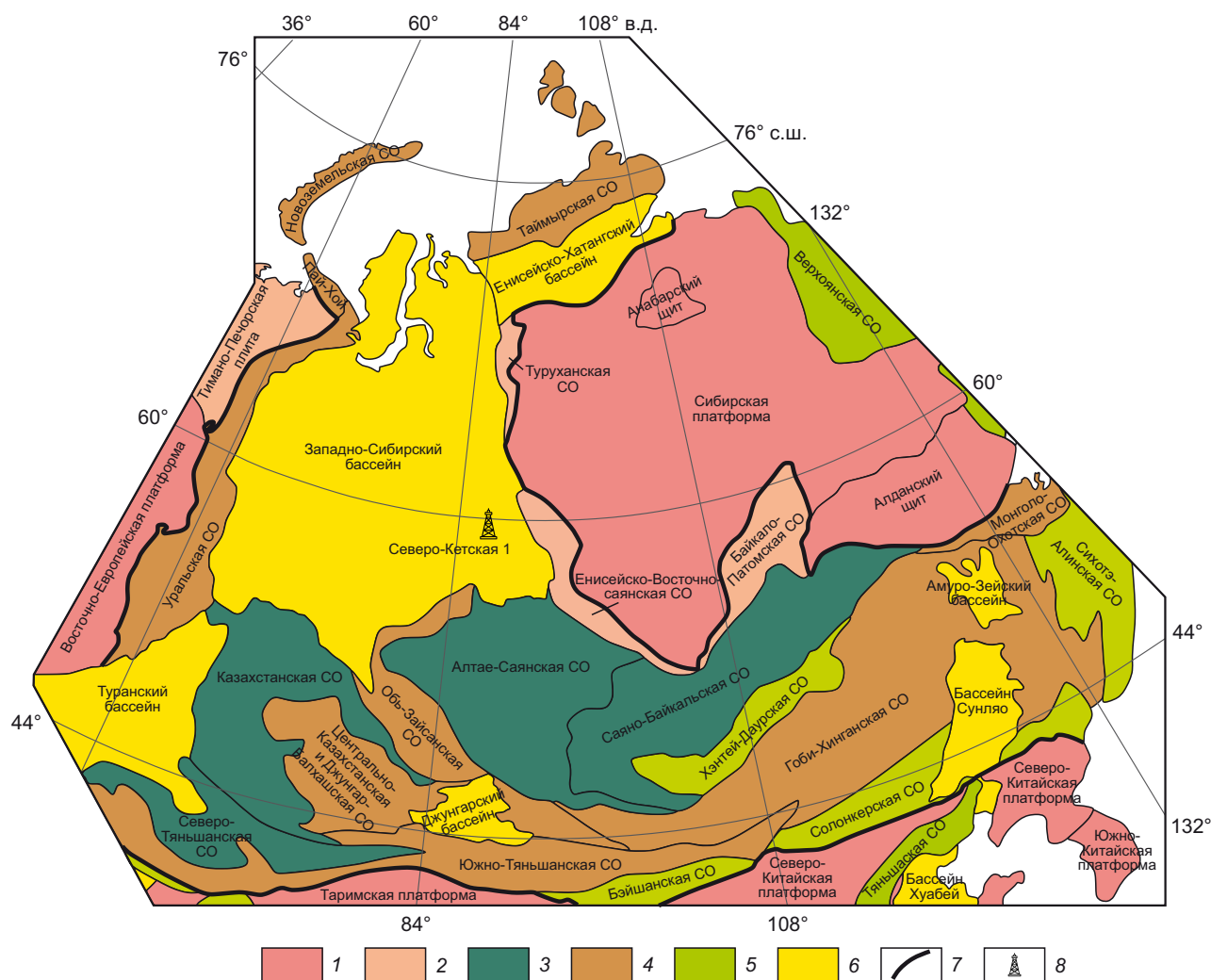


Рис. 2. Фрагмент тектонической карты Северной Азии [Petrov et al., 2021].

1 – древние платформы; 2 – неопротерозойские складчатые системы и плиты; 3 – раннепалеозойские складчатые системы; 4 – позднепалеозойские складчатые системы; 5 – мезозойские складчатые системы; 6 – мезозойско-кайнозойские внутриконтинентальные бассейны; 7 – границы Центрально-Азиатского орогенного пояса; 8 – положение скважины Северо-Кетская 1.

Fig. 2. A fragment of the tectonic map of Northern Asia [Petrov et al., 2021].

1 – ancient platforms; 2 – Neoproterozoic folded systems and plates; 3 – Early Paleozoic folded systems; 4 – Late Paleozoic folded systems; 5 – Mesozoic folded systems; 6 – Mesozoic-Cenozoic intracontinental basins; 7 – boundaries of the Central Asian orogenic belt; 8 – location of the Severo-Ketskaya 1 well.

расположена в южной части Предъенисейской мегамоноклизы, в пределах отрицательной структуры I порядка – Кетского мегавреза. К западу от мегамоноклизы выделяется Владимирская мезомамоноклиналь, на юге она граничит с Казачинским и Верхнекетским мегавыступами, а с востока ограничена древними структурами Енисейского кряжа (рис. 2).

На участке бурения выделяется два структурно-тектонических этажа. Нижний этаж представлен верхнепротерозойско-палеозойскими толщами, являющимися продолжением Сибирской платформы под мезокайнозойским чехлом, верхний – осадочными породами мезозойско-кайнозойского возраста.

Юрские отложения распространены на большей части территории Предъенисейской зоны, залегают со стратиграфическим несогласием на дезинтегрированных палеозойских образованиях. В скв. Северо-Кетской 1 юрские отложения выделены в интервале 1883.0–2912.0 м и представлены урманской, тогурской, пешковской, тюменской, тяжинской и максимоярской свитами (рис. 3).

Урманская свита выделена в интервале 2737–2912 м и охарактеризована керном в верхней части (интервал 2737–2780 м) и в нижней части (интервал 2845–2868 м). Породы данной свиты представлены песчаниками с преобладанием грубых разностей, крупно- и среднезернистых, прослоями гравелитистых, конгломератовидных, с редкими прослоями алевролитов мощностью 1–2 м. В свите встречены спорово-пыльцевые комплексы позднего плинсбаха [Narkisova, 2018].

Тогурская свита выделена в интервале 2726–2737 м и полностью охарактеризована керном, который представлен алевролитами, участками глинистыми (до аргиллитов), темно-серыми, местами со слабым зеленоватым оттенком, с неровным, иногда оскольчатым изломом, скорлуповатой отдельностью. В свите встречены спорово-пыльцевые комплексы позднего плинсбаха – раннего тоара [Narkisova, 2018].

Пешковская свита выделена в интервале 2500–2726 м и охарактеризована керном в интервале 2586–2726 м. Нижняя часть свиты представлена преимущественно песчаниками среднезернистыми и мелкозернистыми с редкими маломощными прослоями алевролитов. Верхняя часть свиты представлена частым, преимущественно градиационным переслаиванием алевролитов мелко- и крупнозернистых, углей, в меньшей степени – песчаников мелкозернистых, мелко-среднезернистых и аргиллитов. Палеонтологически свита не охарактеризована.

Тюменская свита выделена в интервале 2090–2500 м (2090–2260 – верхняя подсвита, 2262–2336 – средняя подсвита, 2336–2500 м – нижняя подсвита). Нижнетюменская подсвита охарактеризована керном в интервале 2390–2431 м, сложена главным образом алевролитами мелко- и крупнозернистыми, переслаивающимися с песчаниками мелкозернистыми, аргиллитами, углистыми аргиллитами и углями. Среднетюменская подсвита охарактеризована керном в интервале 2260–2320 м,

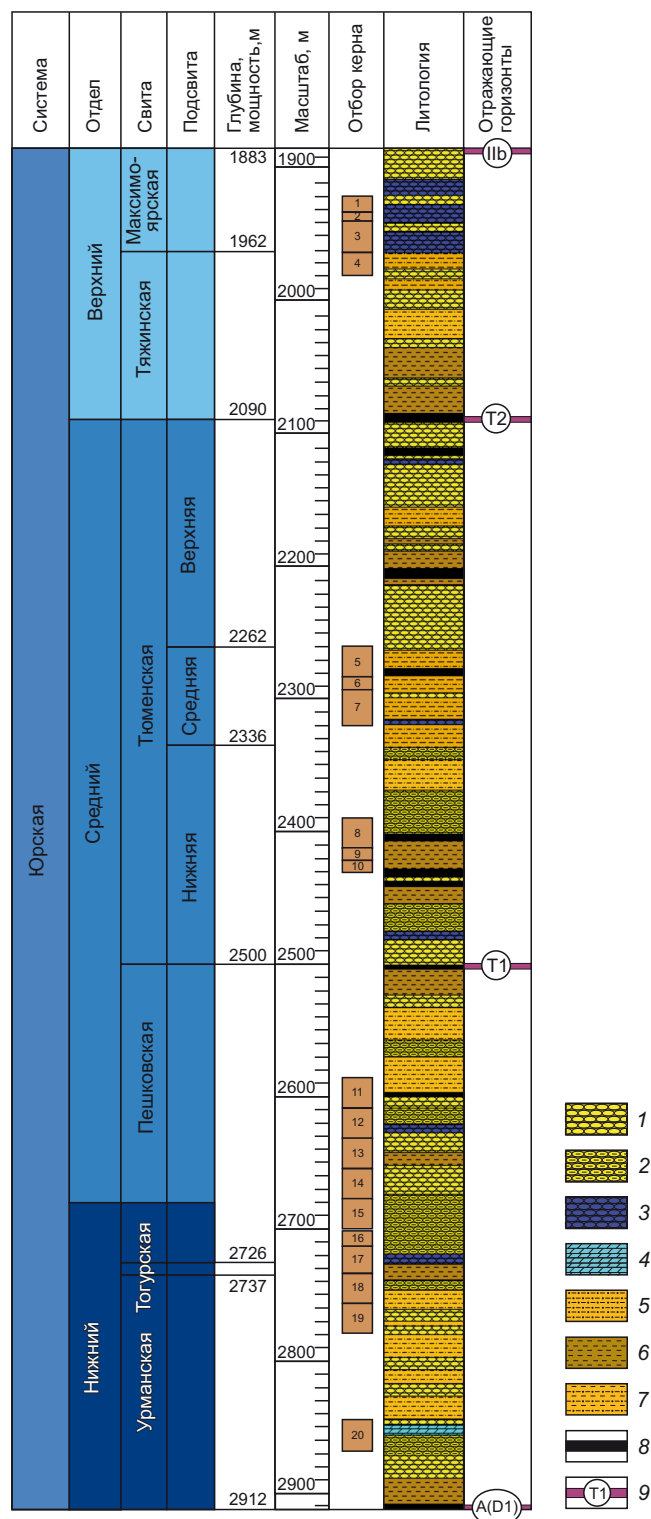


Рис. 3. Фрагмент юрского разреза скв. Северо-Кетская 1 с нанесенными интервалами отбора керна. 1 – песчаники; 2 – песчаники глинистые; 3 – песчаники карбонатные; 4 – мергели; 5 – алевролиты; 6 – глины; 7 – переслаивание алевролитов с глинами; 8 – углистые породы; 9 – опорные отражающие горизонты.

Fig. 3. A fragment of the Jurassic section of the Severo-Ketskaya 1 well with core sampling intervals marked thereon. 1 – sandstones; 2 – clayey sandstones; 3 – carbonate sandstones; 4 – marls; 5 – siltstones; 6 – clays; 7 – interbedding of siltstones and clays; 8 – carbonaceous rocks; 9 – reference reflecting horizons.

представлена преимущественно алевролитами мелко- и крупнозернистыми, с прослоями аргиллитов, песчаников (от мелко- до среднезернистых) и углей в виде частого (преимущественно тонкого) горизонтального, пологоволнистого, спутанно-волокнутого переслаивания с перекрестной слоистостью, следами восходящей ряби. Верхняя подсвита керном не охарактеризована. Палеонтологически тюменская свита не охарактеризована.

Тяжинская свита выделена в интервале 1962–2090 м и охарактеризована керном в верхней части, в интервале 1962–1980 м. Керн представлен переслаиванием пестроцветных часто известковистых аргиллитов, алевролитов и мелкозернистых песчаников алевроитовых при доминировании непроницаемых пород, с вертикальными трещинами усыхания и слоями биогермов. В свите обнаружены спорово-пыльцевые комплексы, свидетельствующие о среднекембрийско-оксфордском возрасте [Narkisova, 2018].

Максимоярская свита выделена в интервале 1882–1962 и охарактеризована керном в интервале 1920–1962 м. Породы данной свиты представлены в основном известковистыми песчаниками, светло-серыми (вверху белесоватыми) мелкозернистыми массивными, реже волнисто-, горизонтально- и спутанно-волокнуто-слоистыми с прослоями темно-серых аргиллитов и смешанных карбонатно-терригенных пород (мергелей) до прослоев глинистых известняков (от тонких до полуметровой мощности) с ракушками и постройками строматолитового типа. В свите обнаружены спорово-пыльцевые комплексы от позднего кембрия до титонского яруса, многочисленные находки остракод и фораминифер, позволяющие отнести возраст вмещающих пород (инт. 1920–1948) к титонскому ярусу [Narkisova, 2018].

В скважине Северо-Кетская 1 была выполнена сейсмостратиграфическая привязка отражающих горизонтов (ОГ) (рис. 4).

Сейсмическое поле не только является носителем структурной информации, но и отображает физические и промысловые параметры резервуаров и, что особенно важно, содержит информацию об изменении свойств изучаемого объекта как по латерали, так и по вертикали.

В волновом поле хорошо отображаются границы седиментационных комплексов (СК), которые в данном случае соответствуют нефтегазоносным комплексам Западно-Сибирской НГП.

В интервале, соответствующем юрским отложениям, это четыре ОГ (рис. 4):

– ОГ A(D1) – подошва юрских отложений. Реперный отражающий горизонт, характеризуется динамической выраженностью. Это крайне контрастная граница, отождествляемая с предъюрской эрозионной поверхностью, выше которой залегают нижнеюрские отложения, а ниже – нижнекембрийские.

– ОГ T1 – кровля пешковской свиты (кровля ааленских отложений средней юры, вблизи кровли нижнеюр-

ских отложений). Динамически выраженный отражающий горизонт с переменной амплитудой колебания энергии, связанной с разной мощностью слоев углей, залегающих как в кровле пешковской свиты, так и вблизи подошвы тюменской свиты.

– ОГ T2 – кровля тюменской свиты. Высокоамплитудное, высококогерентное динамически выдержанное отражение, формирующееся на границе тюменских песчаников и, преимущественно, аргиллито-алевроитовых пород низов тяжинской свиты.

– ОГ IIb – кровля верхнеюрских отложений. Высокоамплитудное, высококогерентное динамически выдержанное отражение, являющееся реперным для всей Западно-Сибирской НГП.

Между перечисленными реперными горизонтами подобные отражения с такими же хорошо проявленными и выдержанными по площади динамическими характеристиками отсутствуют. И для каждого СК характерна своя особенная волновая картина. Это подтверждает корректность выделения и прослеживания границ седиментационных комплексов.

В интервале, соответствующем нижнеюрским отложениям, прослеживается ОГ Ttg, отождествляемый с тогурской свитой. Отражение динамически не выражено, интенсивность колебания изменяется от средней до низкой, имеется осложнение интерференцией.

Отложения урманской свиты распространены в наиболее погруженных участках территории. Урманская свита характеризуется преимущественно песчаным составом, встречаются прослои углей, а тогурская – преимущественно аргиллито-алевроитовым, вплоть до тонкоотмученных аргиллитов. Но по площади отложения тогурской свиты могут опесчаниваться, поскольку осадконакопление происходило в изменчивых фациальных условиях. Например, существенно глинистые отложения могли накапливаться в крупных озерах, заливах вблизи береговой линии. Это проявляется в нестабильной динамической выраженности отражения на сейсмических разрезах.

Анализируя волновую картину на сейсмических разрезах в интервале, соответствующем юрским отложениям, можно констатировать, что интервал, отождествляемый с отложениями урманской свиты, значительно отличается по своим характеристикам. Наблюдается сложная волновая картина, протяженные отражения полностью отсутствуют, имеются прерывистые, бугристые сейсмofации, значительная интерференция и слабая динамическая выраженность отражений.

Выше, в отложениях, соответствующих пешковской свите, уже появляются более устойчивые, протяженные отражения, особенно хорошо это заметно на разрезе слева и справа от скважины (рис. 4). Еще нагляднее специфичная волновая картина в интервале урманской свиты наблюдается на сейсмическом разрезе в модификации Relief. На разрезе видно, что только для этого интервала характерна положительная, практически белая палитра и холмообразные отражающие площадки.

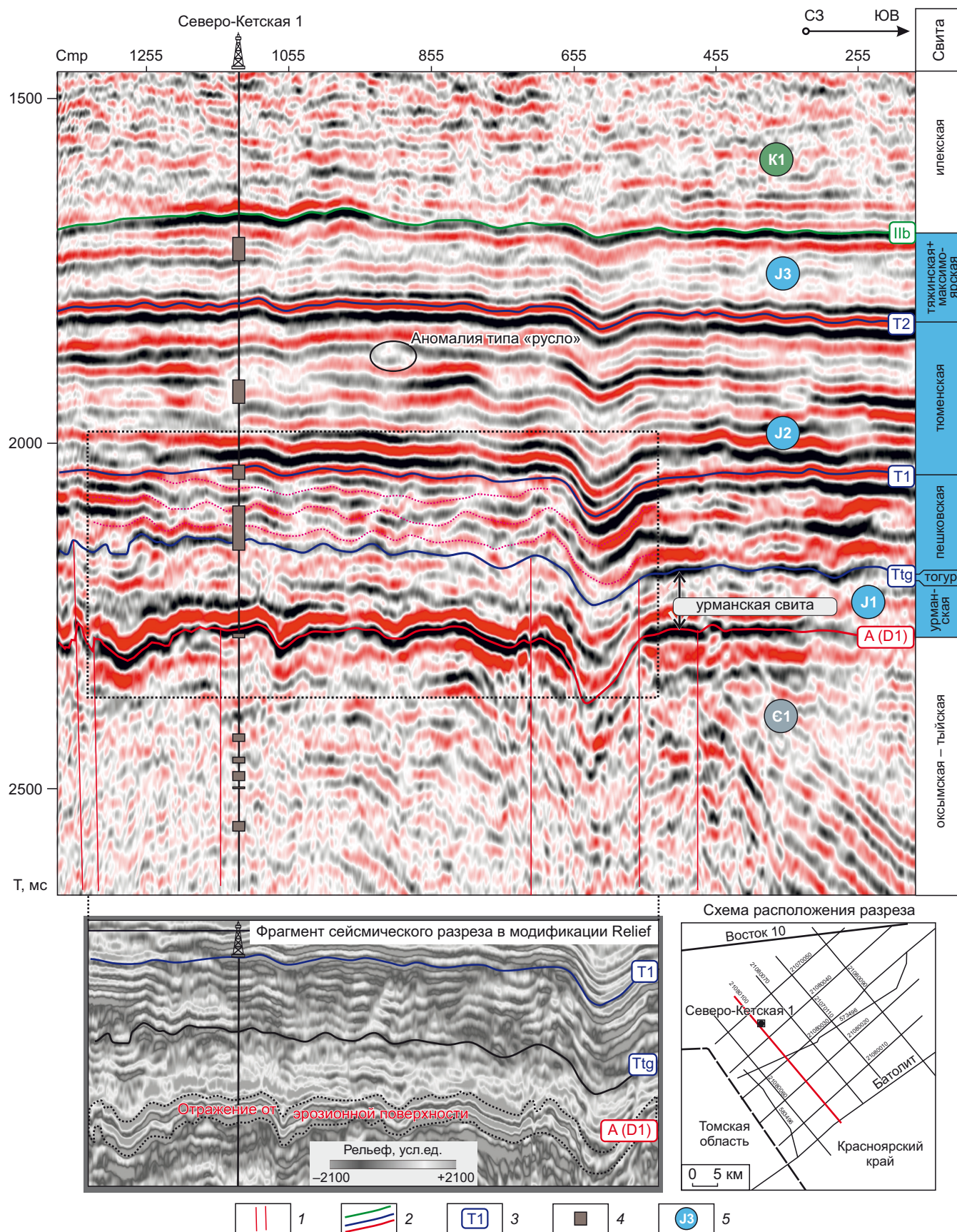


Рис. 4. Стратифицированный сейсмический разрез (Amplitudes) по профилю 21080100. 1 – тектонические нарушения; 2 – корреляция отражающих горизонтов; 3 – индекс отражающих горизонтов; 4 – интервал отбора керна; 5 – возраст отложений.

Fig. 4. Stratified seismic section (Amplitudes) along profile 21080100. 1 – tectonic faults; 2 – correlation of reflecting horizons; 3 – index of reflecting horizons; 4 – core sampling interval; 5 – age of deposits.

Подобная волновая картина часто свойственна субконтинентальным условиям осадконакопления. Считается, что на момент формирования урманской свиты рельеф территории был достаточно расчлененным и источником обломочного материала могло служить не только складчатое обрамление Западно-Сибирской плиты, но и местные источники сноса – выступы доюрских пород. К началу формирования тогурской пачки рельеф был уже значительно пенепленизирован, условия осадконакопления изменились [Vakulenko et al., 2010].

В целом, для нижнеюрского СК характерен интервал разреза с наиболее хаотичной формой записи, фазы изменчивые, не выдержанные, интерферирующие и в случае урманской свиты – разрозненные отражающие площадки.

Для интервала среднеюрского СК характерны уже более выдержанные по площади ОГ, хотя их динамическая выраженность меняется значительно и по площади, и по разрезу. Наблюдаются единичные аномалии типа «русло». Предполагается, что данные отложения могли формироваться в условиях пойменных и русловых фаций.

Для интервала верхнеюрского СК отмечается наличие низкоэнергетических отражений, зачастую прерывистых и интерференционных. Но, тем не менее, отражения можно проследить по площади, что характерно для прибрежно-морского седиментогенеза.

В данной работе реконструкция источников сноса проводилась для отложений урманской (J_{1ur}), пешковской (J_{1-2psh}), тюменской (J_{2tm}) и максимоярской свит (J_{3mks}).

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реконструкции источников сноса обломочного материала пород урманской, пешковской, тюменской и максимоярской свит применялись литолого-петрографические методы (построение и интерпретация классификационных диаграмм «кварц – полевые шпаты – обломки пород», В. Дикинсона) и геохронологическое исследование детритового циркона методом LA-ICP-MS [Gehrels et al., 2006; Maslov et al., 2019].

Литолого-петрографические исследования выполнены специалистами АО «КамНИИКИГС». Для петрографических исследований шлифов использованы поляризационные микроскопы Полам-213 М, Axiolab ZEISS, LEICA DMLP. Фотографирование шлифов выполнено на Axiolab ZEISS, LEICA DMLP [Narkisova, 2018].

Определение возраста обломочного циркона проведено методом лазерной абляции в индуктивно связанной плазме (LA-ICP-MS) в Центре геотермохронологии Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ по методике с использованием системы лазерной абляции на основе эксимерного лазера (длина волны 193 нм) Analyte Excite (Teledyne Cetac Technologies), соединенной с квадрупольным масс-спектрометром с ионизацией в индуктивно связанной плазме Thermo Scientific iCAP Q [Kotler et al., 2025].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Литолого-петрографические методы

С целью классификации терригенных пород рассматриваемых свит построена классификационная диаграмма «кварц – полевые шпаты – обломки пород», разделяющая песчаники на определенные группы, позволяющие определить условия их формирования и состав протолитов (рис. 5) [Shutov, 1967; Maslov et al., 2019].

Породы урманской свиты (24 шлифа) сосредоточены в полях граувакково-аркозовых песчаников и полевошпат-кварцевых граувакк, которые формируются за счет разрушения эффузивных пород кислого и среднего состава, а также высокометаморфизованных пород в разнообразных режимах платформ и складчатых областей (рис. 5). Обломки пород данной свиты представлены кремнистыми породами, кварцитами, эффузивами среднего и кислого состава, углефицированным растительным детритом, слюдами, реже – пиритом и сидеритом.

Песчаники пешковской (21 шлиф) и тюменской (17 шлифов) свит по составу отвечают в большей степени граувакко-аркозам, в меньшей степени – полевошпат-кварцевым грауваккам и мезомиктовым породам, формирование которых в основном связано с разрушением полнокристаллических изверженных пород кислого и среднего состава, метаморфических пород, в меньшей степени – с разрушением осадочных пород преимущественно кварцевого состава в разнообразных режимах платформ и складчатых областей (рис. 5). Обломки пород пешковской и тюменской свит представлены кремнистыми породами, микрокварцитами, эффузивами среднего и кислого состава, углефицированным растительным детритом, реже – слюдами и пиритом.

По составу породы максимоярской свиты (24 шлифа) в большей степени относятся к полевошпат-кварцевым, мезомиктовым и граувакко-аркозовым песчаникам. Единичные образцы представляют собой кремнекластито-кварцевые песчаники и кварцевые граувакки. Обломки пород представлены углистым детритом, микрокварцитами, измененными вулканитами кислого, среднего и основного состава, редко – микрозернистыми известняками. Формирование пород максимоярской свиты в большей мере происходило за счет разрушения осадочных пород кварцевого состава, в меньшей – за счет разрушения эффузивных пород кислого и среднего состава (рис. 5).

Согласно данной классификационной диаграмме наблюдается снижение сноса материала, образованного за счет разрушения эффузивных пород кислого состава, который смещается в сторону сноса материала, образованного в ходе разрушения осадочных пород преимущественно кварцевого состава по мере омоложения юрских пород от нижнеюрских пород урманской свиты к верхнеюрским отложениям максимоярской и при снижении интенсивности тектонического режима.

Дополнительным инструментом для реконструкции источников обломочного материала является дискриминантная диаграмма Дикинсона, позволяющая на

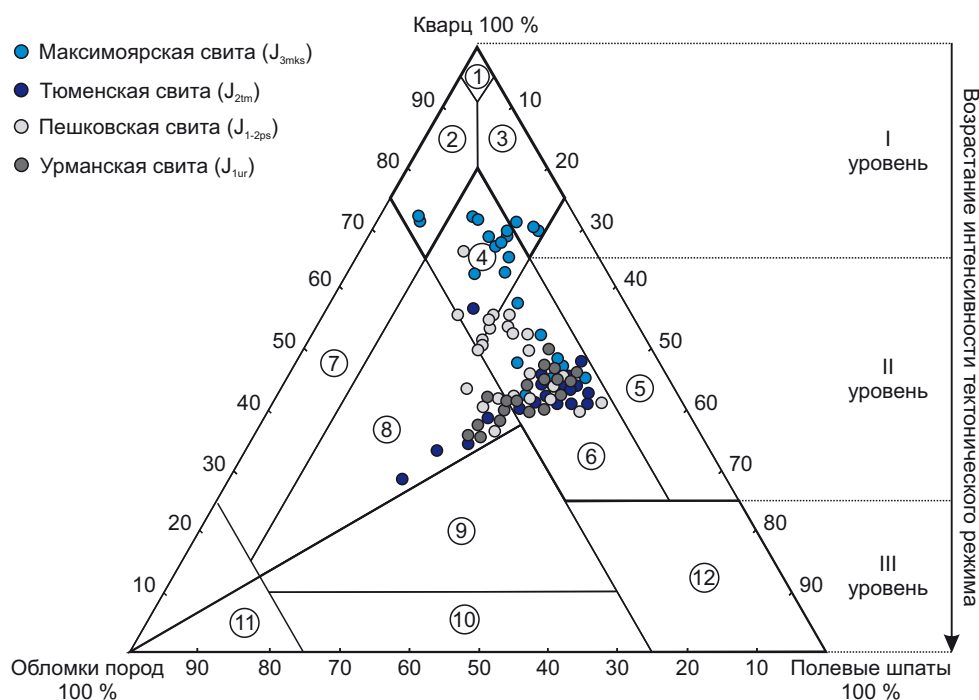


Рис. 5. Классификационная диаграмма «кварц – полевые шпаты – обломки пород» с нанесенными точками песчаников урманской, пешковской, тюменской и максимоярской свит [Shutov, 1967].

1 – мономиктовые кварцевые; 2 – кремнекlastито-кварцевые; 3 – полевошпат-кварцевые; 4 – мезомиктовые; 5 – собственно аркозовые; 6 – граувакково-аркозовые; 7 – кварцевые граувакки; 8 – полевошпат-кварцевые граувакки; 9 – кварц-полевошпатовые граувакки; 10 – полевошпатовые граувакки; 11 – собственно граувакки; 12 – поле песчаников не чисто терригенного происхождения

Fig. 5. Classification diagram "quartz – feldspars – rock fragments" with the points marking sandstones from the Urman, Peshkov, Tyumen, and Maksimoyar formations [Shutov, 1967].

1 – monomictic quartz; 2 – siliciclastic quartz; 3 – feldspar quartz; 4 – mesomictic; 5 – arkose; 6 – greywacke-arkose; 7 – quartz greywacke; 8 – feldspar-quartz greywacke; 9 – quartz-feldspar greywacke; 10 – feldspar greywacke; 11 – greywacke; 12 – a field of sandstones of impure terrigenous origin.

основе минерального состава песчаников определять тектонические обстановки территорий, из которых происходил снос обломочного материала. Методологическая основа диаграммы Дикинсона базируется на эмпирическом анализе более тысячи петрографических шлифов фанерозойских песчаников Северной Америки из различных тектонических провинций, что позволяет идентифицировать три основные провинции – источники сноса: вулканические дуги, континентальные блоки и рециклированные орогены [Dickinson et al., 1983].

На сводной треугольной дискриминантной диаграмме Дикинсона состав пород урманской, пешковской и тюменской свит в большей степени локализуется в поле эродированных вулканических дуг, ряд данных по пешковской свите попадает в поле рециклированных орогенов (рис. 6). Большая часть песчаников максимоярской свиты сосредоточена в поле рециклированных орогенов, меньшая часть – в области эродированных вулканических дуг (рис. 6).

Данные, полученные в результате анализа распределения юрских песчаников на диаграмме Дикинсона, демонстрируют эволюцию геодинамических обстановок областей питания от вулканических дуг в ранне-

среднеюрское время (урманская, пешковская, тюменская свиты) к рециклированным орогенам в позднеюрское время (максимоярская свита), что, вероятно, обусловлено тектоническими процессами воздымания складчатого обрамления бассейна (Обь-Зайсанская, Колывань-Томская и другие складчатые системы) [Zhimulev et al., 2021; Kotler et al., 2025].

4.2. U-Pb датирование циркона методом лазерной абляции (LA-ICP-MS)

В Suppl. 1 на странице статьи онлайн представлены результаты U-Pb датирования. Из керна урманской свиты, отобранного с глубины 2845.3–2868.3 м, взят образец № 12. Было проанализировано 111 зерен циркона, два анализа были исключены по причине дискордантности полученных значений возраста. Зерна циркона из образца № 12 имеют размеры от мелких до крупных (30–200 мкм), представлены кристаллами и обломками кристаллов со средней окатанностью с осцилляторной и полосчатой зональностью, сложным внутренним строением.

В породе преобладает фанерозойский циркон – 91 % (99 зерен), докембрийский циркон составляют 9 % (10 зерен) от всех датированных зерен (рис. 7). Среди

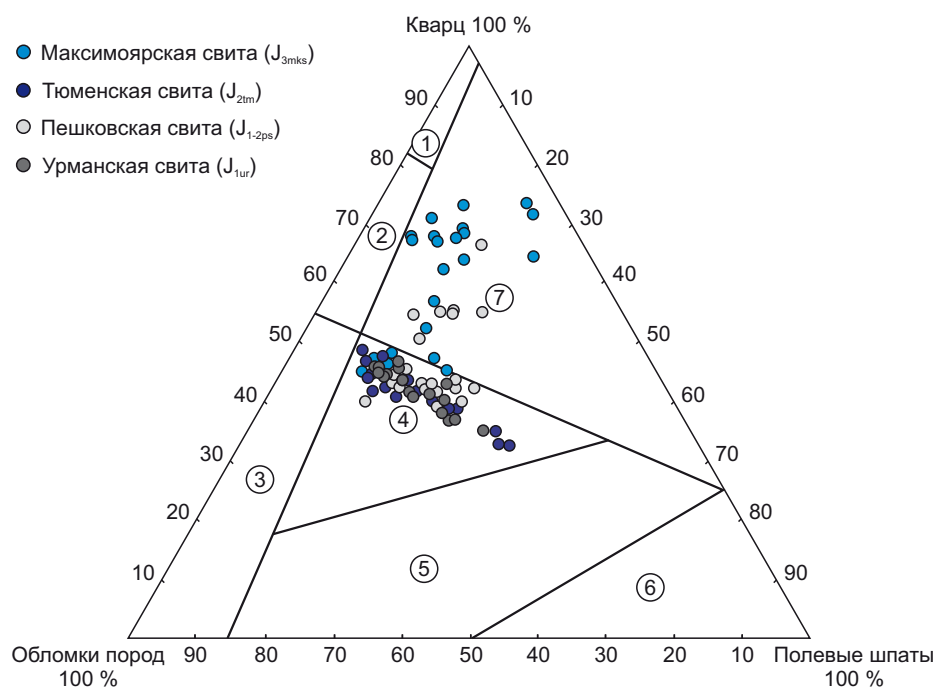


Рис. 6. Дискриминантная диаграмма Дикинсона с соавторами [Dickinson et al., 1983].

Источники обломочного материала: 1 – внутренние области кратона; 2 – переходные континентальные блоки; 3 – поднятия фундамента; 4 – эродированные дуги; 5 – переходные островодужные области; 6 – неэродированные дуги; 7 – рециклированные орогены.

Fig. 6. Classification diagram according to Dickinson et al. [Dickinson et al., 1983].

Sources of clastic material: 1 – internal areas of the craton; 2 – transitional continental blocks; 3 – basement uplifts; 4 – eroded arcs; 5 – transitional island arc areas; 6 – non-eroded arcs; 7 – recycled orogens.

докембрийских зерен доминируют зерна с неопротерозойским возрастом (8 зерен, 7 % от всех датированных зерен), которые не образуют статистически значимые пики. Мезопротерозойские и архейские цирконы (по одному зерну) также в виде единичных зерен. Среди фанерозойских зерен присутствуют зерна циркона с возрастом от кембрия до юры с доминированием зерен кембрийского возраста (48 зерен – 44 %), которые образуют статистически значимый пик – 493 млн лет. Ордовикские, силурийские, девонские, каменноугольные, пермские, триасовые и юрские цирконы составляют 12 % (13 зерен), 2 % (2 зерна), 9 % (10 зерен), 6 % (6 зерен), 11 % (12 зерен), 6 % (6 зерен) и 2 % (2 зерна) от всей пробы соответственно и образуют возрастные пики 471, 400, 376, 364, 298, 284, 266 и 250 млн лет. Остальные цирконы в виде единичных зерен.

В образце № 12 выделяется самая молодая популяция циркона (5 зерен) с возрастом 249.3 ± 3.6 млн лет, что соответствует оленекскому ярусу нижнего триаса (рис. 7). Также в породе присутствуют три молодых зерна, не образующих статистически значимых пиков, с возрастом 189, 196, 233, 238 млн лет. Можно утверждать, что порода не древнее 249 млн лет, однако следует предположить, что она не древнее плинсбахского возраста ранней юры.

В образце керна пешковской свиты, отобранного с интервала 2586.0–2608.8 м, выделено более 100 зе-

рен циркона (образец № 9), было датировано 93 зерна, один анализ был исключен по причине дискордантности полученных значений возраста. Зерна из образца № 9 имеют размер от мелких до крупных (30–200 мкм), представлены в основном кристаллами и обломками кристаллов до средней окатанности с осцилляторной и полосчатой зональностью, сложным внутренним строением.

В породе преобладает фанерозойский циркон (90 % – 83 зерна), докембрийский циркон составляет 10 % (9 зерен) от всех датированных зерен (рис. 7). Среди докембрийских зерен доминируют зерна с неопротерозойским возрастом (7 зерен, 8 % от всех датированных зерен), которые не образуют статистически значимые пики. Палеопротерозойский и архейский циркон встречается также в виде единичных зерен. Среди фанерозойских зерен присутствуют зерна с возрастом от кембрия до юры. Циркон девонского, каменноугольного, пермского, триасового и юрского возраста представляют 12 зерен (13 %), 17 зерен (18 %), 13 зерен (14 %), 11 зерен (12 %) и 14 зерен (15 %) соответственно с образованием возрастных кластеров 408, 367, 345, 336, 314, 304, 281, 266, 258, 236, 196 и 188 млн лет. Кембрийский, ордовикский и силурийский циркон обнаруживается в подчиненном количестве и составляет 7 % (6 зерен), 5 % (5 зерен) и 5 % (5 зерен) от всей пробы соответственно с возрастными пиками 485 и 439 млн лет.

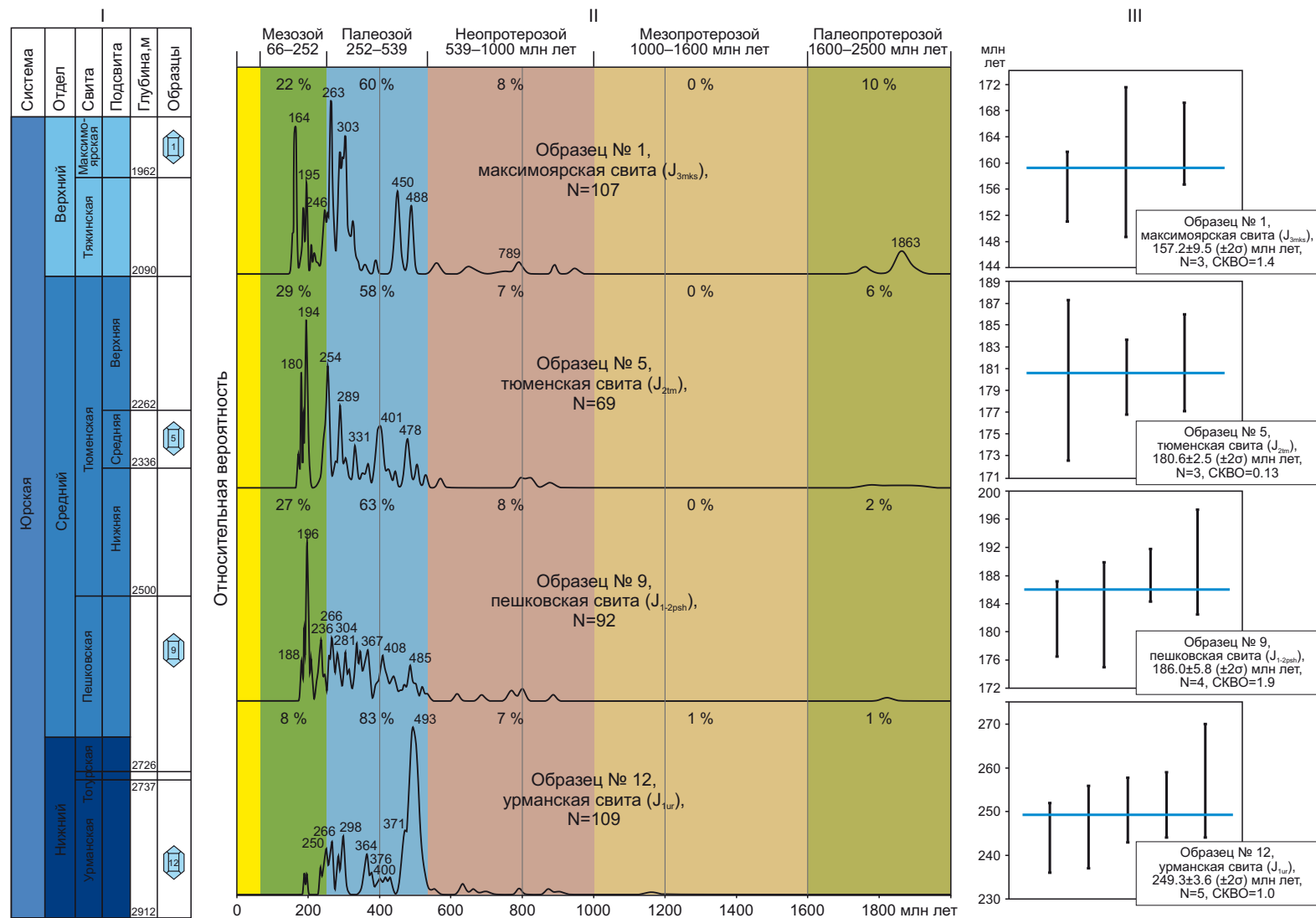


Рис. 7. Графики плотности вероятности обломочного циркона в юрских образцах из скв. Северо-Кетская 1.

I – упрощенная сводная стратиграфическая шкала скв. Северо-Кетская 1 с положением изученных песчаников; II – гистограмма распределения значений возраста обломочного циркона в образце, где N – количество датированных конкордантных зерен, % – количество зерен заданного возрастного интервала от общего числа датированных зерен; III – средневзвешенное значение возраста наиболее молодой популяции зерен циркона, пересекающихся в пределах 2σ .

Fig. 7. Probability density curves for clastic zircon in the Jurassic samples from the Severo-Ketskaya 1 well.

I – simplified general stratigraphic scale of the Severo-Ketskaya 1 well with the studied sandstone locations; II – histogram of the clastic zircon age distribution in the sample, where N is the number of dated concordant grains, and % is the percentage of grains of a given age range among the dated grains; III – weighted average age of the youngest population of zircons that intersect within 2σ .

В образце пешковской свиты выделяется самая молодая популяция циркона (4 зерна) с возрастом 186.0 ± 5.8 млн лет, что соответствует плинсбахскому ярусу нижней юры (рис. 7). Также в породе присутствуют два молодых зерна, не образующих статистически значимых пиков, с возрастом 182 млн лет. Можно утверждать, что порода не древнее 186 млн лет, однако следует предположить, что она не древнее тоарского возраста.

Для образца керна тюменской свиты, отобранного с глубины 2283.3–2293.3 м (образец № 5), удалось определить возраст по 71 зерну циркона, два измерения были исключены по причине дискордантности полученных значений возраста. Зерна из образца № 5 имеют размер от мелкого до среднего (30–150 мкм), представлены кристаллами и обломками кристаллов с осцилляторной и полосчатой зональностью, со сложным внутренним строением до средней окатанности.

В породе преобладает фанерозойский циркон – 87 % (60 зерен), докембрийский циркон составляет 13 % (9 зерен) от всех датированных зерен (рис. 7). Среди докембрийских зерен палеопротерозойский и неопротерозойский циркон примерно в равных частях (4 зерна – 6 % и 5 зерен – 7 % от всех датированных зерен) с образованием статистически значимого пика 1854 млн лет. Среди фанерозойских зерен присутствует циркон с возрастом от кембрия до юры. Циркон девонского, каменноугольного, пермского, триасового и юрского возраста представляют 11 зерен (16 %), 7 зерен (10 %), 13 зерен (19 %), 6 зерен (9 %) и 13 зерен (19 %) соответственно с образованием возрастных кластеров 401, 331, 304, 289, 254, 194 и 180 млн лет. Ордовикский циркон (5 зерен) образует статистически значимый пик – 478 млн лет, остальной циркон в виде единичных зерен.

Самая молодая популяция циркона (3 зерна) с возрастом 180.6 ± 2.5 млн лет соответствует тоарскому ярусу нижней юры (рис. 7). Также в породе присутствуют молодые зерна, не образующие статистически значимых пиков, с возрастом 172 млн лет. Можно утверждать, что порода не древнее 180 млн лет, однако следует предположить, что она не древнее ааленского возраста.

Из образца керна максимоярской свиты, отобранного с глубины 1938.6–1962.2 м (образец № 1), было датировано 110 зерен циркона, три зерна были исключены по причине дискордантности полученных значений возраста. Зерна из образца № 1 имеют размер от среднего и крупного (100–250 мкм), представлены как идиоморфными кристаллами и обломками кристаллов со слабой окатанностью с осцилляторной зональностью, так и зернами со сложным внутренним строением и осцилляторной зональностью до средней степени окатанности.

В породах максимоярской свиты преобладает фанерозойский циркон (81 % – 87 зерен), докембрийский циркон составляет 19 % (20 зерен) от всех датированных зерен (рис. 7). Среди докембрийских зерен

палеопротерозойские и неопротерозойские примерно в равных частях (10 зерен – 10 % и 9 зерен – 8 % от всех датированных зерен), они образуют статистически значимые пики 789 и 1863 млн лет. Также присутствует единичное зерно архейского возраста. Среди фанерозойских зерен присутствуют зерна циркона с возрастом от кембрия до юры с доминированием циркона каменноугольного (16 зерен, 15 %), пермского (29 зерен, 27 %) и юрского (15 зерен, 14 %) возраста, которые образуют статистически значимые пики 325, 303, 296, 289, 263, 254, 195, 164 и 157 млн лет. Зерна кембрийского, ордовикского и триасового возраста присутствуют в подчиненном количестве примерно в равных частях (7 зерен – 7 %, 9 зерен – 8 % и 8 зерен – 7 % соответственно) и образуют возрастные кластеры 488, 450 и 246 млн лет. Остальные зерна в виде единичных зерен.

В образце № 1 выделяется самая молодая популяция циркона (3 зерна) с возрастом 157.2 ± 9.5 млн лет, что соответствует оксфордскому ярусу верхней юры (рис. 7). Полученный возраст близок ко времени накопления отложений, что подтверждает возраст опробованного интервала и определяет нижнюю границу возраста осадконакопления толщи.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объективного сравнения эмпирических распределений U-Pb-возраста детритового циркона в исследуемых образцах применен непараметрический критерий Колмогорова – Смирнова (рис. 8) (табл. 1).

Методологический подход основан на построении эмпирических функций распределения (ЭФР) для каждого образца и расчете максимального расстояния между ними в метрике Колмогорова. Статистический критерий Колмогорова – Смирнова (KS-статистика) определяется как

$$\Delta = \max[F_1(t) - F_2(t)], \quad (1)$$

где $F_1(t)$ и $F_2(t)$ – эмпирические функции распределения сравниваемых выборок.

Нулевая гипотеза H_0 предполагает, что две независимые выборки извлечены из генеральной совокупности с одинаковым распределением. Альтернативная гипотеза H_1 утверждает, что распределения различаются. Проверка гипотезы осуществляется на уровне значимости $\alpha=0.05$. При р-значении $P(KS)<0.05$ нулевая гипотеза отклоняется, что указывает на статистически значимые различия между распределениями значений возраста цирконов и исключает принадлежность образцов единому источнику сноса. При $P(KS)\geq 0.05$ нулевая гипотеза не отклоняется, что свидетельствует об отсутствии достоверных различий между эмпирическими распределениями и позволяет интерпретировать наблюдаемые вариации как результат естественной стохастической изменчивости [Gehrels, 2009; Soloviev et al., 2023].

Результаты теста Колмогорова – Смирнова показывают, что образцы максимоярской, тюменской и

пешковской свит имеют идентичное распределение значений U-Pb возраста зерен обломочного циркона (табл. 1). Во время накопления образцов № 1, 5 и 9 в источниках сноса преобладали зерна каменноугольного, пермского и юрского возраста. Зерна кембрийского и ордовикского возраста играли меньшую роль в формировании пород.

Для образца № 12 урманской свиты распределения U-Pb возрастов детритового циркона отличны от других свит главным образом явным преобладанием зерен кембрийского и ордовикского возраста, тогда как цирконы каменноугольного, пермского и юрского возраста обнаруживаются в подчиненном количестве (см. рис. 7).

Самые молодые зерна циркона юрского возраста встречаются в каждой изученной пробе, однако статистически значимые пики они образуют в образцах пешковской, тюменской и максимоярской свит – 188 и 196, 180 и 194, 164 и 195 млн лет (см. рис. 7). Наиболее

вероятным источником циркона данного возраста являются магматические комплексы Забайкалья в непосредственной близости от Монголо-Охотской шовной зоны, связанные с субдукцией Монголо-Охотской океанической коры под Сибирский континент, которая способствовала широкому распространению вулканоплутонической активности в регионе [Arzhannikova et al., 2018, 2020; Demonterova et al., 2018]. В ранней и средней юре на территории Забайкалья происходил быстрый рост гор, что подтверждается данными U-Pb датирования детритового циркона [Demonterova et al., 2017]. Транспортировка терригенного материала, вероятно, происходила с востока и юго-востока Пра-Ангарой, которая вначале протекала между Восточным Саяном и Верхнеленской возвышенностью, а затем выходила на плоскую равнину Западно-Сибирской платформы, где впадала в эпиконтинентальный морской бассейн [Timofeev, 1970]. Усиление тектонической активности южного обрамления Сибирской платформы в ранней

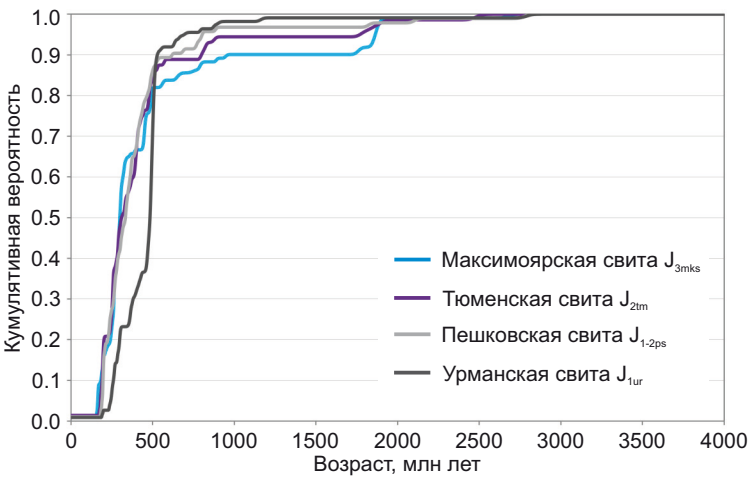


Рис. 8. График кумулятивной вероятности распределений значений возраста зерен обломочного циркона из образцов керна скв. Северо-Кетская 1.

Fig. 8. Cumulative probability plot of age-related changes in zircon from core samples from the Severo-Ketskaya 1 well.

Таблица 1. Результат применения критерия Колмогорова – Смирнова (P(KS)) для сравнения распределений значений U-Pb возраста зерен обломочного циркона из образцов керна скв. Северо-Кетская 1 (образцы ранжированы по возрасту от древних к молодым (снизу вверх))

Table 1. The result of the Kolmogorov-Smirnov test (P(KS)) to compare the distributions of U-Pb ages of clastic zircons from the core samples of the Severo-Ketskaya 1 well (the samples are arranged in oldest to youngest order (bottom to top))

№ образца, стратиграфия	Глубина отбора, м	№ 1	№ 5	№ 9	№ 12
Образец № 1 Максимоярская свита J _{3mks}	1938.6–1962.2		0.887	0.519	0.000
Образец № 5 Тюменская свита J _{2tm}	2283.3–2293.3	0.887		0.974	0.000
Образец № 9 Пешковская свита J _{1-2ps}	2586.0–2608.8	0.519	0.974		0.000
Образец № 12 Урманская свита J _{1ur}	2845.3–2868.3	0.000	0.000	0.000	

Примечание. P(KS)>>0.05 – распределения идентичны, зеленый цвет. P(KS)<0.05 – распределения не идентичны, белый цвет.

Note. P(KS)>>0.05 – distributions are identical, green color. P(KS)<0.05 – distributions are not identical, white color.

и средней юре способствовало более активной гидродинамике речных систем, что привело к увеличению денудации размываемых пород [Arzhannikova et al., 2018]. Следует отметить, что на данный момент вулканизм в пределах Забайкалья относительно слабо охарактеризован U-Pb методом, однако если сопоставлять данные U-Pb датирования, полученные по вулканогенно-осадочным породам Центрального и Восточного Забайкалья, то они соответствуют пикам, полученным по отложениям пешковской, тюменской и максимоярской свит скважины Северо-Кетская 1 [Kosenko et al., 2024].

Во всех изучаемых образцах присутствует циркон пермско-триасового возраста (260–230 млн лет), что, вероятно, связано с широким развитием пермско-триасового вулканизма в пределах Западно-Сибирской плиты, гранитоидов Колывань-Томской, Обь-Зайсанской складчатых систем, Горного Алтая, а также магматизма, обусловленного с формированием траппов в пределах Сибирского кратона [Vetrov et al., 2021; Khromykh et al., 2022]. Вероятно, преобладающими источниками циркона пермско-триасового возраста могут быть как широко развитые кислые вулканы доюрского комплекса Западной Сибири с возрастом 248–254 млн лет, которые приурочены главным образом к многочисленным рифтогенным структурам и представлены дацитами, риодацитами, риолитами, трахидацитами [Smirnova et al., 2024], так и гранитоиды Колывань-Томской складчатой зоны, которые были вскрыты мезозойским орогенезом [Metelkin et al., 2010; Zhimulev et al., 2021; Vetrov et al., 2021]. В свою очередь, скважина Северо-Кетская 1 расположена в относительной близости от областей пермско-триасового магматизма и Колывань-Томской складчатой зоны; вероятно, с этим связано преобладание кристаллов циркона до средней окатанности (рис. 9).

Во всех изучаемых образцах присутствуют зерна циркона раннепермского и позднекаменноугольного возраста, наличие которых в юрских образцах скважины Северо-Кетская 1 связано с гранитоидами, широко развитыми в пределах Западно-Сибирской плиты (297–261 млн лет) и Обь-Зайсанской складчатой области (310–267 млн лет), и базальт-андезидацитовыми вулканическими ассоциациями Жарма-Саурской и Чарской зон данной складчатой системы (311–290 млн лет) [Khotylev et al., 2021; Khromykh, 2022]. Предполагается, что в позднепермское – раннеюрское и позднеюрско-раннемеловое время, то есть на момент формирования изучаемых пород, в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса происходили процессы внутриконтинентального орогенеза в результате закрытия Палеотетиса и Монголо-Охотского океана, что привело к воздыманию складчатого обрамления Западно-Сибирского бассейна и последующей эрозии [Zhimulev et al., 2021].

В образцах пешковской и тюменской свит присутствует циркон раннекаменноугольного возраста, происхождение которого, вероятно, связано с вулканически-

ми и вулканогенно-осадочными комплексами Салаира и Колывань-Томской зоны [Zhimulev et al., 2019].

В качестве источника сноса для кембро-ордовикского и девонского циркона предполагаются как гранитоиды центральной части Западной Сибири, которые в пределах Ем-Еговского поднятия Краснотенинского свода имеют датировки 379–368 млн лет, так и среднепозднедевонские островодужные комплексы Рудного Алтая (391–381 млн лет) [Kuibida et al., 2020; Khotylev et al., 2021]. Также вероятным источником девонского циркона могли являться рифтогенные эффузивные породы Минусинского прогиба, возраст которых согласно Ar-Ar изотопному датированию отвечает интервалу 408–364 млн лет [Vorontsov et al., 2013, 2015]. Наиболее вероятным источником циркона ордовикского возраста (пики 450, 488, 478, 485, 471 и 493 млн лет) могут являться раннепалеозойские комплексы Западно-Сибирской плиты, развитые в основании и обрамлении восточной части бассейна (рис. 9). В центральной части Западной Сибири по результатам U-Pb датирования цирконов из гранитоидов Северо-Селияровской и Нялинской площадей получены датировки 470–430 млн лет [Ivanov et al., 2013].

Циркон с докембрийским возрастом встречается в каждой изученной пробе, однако статистически значимые пики они образуют только в образце максимоярской свиты – 1863 и 789 млн лет (см. рис. 7). Возможными источниками циркона с возрастом 789 млн лет является позднерифейская плагиориодацит-базальтовая ассоциация Енисейского кряжа [Nozhkin et al., 2011]. Палеопротерозойский циркон (1863 млн лет) отвечает возрасту формирования палеопротерозойского Ангарского складчатого пояса, фрагменты которого вскрыты на Саянском и Канском выступах и маркируют западное обрамление Сибирского кратона [Priyatkina et al., 2020; Samsonov et al., 2021]. Также вероятным источником сноса палеопротерозойских цирконов могут являться гранитоиды и метаморфические породы фундамента на южной окраине Сибирской платформы [Mikheeva, 2017].

По результатам датирования обломочного циркона вместе с использованием литолого-петрографического метода можно проследить эволюцию источников сноса для юрских отложений Предъенисейской ПНГО (рис. 10).

В раннеюрское время преобладают местные источники сноса, представленные раннепалеозойскими комплексами Западно-Сибирской плиты, развитые в основании и обрамлении восточной части бассейна и образующие статистически значимые пики 493 и 471 млн лет. Вторым по значимости источником сноса является позднепалеозойский циркон (419–252 млн лет), представленный кислыми вулканами пермско-триасового магматизма Западной Сибири, гранитоидами Колывань-Томской складчатой зоны и магматическими породами Обь-Зайсанской складчатой области, что подтверждается проведенными литолого-петрографическими исследованиями. Мезозойские и палео-

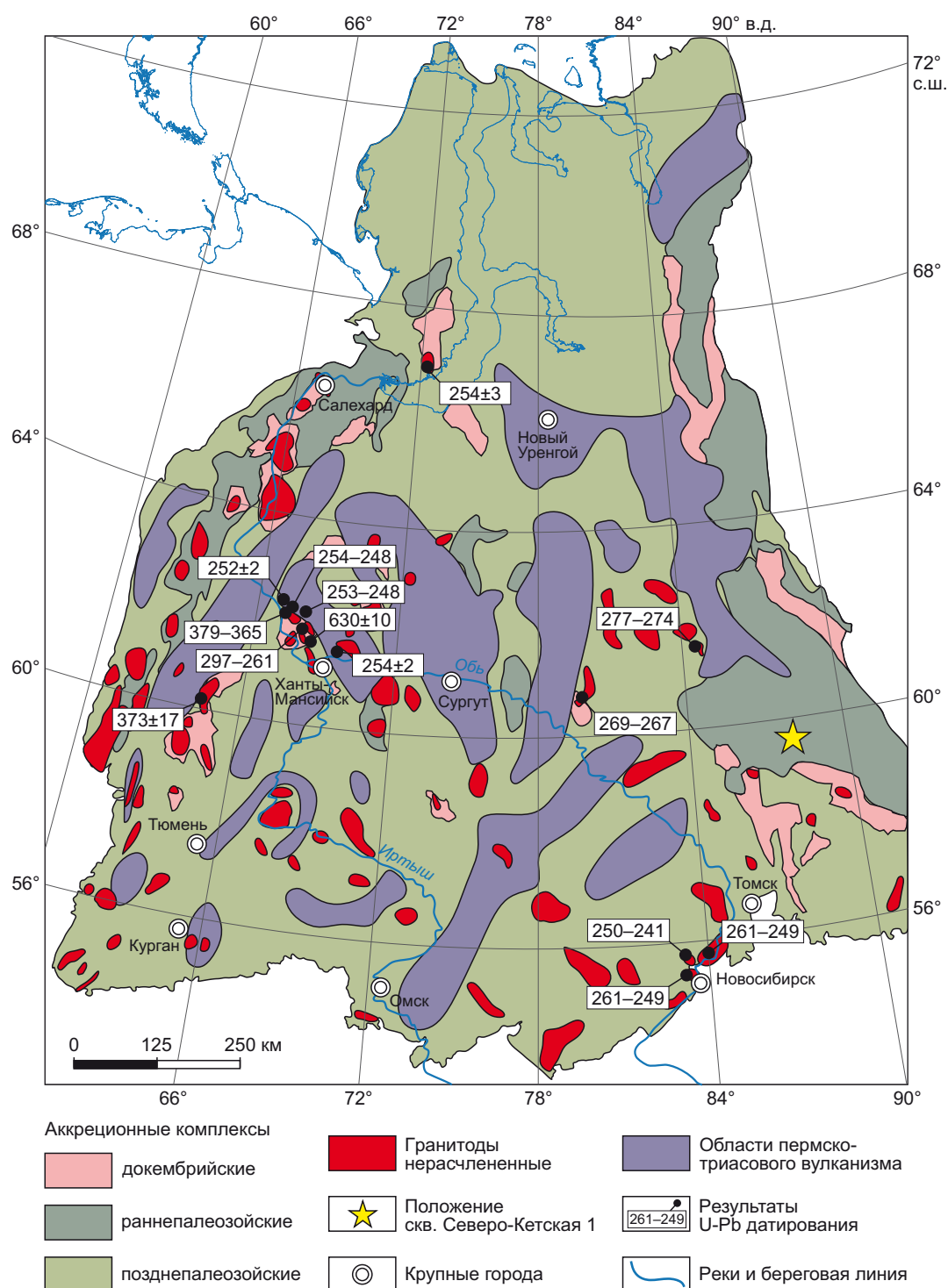


Рис. 9. Геологическая схема доюрского основания Западно-Сибирской плиты [Kotler et al., 2025].

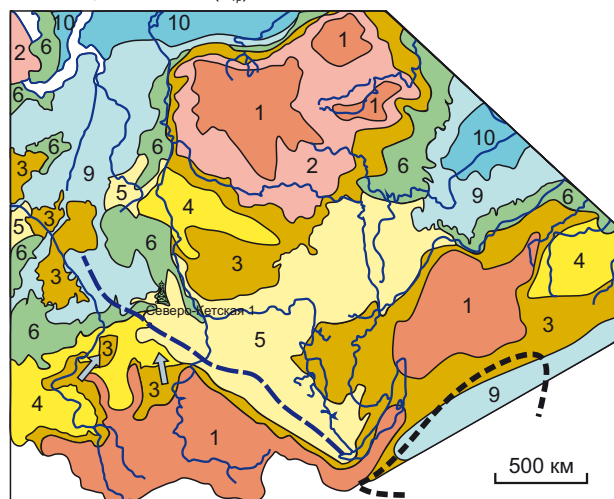
Fig. 9. Geological scheme of the pre-Jurassic basement of the West Siberian Plate [Kotler et al., 2025].

мезо- и неопротерозойские источники присутствуют в подчиненном количестве.

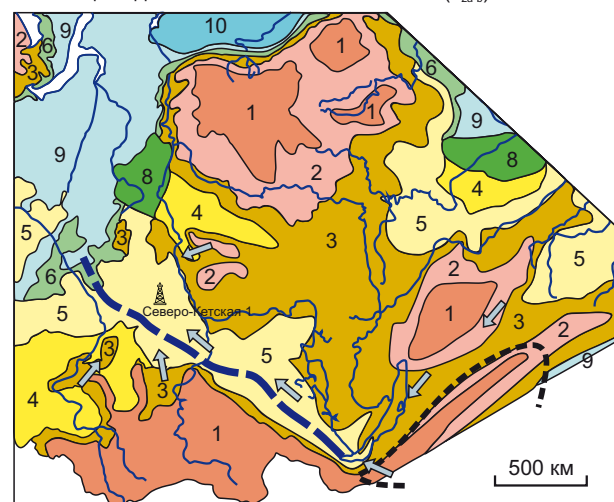
В среднеюрское время ключевую роль играют позднепалеозойские источники сноса (370–220 млн лет), причем наблюдается появление циркона раннекаменноугольного возраста (359–323 млн лет), связанного с вулканическими и вулканогенно-осадочными комплексами Салаира и Колывань-Томской зоны. Значи-

тельно снижается влияние раннепалеозойских структур в формировании среднеюрских пород. Увеличивается размыв мезозойских отложений (210–100 млн лет). В отложениях тюменской свиты увеличивается доля палеопротерозойского циркона (2500–1600 млн лет), связанного с формированием Ангарского складчатого пояса. Снос обломочного материала с мезо- и неопротерозойских источников не изменяется.

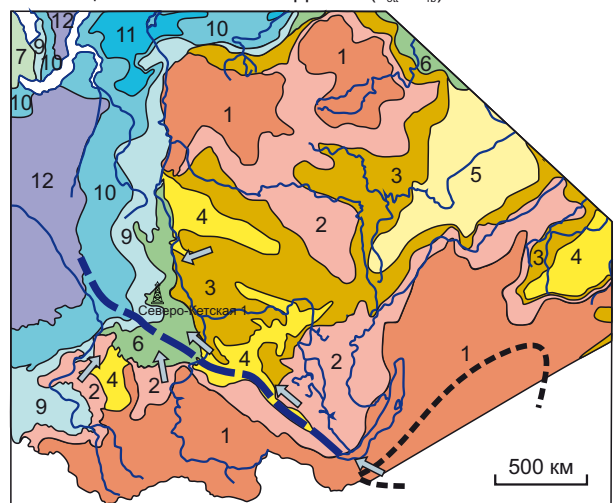
Палеогеографическая схема
на конец плинсбаха (J_{1p})



Палеогеографическая схема
на конец позднего аалена – начало байоса (J_{2a-b})



Палеогеографическая схема
на конец титона – начало берриаса (J_{3t-K1b})



Палеогеографические обстановки

Области денудации

- 1 горы средние и низкие
- 2 возвышенности, нагорья
- 3 аккумулятивно-денудационные
- 4 денудационно-аккумулятивные

Области аккумуляции

- 5 аллювиально-озерные равнины
- 6 прибрежно-морские равнины
- 7 подводные возвышенности
- 8 дельта, аванделта, конус выноса
- 9 море, верхняя сублитораль: 0–20 м
- 10 море, средняя сублитораль: 20–80 м
- 11 глубокое море: >80 м
- 12 море, зона формирования углеродистых пород

- Элементы современной гидрографии
- Предполагаемое направление течения Пра-Ангары
- Направления сноса обломочного материала
- Контур мезозойской Западно-Забайкальской магматической провинции

Рис. 10. Палеогеографические схемы Сибири, показывающие изменения направлений источников сноса в мезозойское время [Devyatov et al., 2011; Kosenko et al., 2024]. Контур мезозойской Западно-Забайкальской магматической провинции взят из работы [Yarmoluk et al., 2026].

Fig. 10. Paleogeographic schemes of Siberia showing a change of provenance directions in the Mesozoic [Devyatov et al., 2011; Kosenko et al., 2024]. The contours of the Mesozoic West-Transbaikalian magmatic province are taken from [Yarmoluk et al., 2026].

В позднеюрское время преобладают каменноугольные и пермские источники сноса (359–252 млн лет). Мезозойские, раннепалеозойские и нео-, мезо- и палеопротерозойские источники играют меньшую роль в формировании позднеюрских отложений, причем нео- и палеопротерозойские зерна циркона образуют статистически значимые пики 789 и 1863 млн лет.

Таким образом, можно предположить, что возрастание роли мезозойских, позднепалеозойских и палеопротерозойских источников сноса по мере омоложения от нижнеюрских пород к верхнеюрским породам связано с процессами внутриплитного орогенеза, распространенного по всей Центральной Азии [Zhimulev et al., 2021; Vetrov et al., 2021]. В ранне- и среднеюрское время в пределах южного обрамления Сибирской платформы произошла тектоническая активизация, связанная с закрытием Монголо-Охотского океана, что способствовало увеличению доли мезозойских и палеопротерозойских источников сноса [Metelkin et al., 2010; Van der Voo et al., 2015; Chen et al., 2022]. В позднеюрское – раннемеловое время структуры Обь-Зайсанской складчатой системы и Колывань-Томской складчатой зоны были выведены на поверхность, что привело к увеличению доли верхнепалеозойских источников сноса. Полученные результаты согласуются с интерпретацией положения песчаников максимоярской свиты на диаграмме Дикинсона (см. рис. 6).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно петрографическим данным песчаники урманской, пешковской и тюменской свит относятся к кварцевым грауваккам и аркозам, формирование которых связано с размывом широкого спектра магматических образований, включающих эффузивные кислые и средние породы, а также высокометаморфизованных разностей. Терригенные отложения максимоярской свиты в большей степени относятся к мезомиктовым песчаникам, формирующимся за счет разрушения осадочных пород кварцевого состава в более спокойной тектонической обстановке.

По результатам анализа распределения юрских песчаников на диаграмме Дикинсона отмечается эволюция геодинамических обстановок областей питания от вулканических дуг в раннесреднеюрское время к рециклированным орогенам в позднеюрское время, обусловленная тектоническими процессами воздымания Колывань-Томской и Обь-Зайсанской складчатых систем в обрамлении Западно-Сибирского бассейна.

Результаты U-Pb изотопного датирования циркона из песчаников юрского возраста скважины Северо-Кетская 1 показывают эволюцию питающих провинций от преобладающей роли раннепалеозойских структур в раннеюрское время к преобладающей роли верхнепалеозойских источников сноса в средне- и позднеюрское время, что связано с процессами мезозойского внутриконтинентального орогенеза юго-восточного обрамления Западно-Сибирского бассейна и южного обрамления Сибирской платформы плиты

вследствие закрытия Палеотетиса и Монголо-Охотского океана.

Увеличение доли мезозойского и палеопротерозойского циркона по мере омоложения рассматриваемых пород связано с процессами тектонической активизации южного обрамления Сибирской платформы в ранней и средней юре. Перенос обломочного материала осуществлялся Пра-Ангарой.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные советы и замечания, позволившие улучшить данную статью.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final version.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Jolivet M., Arzhannikov S.G., Mikheeva E.M., Ivanov A.V., Khubanov V.B., Pavlova L.A., 2020. Late Mesozoic Topographic Evolution of Western Transbaikalia: Evidence for Rapid Geodynamic Changes from the Mongol-Okhotsk Collision to Widespread Rifting. *Geoscience Frontiers* 11 (5), 1695–1709. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.012>.

Arzhannikova A.V., Frolov A.O., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Rubtsova M.N., Jolivet M., Dorozhko A.L., 2018. Jurassic Sediments in the Irkut Basin and Southwestern Transbaikalia: Correlations Based on Paleobotanical and Geochronological Data. *Russian Geology and Geophysics* 59 (6), 620–634. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.05.003>.

Chen L., Liang C., Neubauer F., Liu Y., Zhang Q., Song Zh., 2022. Sedimentary Processes and Deformation Styles of the Mesozoic Sedimentary Succession in the Northern Margin of the Mohe Basin, NE China: Constraints on the Final Closure of the Mongol-Okhotsk Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences* 232, 105052. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105052>.

Demonterova E.I., Ivanov A.V., Mikheeva E.A., Arzhannikova A.V., Frolov A.O., Arzhannikov S.G., Bryanskiy N.V., Pavlova L.A., 2017. Early to Middle Jurassic History of the Southern Siberian Continent (Transbaikalia) Recorded in Sediments of the Siberian Craton: Sm-Nd and U-Pb Provenance Study. *Bulletin de la Société Géologique de France* 188 (1–2), 8. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017009>.

Demonterova E.I., Ivanov A.V., Mikheeva E.A., Arzhannikova A.V., Frolov A.O., Arzhannikov S.G., Bryanskiy N.V., Pavlova L.A., Reznitskii L.Z., Zarubina O.V., 2018. Source Provenance and Paleogeographic Conditions During Deposition of Jurassic Continental Sediments in the Southern Part of the Siberian Platform (Implication of Sm-Nd and U-Pb Data). *Doklady Earth Sciences* 480 (2), 720–724. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060235>.

Devyatov V.P., Nikitenko B.L., Shurygin B.N., 2011. Jurassic Paleogeography of Siberia During Major Changeovers. *News of Paleontology and Stratigraphy* 52 (16–17), 87–101 (in Russian) [Деятов В.П., Никитенко Б.Л., Шурьгин Б.Н. Палеогеография Сибири в юрском периоде на этапах основных перестроек // Новости палеонтологии и стратиграфии. 2011. Т. 52. № 16–17. С. 87–101].

Dickinson W.R., Beard L.S., Brakenridge G.R., Erjavek J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T., 1983. Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Society of America Bulletin* 94 (2), 222–235. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<222:PONAPS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2).

Fedo C.M., Sircombe K.N., Rainbird R.H., 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53 (1), 277–303. <https://doi.org/10.2113/0530277>.

Filippov Yu.F., 2025. Structure and Reconstruction of the Subsidence Dynamics of Potential Oil and Gas Structures of the Pre-Yenisey Sedimentary Basin. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies* 20 (2), 1–25 (in Russian) [Филиппов Ю.Ф. Строение и реконструкция погружений потенциально нефтегазоносных комплексов Предъенисейского осадочного бассейна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2025. Т. 20. № 2. С. 1–25].

Gehrels G., 2009. Analysis Tools. Available from: <https://sites.google.com/a/laserchron.org/laserchron/home> (Last Accessed March 1, 2026).

Gehrels G., Valencia V., Pullen A., 2006. Detrital Zircon Geochronology by Laser Ablation Multicollector ICPMS at the Arizona LaserChron Center. *The Paleontological Society Papers* 12, 67–76. <https://doi.org/10.1017/S108933260001352>.

Ivanov K.S., Erokhin Y.V., Koroteev V.A., 2013. First Data on Early Paleozoic Granitoids in the Basement of West Siberia. *Doklady Earth Sciences* 453 (2), 1193–1196. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13120258>.

Khotylev A.O., Mayorov A.A., Kalmykov G.A., Khudoley A.K., Ershova V.B., Khubanov V.B., Chervyakovskaya M.V., 2021. Granitoid Massifs of the Krasnoleninsky Arch in Western Siberia: Composition, Structure, Age, and Formation Conditions. *Geotectonics* 55 (2), 219–239. <https://doi.org/10.1134/S0016852121020059>.

Khromykh S.V., 2022. Basic and Associated Granitoid Magmatism and Geodynamic Evolution of the Altai Accretion–Collision System (Eastern Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics* 63 (3), 279–299. <https://doi.org/10.2113/RGG20204268>.

Khromykh S.V., Kotler P.D., Kulikova A.V., Semenova D.V., Minnebaev K.R., Gareev B.I., Batalin G.A., Antsiferova T.N.,

Ilicheva E.A., Volosov A.S., 2022. Early Triassic Monzonite–Granite Series in Eastern Kazakhstan as a Reflection of Siberian Large Igneous Province Activity. *Minerals* 12 (9), 1101. <https://doi.org/10.3390/min12091101>.

Kontorovich A.E., Andrushevich V.E., Afanasiev S.A., Vaku- lenko L.G., Danilova V.P., Zlobina O.N., Ilina V.I., Levchuk M.A. et al., 1995. Geology and Conditions of the Formation of the Giant Talinsky Zone of Gas and Oil Accumulation in the Lower Jurassic Continental Deposits (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics* 36 (6), 2–25. <https://doi.org/10.2113/RGG.1995.36.6.2>.

Kosenko I.N., Efremenko V.D., Metelkin E.K., Dzyuba O.S., Shurygin B.N., Kotler P.D., Kulikova A.V., Igolnikov A.E., 2024. First Data on the Age of Zircon Grains from the Upper Mesozoic Leskovo Unit of the Unda–Daya Basin, Eastern Transbaikalia. *Doklady Earth Sciences* 519 (2), 2022–2026. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24603432>.

Kotler P.D., Kulikova A.V., Soloviev A.V., Kirsanov A.M., Minnebaev K.R., Saetgaleeva Ya.Ya., 2025. Provenance of Middle Jurassic–Lower Cretaceous Strata of the Zaozernaya-1 Well: Results of U-Pb Zircon Dating. *Russian Oil and Gas Geology* 6, 143–157 (in Russian) [Котлер П.Д., Куликова А.В., Соловьев А.В., Кирсанов А.М., Миннебаев К.Р., Саетгалева Я.Я. Источники сноса для среднеюрско-нижне- меловых отложений скважины Заозерная-1 по резуль- татам U-Pb-датирования циркона (юго-запад Западной Сибири) // Геология нефти и газа. 2025. № 6. С. 143–157]. DOI:10.47148/0016-7894-2025-6-143-157.

Kuibida M.L., Murzin O.V., Kruk N.N., Safonova I.Y., Sun M., Komiya T., Wong J., Aoki S. et al., 2020. Whole-Rock Geo- chemistry and U-Pb Ages of Devonian Bimodal-Type Rhyo- lites from the Rudny Altai, Russia: Petrogenesis and Tec- tonic Settings. *Gondwana Research* 81, 312–338. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.12.002>.

Maslov A.V., Melnichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V., 2019. Provenance Reconstructions. Article 1. Mineralogical and Petrographic Approaches and Methods. *Lithosphere* 19 (6), 834–860 (in Russian) [Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 1. Минералого-петрогра- фические подходы и методы // Литосфера. 2019. Т. 19. № 6. С. 834–860]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-6-834-860>.

Melnikov P.N. (Ed.), 2022. Map of the Oil and Gas Potent- ial of the Territory of the Russian Federation as of January 1, 2017. Moscow, VNIGNI (in Russian) [Карта нефтега- зоносности территории Российской Федерации по со- стоянию на 01.01.2017 г. / Ред. П.Н. Мельников. М.: ВНИГНИ, 2022].

Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu., Win- gate M.T.D., 2010. Late Mesozoic Tectonics of Central Asia Based on Paleomagnetic Evidence. *Gondwana Research* 18 (2–3), 400–419. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.12.008>.

Mikheeva E.A., 2017. Age Boundaries, Correlation, Sources, and Source Areas of the Jurassic Deposits of the Irkutsk Basin. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 169 p. (in Russian) [Михеева Е.А. Возрастные гра- ницы, корреляция, источники и области сноса юрских

отложений Иркутского бассейна: Дис. ... к. г.-м.н. Иркутск, 2017. 169 с.].

Narkisova V.V., 2018. Report on the Results of Parametric Drilling at the Severo-Ketskaya Area of the Pre-Yenisey Province in Order to Identify New Large Oil and Gas Accumulation Zones. First Stage. Drilling to a Depth of 3500 m. State Contract № 77 of December 26, 2018. SPC Nedra, 283 p. (in Russian) [Наркисова В.В. Отчет о результатах работ по объекту параметрического бурения на Северо-Кетской площади Предъенисейской провинции с целью выявления новых крупных зон нефтегазоаккумуляции. Первый этап. Бурение до глубины 3500 м. Государственный контракт от 26.12.2018 №77. НПП «Недра», 2018. 283 с.].

Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevol'ko P.A., 2011. Stages of Late Proterozoic Magmatism and Periods of Au Mineralization in the Yenisei Ridge. Russian Geology and Geophysics 52 (1), 124–143. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.010>.

Petrov O.V., Shokalsky S.P., Morozov A.F., Pospelov I.I., Kashubdin S.N., Dong S., 2021. Tectonic Model of Northern, Central and Eastern Asia. In: O.V. Petrov, S. Dong (Eds), Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia). Springer, Cham, p. 1–31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1_1.

Priyatkin N.S., Ernst R.E., Khudoley A.K., 2020. A Preliminary Reassessment of the Siberian Cratonic Basement with New U-Pb-Hf Detrital Zircon Data. Precambrian Research 340, 105645. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105645>.

Samsonov A.V., Postnikov V.V., Spiridonov V.A., Larionova Yu.O., Larionov A.N., Travin A.V., Postnikova O.V., Solovyeva N.V., Sabirov I.A., Spiridonov I.V., 2021. Neoarchean Granitoids in the Western Part of the Tunguska Superterrane, Basement of the Siberian Platform: Geochronology, Petrology, and Tectonic Significance. Petrology 29 (5), 449–474. <https://doi.org/10.1134/S0869591121050064>.

Shimansky V.V., Taninskaya N.V., Kolpensкая N.N., 2014. Methodical Aspects of Non-Structural Hydrocarbon Reservoirs Prediction by Example of Jurassic and Cretaceous of Western Siberia. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Section 89 (4), 24–39 (in Russian) [Шиманский В.В., Танинская Н.В., Колпенская Н.Н. Методические аспекты прогноза неструктурных ловушек углеводородов на примере юрско-меловых отложений Западной Сибири // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2014. Т. 89. № 4. С. 24–39].

Shutov V.D., 1967. Classification of Sandstones. Lithology and Mineral Resources 5, 86–103 (in Russian) [Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые. 1967. № 5. С. 86–102].

Smirnova M.E., Panchenko I.V., Kulikov P.Y., Latyshev A.V., Tokmakova A.I., Trushkova J.I., Sapogova E.E., Bakulin A.A., Shmakov V.D., 2024. Structure, Rock Types, and Reservoir Properties of Altered Permian – Triassic Rhyodacites in Grabens of the Frolov Megadepression in Western Siberia. Lithology and Mineral Resources 59 (2), 206–233. <https://doi.org/10.1134/S0024490223700438>.

Smyth H.R., Morton A.C., Richardson N., Scott R.A., 2014. Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production: An Introduction. Geological Society of London Special Publication 386, 1–6. <https://doi.org/10.1144/SP386.21>.

Soloviev A.V., 2008. Investigation of the Tectonic Processes in Convergence Settings of Lithosphere Plates. Nauka, Moscow, 319 p. (in Russian) [Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа. М.: Наука, 2008. 319 с.].

Soloviev A.V., Sobolev P.O., Grushevskaya O.V., Vasileva E.A., Levochskaya D.V., Khisamutdinova A.I., Prokofiev I.N., Shimanskii S.V., Belova M.A., Hourigan J.K., 2023. Evolution of Provenance Areas and Petroleum Potential of Barents Sea Mesozoic Deposits: Dating of Clastic Zircon from Fersmanovskaya-1 Well and Paleogeography Reconstructions. Russian Oil and Gas Geology 3, 105–124 (in Russian) [Соловьев А.В., Соболев П.О., Грушевская О.В., Васильева Е.А., Левочская Д.В., Хисамутдинова А.И., Прокофьев И.Н., Шиманский С.В., Белова М.А., Хоуриган Дж.К. Эволюция источников сноса и нефтегазоносность мезозойских отложений Баренцева моря: датирование обломочных цирконов из скважины Ферсмановская-1 и палеогеографические реконструкции // Геология нефти и газа. 2023. № 3. С. 105–124]. DOI:10.41748/0016-7894-2023-3-105-124.

Timofeev P.P., 1970. The Jurassic Coal-Bearing Formation of Southern Siberia and Its Formation Conditions. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [Тимофеев П.П. Юрская угленосная формация Южной Сибири и условия ее образования. М.: Наука, 1970. 208 с.].

Vakulenko L.G., Aksenov T.P., Yeltsov I.S., Zamirailova A.G., Yan P.A., 2010. A Lithofacies Description of Jurassic Sediments in the South of the Predyensei Petroleum Subprovince, West Siberia. Russian Geology and Geophysics 51 (4), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.03.001>.

Van der Voo R., Van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Spakman W., Torsvik T.H., 2015. Latest Jurassic–Earliest Cretaceous Closure of the Mongol-Okhotsk Ocean: A Paleomagnetic and Seismological-Tomographic Analysis. In: T.H. Anderson, A.N. Didenko, C.L. Johnson, A.I. Khanchuk, J.H. MacDonald (Eds), Late Jurassic Margin of Laurasia: A Record of Faulting Accommodating Plate Rotation. Geological Society of America 513, 589–606. [https://doi.org/10.1130/2015.2513\(19\)](https://doi.org/10.1130/2015.2513(19)).

Varlamov A.I., Afanasenkov A.P., Vitsenovskii M.Yu., Davydenko B.I., Iutina M.M., Kravchenko M.N., Mel'nikov P.N., Poroskun V.I., Skvortsov M.B., Fortunatova N.K., 2018. Status and Ways to Buildup the Hydrocarbon Raw Materials Base in the Russian Federation. Russian Oil and Gas Geology 3, 5–25 (in Russian) [Варламов А.И., Афанасенков А.П., Виценовский М.Ю., Давыденко Б.И., Иутина М.М., Кравченко М.Н., Мельников П.Н., Пороскун В.И., Скворцов М.Б., Фортунатова Н.К. Состояние и пути наращивания сырьевой базы углеводородов в Российской Федерации // Геология нефти и газа. 2018. № 3. С. 5–25]. DOI:10.31087/0016-7894-2018-3-5-25.

Vermeesch P., 2018. IsoplotR: A Free and Open Toolbox for Geochronology. *Geoscience Frontiers* 9 (5), 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.

Vetrov E.V., De Grave J., Vetrova N.I., Zhimulev F.I., Nachtergaele S., Van Ranst G., Mikhailova P.I., 2021. Tectonic Evolution of the SE West Siberian Basin (Russia): Evidence from Apatite Fission Track Thermochronology of Its Exposed Crystalline Basement. *Minerals* 11 (6), 1–22. <https://doi.org/10.3390/min11060604>.

Vorontsov A.A., Fedoseev G.S., Perfilova O.Yu., Travin A.V., 2013. Devonian Volcanism of the Minusinsk Basin: Activity Stages and Relationship to Downwarping of the Continental Lithosphere (Based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Studies). *Doklady Earth Sciences* 448 (1), 25–30. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12100145>.

Vorontsov A.A., Yarmolyuk V.V., Fedoseev G.S., Perfilova O.Yu., Posokhov V.F., Travin A.V., Gazizova T.F., 2015. Differentiated Volcanic Association of the Minusa Trough: Mechanisms of Formation and Sources of Melts, as Exem-

plified by Batenevo Rise. *Petrology* 23 (4), 353–375. <https://doi.org/10.1134/S0869591115040062>.

Yarmoluk V.V., Kozlovsky A.M., Savatenkov V.M., 2026. Tectonic and Magmatic Evolution of the Late Mesozoic–Cenozoic Intraplate Volcanic Province of Central Asia as a Result of Plume–Lithospheric Interaction. *Russian Geology and Geophysics* 67 (1), 7–33. <https://doi.org/10.2113/RGG20254962>.

Zhimulev F.I., Gillespie J., Glorie S., Jepson G., Vetrov E.V., Grave J., 2019. Tectonic History of the Kolyvan–Tomsk Folded Zone (KTFZ), Russia: Insight from Zircon U/Pb Geochronology and Nd Isotopes. *Geological Journal* 55 (3), 1913–1930. <https://doi.org/10.1002/gj.3679>.

Zhimulev F.I., Vetrov E.V., Novikov I.S., Dokashenko S.A., Van Ranst G., Nachtergaele S., De Grave J., 2021. Mesozoic Intracontinental Orogeny in the Tectonic History of the Kolyvan’–Tomsk Folded Zone (Southern Siberia): A Synthesis of Geological Data and Results of Apatite Fission Track Analysis. *Russian Geology and Geophysics* 62 (9), 1006–1020. <https://doi.org/10.2113/RGG20204172>.