

Первые радиоизотопные U–Pb LA-ICP-MS датировки пограничных отложений девона и карбона в доманиковых фациях Камско-Кинельской системы прогибов (Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, Восточно-Европейская платформа)

В.В. Силантьев^{1,2*}, Д.К. Нурғалиев¹, Г.М. Сунгатуллина¹, Д.Н. Мифтахутдинова^{1,2}, А.В. Куликова¹,
Н.Г. Нурғалиева¹, Я.Я. Саеtgалеева¹, А.С. Вандин¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке, Джизак, Узбекистан

Впервые радиоизотопным методом U–Pb LA-ICP-MS датированы цирконы из тонких прослоев вулканического пепла, содержащихся в высокоуглеродистых породах доманиковой фации (нефтематеринские отложения) пограничного интервала девонской и каменноугольной систем. Материал происходит из керна двух скважин, расположенных в осевой и бортовой зонах Камско-Кинельской системы прогибов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. В осевой зоне основание конодонтовой зоны *Siphonodella quadruplicata* имеет конкордантный U–Pb возраст 357.6 ± 1.7 млн лет. В бортовой зоне верхняя часть зоны *Palmatolepis gracilis expansa* имеет конкордантный U–Pb возраст 360.0 ± 1.2 млн лет. Полученные датировки соответствуют, в пределах погрешности анализа, современной хроностратиграфической конодонтовой шкале и позволяют уточнить начало Хангенбергского события в пределах изученного бассейна.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, Камско-Кинельская система прогибов, девон, карбон, доманиковые фации, U–Pb LA-ICP-MS датирование цирконов

Для цитирования: Силантьев В.В., Нурғалиев Д.К., Сунгатуллина Г.М., Мифтахутдинова Д.Н., Куликова А.В., Нурғалиева Н.Г., Саеtgалеева Я.Я., Вандин А.С. (2025). Первые радиоизотопные U–Pb LA-ICP-MS датировки пограничных отложений девона и карбона в доманиковых фациях Камско-Кинельской системы прогибов (Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, Восточно-Европейская платформа). *Георесурсы*, 27(2), с. 297–304. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.2.22>

Введение

Вулканический материал в породах доманиковой фации девона и карбона Волго-Уральской провинции представлен либо пепловыми прослоями (мощностью до 3 см), в которых преобладает вулканическое стекло, либо зеленовато-серыми глинами, либо микролинзами туфогенного материала (Фортулатова и др., 2018, 2023). Имеются работы с детальной микроскопической, рентгенографической, термической характеристиками туфовых прослоев из верхнедевонских и турнейских отложений Муханово-Ероховской впадины Камско-Кинельской системы прогибов (ККСР) (Шакиров и др., 2022). В 2023–2024 гг. были проведены лабораторные исследования

по поиску технологии извлечения минералов тяжелой фракции из туфовых прослоев. Сложность этой работы вызвана тем, что туфовые прослои представляют собой очень твердую породу и имеют толщину, измеряемую первыми миллиметрами, то есть вес пробы, которую можно отобрать, не превышает 3–5 г. Представленные в работе материалы относятся к числу немногих местонахождений, для которых получены прямые радиоизотопные датировки туфов на границе девона и карбона (рис. 1) (Trapp et al., 2004; Liu et al., 2012; Myrow et al., 2014; Ferri et al., 2021; Xu et al., 2024).

Геологическая ситуация. Камско-Кинельская система прогибов (ККСР) существовала с начала франа по конец турне, окаймляя приподнятые карбонатные платформы мелководного бассейна краевой части Восточно-Европейской платформы, примыкавшей к Уральскому океану (Silantiev et al., 2024). Ее впадины заполнялись глинистыми, кремнистыми и карбонатными осадками с высоким содержанием органического вещества.

* Ответственный автор: Владимир Владимирович Силантьев
e-mail: vsilant@gmail.com

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Рис. 1. Основные разрезы, в которых датирован пограничный интервал девона и карбона: 1 – западная Канада (Ferri et al., 2021), 2 – Германия (Trapp et al., 2004), 3 – Польша (Mugow et al., 2014), 4 – Южный Китай (Liu et al., 2012; Xu et al., 2024), 5 – Восточно-Европейская платформа (данная статья); палеогеографическая карта дана с упрощением по свободным ресурсам Р. Блэки (Deep Time Maps; <https://deeptimemaps.com/map-lists-thumbnails/global-series/>).

В отечественной геологии отложения с высоким содержанием органического вещества, выполняющие прогибы ККСП, известны под названиями доманикиты (5–25% C_{org}) и доманикоиды (менее 5% C_{org}) и имеют обобщенное наименование – доманиковые породы (фаии). Хорошая сохранность пепловых прослоев в этих породах обусловлена условиями их формирования – относительной глубоководностью бассейна (ниже уровня штормовых волн), удаленностью от областей сноса, малым привносом терригенного материала.

Материал

Прослой вулканического пепла встречаются в двух скважинах, вскрывших пограничный интервал девонской и каменноугольной систем в осевой (скв. 1) и бортовой (скв. 2) зонах Нижнекамского сегмента ККСП. Стратиграфическая разбивка скважин обоснована детальным изучением комплексов конодонтов (Сунгатуллина и др., 2025), описание разрезов и биофаии будет опубликовано в отдельной статье (Силантьев и др., 2025, в печати).

Прослой пепла толщиной 3–4 мм сложены твердым прочным сильно уплотненным витрокластическим материалом (рис. 2), хорошо выделяющимся на общем темном фоне вмещающей породы светлой желтовато-серой окраской, люминесцирующей при ультрафиолетовом освещении. Образец весом 3–5 г содержит 60–100 идиоморфных зерен циркона, пригодных для датирования.

Методы

Пробоподготовка. Пепловый прослой выпиливался из керна. Получившаяся пластинка весом 3–5 г дробилась

на кусочки размером 3x5 мм и помещалась на 24 часа в деметилсульфоксид ($(CH_3)_2SO$) при температуре 50 °C при постоянном перемешивании. После этого проба обрабатывалась точечным ультразвуковым излучателем (25 кГц) в течение 8 часов. Процедура повторялась от 20 до 26 раз до полной дезинтеграции первоначальной породы. Далее навеска помещалась в тяжелую жидкость ГПС-В (концентрированный водный раствор гетерополивольфрамата натрия; плотность 3,00 г/мл). Отдельные зерна цирконов выделялись из тяжелой фракции вручную под бинокулярным микроскопом ZEISS Stemi DV4 (Германия).

Радиоизотопное датирование методом LA-ICP-MS.

Датирование цирконов методом LA-ICP-MS было проведено в Научно-образовательном центре Геотермохронологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Для проведения U–Pb-датирования цирконов использовалась система лазерной абляции на основе эксимерного лазера (длина волны 193 нм) Analyte Excite (Teledyne Cetac Technologies, США), соединенная с квадрупольным масс-спектрометром с ионизацией в индуктивно-связанной плазме iCAP Qc (ThermoScientific, Германия).

Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(Pb+Hg)$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения 2.5–3.0 Дж/см².

Анализ проводился по следующей схеме: в начале и в конце сессии измерений выполнялось по три и два измерения двух стандартов (внешнего и контрольного) соответственно. Использовались международные эталонные

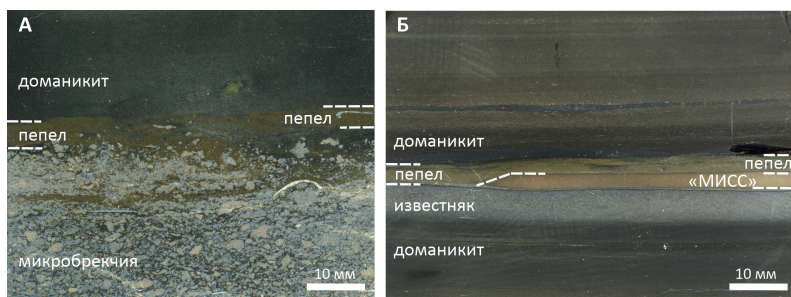


Рис. 2. Прослой вулканического пепла: (А) – скв. 2, зона *Palmatolepis gracilis expansa*; (Б) – скв. 1, зона *Siphonodella quadruplicata*; белый пунктир ограничивает пепловые прослой; «МИСС» – микробактериально индуцированные седиментационные структуры.

образцы цирконов: Plešovice – внешний стандарт (337 млн лет) (Slama et al., 2008) и 91500 – контрольный образец (1065 млн лет) (Weidenbeck et al., 1995). Далее через каждые десять измерений проводилось по одному измерению внешнего и контрольного стандартов. По внешнему стандарту проводилась коррекция на фракционирование элементов при лазерном испарении, дискриминацию масс и дрейф настроек масс-спектрометра во времени. Контрольный образец измерялся для проверки правильности измерений. Также в начале, в середине и в конце сессии дополнительно измерялось стандартное синтетическое стекло NIST SRM 612 для учета чувствительности масс-спектрометра.

Обработка масс-спектрометрических данных, учет коррекций, выбор оптимального участка сигнала, расчет изотопных отношений ($^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$) и соответствующих возрастов проводился с помощью программы Iolite 3.65, встроенной в Igor Pro 7 (Paton et al., 2010). Построение диаграмм с конкордией и графики плотностных вероятностей выполнялись в Isoplot 4.15 (Ludwig, 2003). Диаграммы с конкордией построены по возрастам, рассчитанным по изотопным отношениям $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Измерения, где дискордантность составляла $<-5\%$ или $>5\%$, исключались из выборки (в Приложении «Возраст отдельных зерен циркона, определенный методом LA-ICP-MS» эти значения зачеркнуты: <https://www.geors.ru/jour/article/view/562>).

Результаты и обсуждение

Тяжелая фракция светлых минералов изученных туфовых прослоев на 50–90% состоит из циркона (ZrSiO_4), из которых 80–85% – идиоморфные кристаллы без признаков окатанности и переноса (рис. 3). Зерна цирконов представлены призматическими и короткопризматическими кристаллами размером от 50 до 175 мкм по длинной оси. На катодоллюминесцентных снимках кристаллы характеризуются осцилляторной зональностью, а отношения Th/U варьируют от 0.39 до 1.3, что свидетельствует об их магматическом генезисе (Corfu et al., 2003; Wu, Zheng, 2004).

В бортовой зоне (скв. 2) для пеплового прослоя из верхней части зоны *Palmatolepis gracilis expansa* получен возраст 360.0 ± 1.2 млн лет (датировано 52 зерна). В осевой зоне (скв. 1) для пеплового прослоя в основании конодонтовой зоны *Siphonodella quadruplicata* получен конкордантный возраст 357.6 ± 1.7 млн лет (датировано 30 зерен) (рис. 4, 5).



Рис. 3. Фотографии цирконов из туфового прослоя скв. 2, зона *Palmatolepis gracilis expansa*.

Полученные датировки соответствуют, в пределах погрешности анализа, современной хроностратиграфической шкале конодонтовых зон и ограничивают начало Хангенбергского события в изученном бассейне возрастом 360.0 ± 1.2 млн лет, что в целом, совпадает с современными глобальными данными (Davydov et al., 2012; Becker et al., 2020; International Chronostratigraphic Chart, 2024).

Обсуждение

Хронологическая калибровка девонского периода опирается на совмещение высокоточных U–Pb CA-ID-TIMS датировок цирконов из туфов и детальной конодонтовой зональной стратиграфии. Этот подход позволяет не только уточнять абсолютный возраст границ веков, но и рассчитывать длительность отдельных биозон с разрешением до 0.6 млн лет. Специальные исследования (Kaufmann, 2006; Harrigan et al., 2022), предлагают детальные «био-хронометрические» шкалы, в которых каждая конодонтовая зона увязана с радиоизотопным (численным) возрастом.

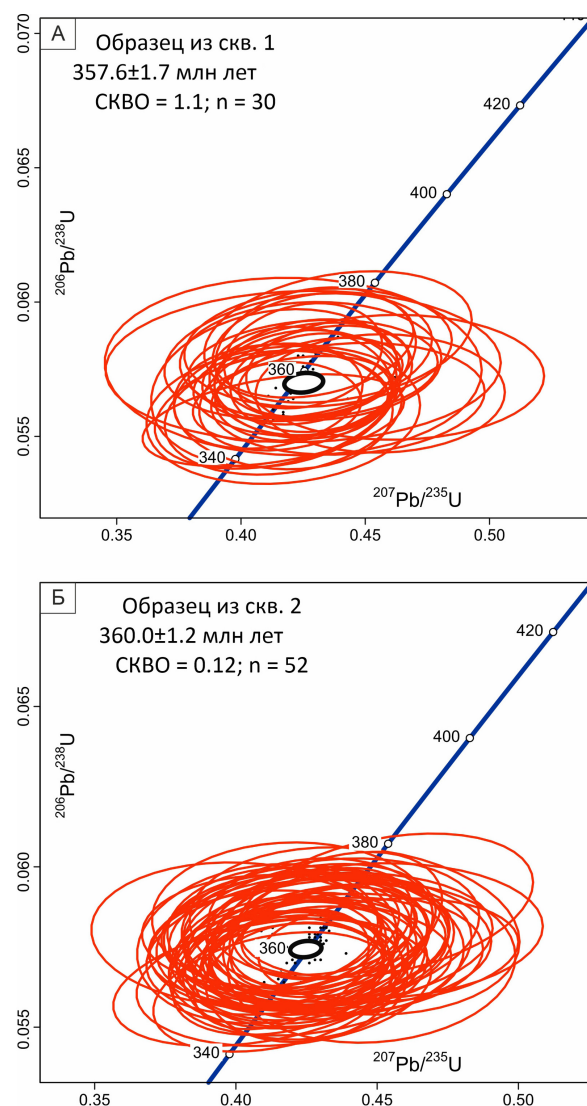


Рис. 4. Графики конкордантных значений радиоизотопных анализов: (А) – образец из скв. 1, (Б) – образец из скв. 2; эллипсы соответствуют погрешностям определений отношений для каждого зерна $\pm 2\sigma$; Сокращения: СКВО – средний квадрат взвешенных отклонений; n – количество датированных зерен циркона.

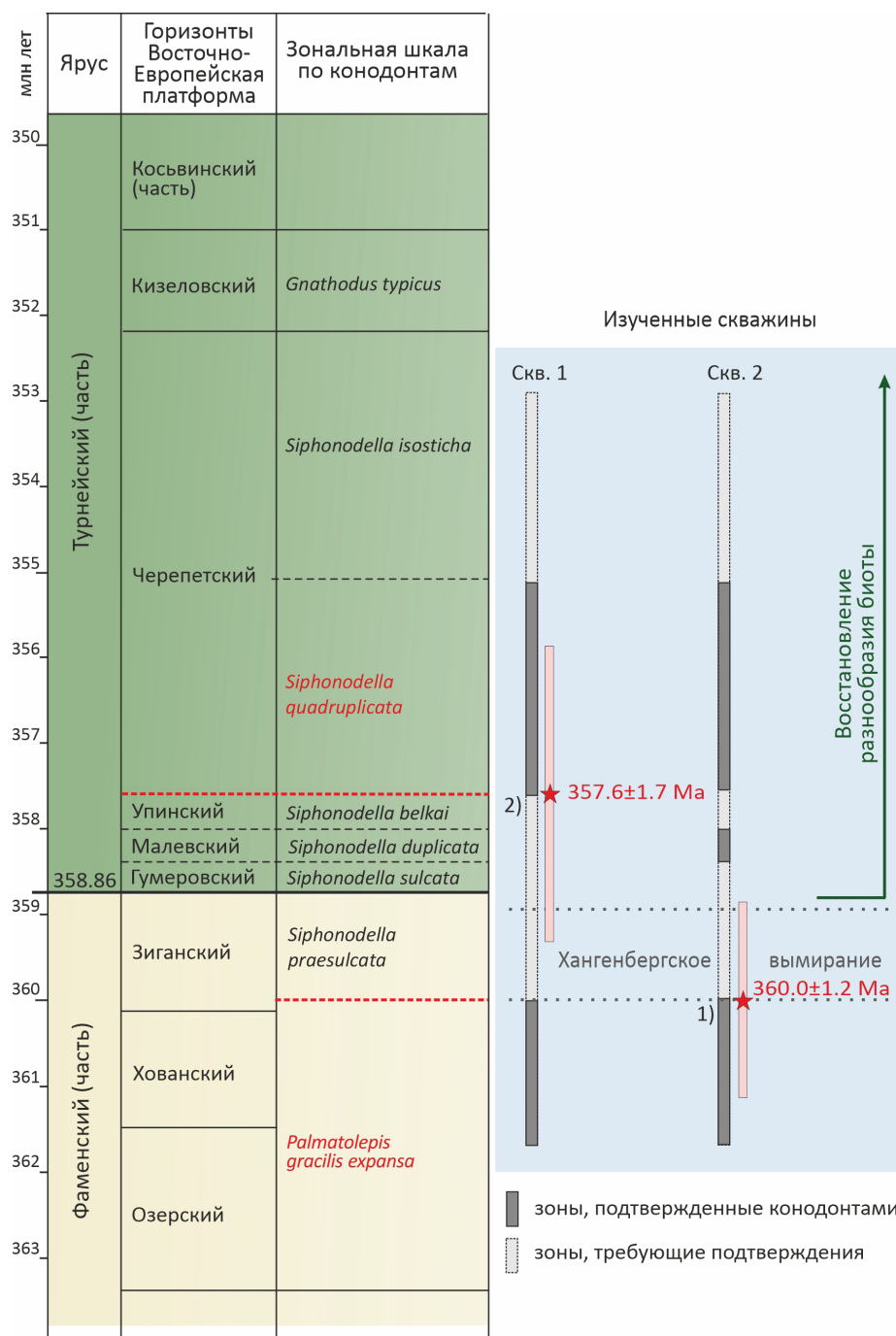


Рис. 5. Радиоизотопные U–Pb LA-ICP-MS датировки изученных проб и их положение в скважинах; звездочки обозначают датировки, розовые прямоугольники – доверительный интервал; датировка границы девона и карбона дана по (International Chronostratigraphic Chart, 2024); зональная шкала по конодонтам дана по (Alekseev et al., 2022; Aretz et al., 2020; Becker et al., 2020).

Радиоизотопный возраст границы девона и карбона впервые был рассчитан как 360.7 ± 0.7 млн лет методом интерполяции по серии U–Pb ID-TIMS измерений цирконов из туфовых прослоев турнейской части разреза Хасельбахталь (Hasselbachtal) в Германии и верхнефаменских разрезов Западной Канады формации Экшюу (Exshaw) (Trapp et al., 2004). После этого возраст границы постепенно омолаживался. В издании «Geological Time Scale 2020» возраст этой границы определен как 359.3 ± 0.3 млн лет (Becker et al., 2020) и обоснован дополнительными данными из Южного Китая (Liu et al., 2012; Xu et al., 2024). Последняя версия Международной хроностратиграфической таблицы определяет возраст

границы девона и карбона равным 358.86 ± 0.19 млн лет (International Chronostratigraphic Chart, 2024).

Стратиграфическое положение пепловых вулканических прослоев в разных регионах мира показывает, что они сохраняются как в карбонатных фациях, например, разрез Hasselbachtal, Германия (Trapp et al., 2004), разрез Мухуа (Muhua II), Южный Китай (Xu et al., 2024), так и в доманиковых фациях, например, разрезы формации Exshaw, Западная Канада (Ferri et al., 2021; Kabanov, 2022); разрез Дапушан (Daposhang), Южный Китай (Liu et al., 2012; Xu et al., 2024), разрез Ковала (Kowala), Польша (Myrow et al., 2014; Davydov, 2020).

На территории Западной Канады пограничные отложения девона и карбона датированы по туфовым прослоям, обнаруженным в составе формации Exshaw. Эта формация сложена ритмично слоистыми темно-серыми алевроитистыми и аргиллитовыми сланцами с высоким содержанием органического углерода, весьма напоминающими породы ККСП. В бассейне Лиард (Ferri et al., 2021) в нижней части этой формации находятся три туфовых горизонта, датированные методом U–Pb CA-ID-TIMS и имеющие возраст – 364.35 ± 0.26 , 364.03 ± 0.31 и 363.07 ± 0.25 млн лет, что соответствуют позднему фамену. В разрезе Юра-Крик (Jura Creek) (Kabanov, 2022), где зафиксирована мощность Exshaw около 9 м, туфовый прослой (~360 млн лет) обнаружен в нижней толще, в интервале интенсивной аноксии, интерпретируемой как эквивалент события Hangenberg.

В разрезе Hasselbachtal (Германия) два туфа (Bed 79 и Bed 70) зафиксированы в интервале конодонтовых зон *Siphonodella sulcata* и *S. duplicata*, с возрастными 360.5 ± 0.8 и 360.2 ± 0.7 млн лет (Trapp et al., 2004). В разрезе Daposhang (Южный Китай) возраст слоя E, который интерпретируется как пиковая фаза события Hangenberg, составил 360.47 ± 0.68 млн лет (Xu et al., 2024). В разрезе Kowala (Польша) три туфовых слоя, подстилающих и перекрывающих пачку Хангенбергских черных сланцев (Hangenberg Black Shale) имеют возраста 359.97 ± 0.46 , 358.97 ± 0.11 и 358.89 ± 0.20 млн лет (Mugow et al., 2014), соответствуя позднему фамену. Во всех рассмотренных регионах исследователи пытаются увязать радиоизотопные датировки с конодонтовыми зонами, для того чтобы обосновать стратиграфические границы по нескольким признакам.

Важная особенность пепловых вулканических прослоев, встреченных в изученных скважинах, – высокое содержание идиоморфных кристаллов цирконов на единицу объема. Это позволяет выделять достаточное количество (несколько десятков и первые сотни) кристаллов, пригодных для радиометрического датирования, из прослоев мощностью в первые миллиметры, встреченных в керне скважин. Аналогичные результаты получены для нефтематеринских пород пограничного интервала ордовика и силура Южного Китая (Du et al., 2020, 2021), а также для пограничного интервала юры и мела (баженовская свита) Западной Сибири (Rogov et al., 2023).

Радиоизотопный возраст 357.6 ± 1.7 млн лет, полученный для пеплового прослоя из основания зоны *S. quadruplicata*, хорошо согласуется с глобальными данными (Aretz et al., 2020), подтверждая небольшую (примерно по 0.5 млн лет) длительность конодонтовых зон *S. sulcata* и *S. duplicata* – базальных зон турнейского яруса. Можно предположить, что аналогичную продолжительность имеет зона *S. belkai*, наличие которой в изученных разрезах требует дополнительного обоснования.

Каждой из рассмотренных выше конодонтовых зон – *S. sulcata*, *S. duplicata* и *S. belkai*, отвечают региональные горизонты, соответственно – гумеровский, малевский и упинский (Alekseev et al., 2022), продолжительность которых аналогична продолжительности зон. За такое время (около 0.5 млн лет) в глубоководных бескислородных обстановках могли сформироваться осадки мощностью (после диагенеза и уплотнения) всего лишь 2.5–5 м

(De Vleeschouwer et al., 2013). То есть, стратиграфический интервал, включающий все три горизонта – гумеровский, малевский и упинский, может быть представлен в разрезах ККСП толщей мощностью от 7.5 до 15 м.

Заключение

Впервые для доманиковых фаций Восточно-Европейской платформы получены прямые радиоизотопные датировки туфов пограничного интервала девона и карбона методом U–Pb LA-ICPMS. Полученные значения 360.0 ± 1.2 и 357.6 ± 1.7 млн лет хорошо согласуются с Международной хроностратиграфической шкалой и глобальными данными по Хангенбергскому биотическому событию. Эти результаты уточняют возрастные границы конодонтовых зон и демонстрируют применимость метода LA-ICPMS для датирования миллиметровых туфовых прослоев в нефтематеринских толщах. Работа открывает перспективы создания хронологического каркаса нефтематеринских (доманиковых) отложений девона и раннего карбона Восточной Европы на основе совместных биостратиграфических (конодонты) и радиоизотопных исследований.

Дополнительные материалы

Приложение «Возраст отдельных зерен циркона, определенный методом LA-ICP-MS» расположено по адресу: <https://www.geors.ru/jour/article/view/562>.

Финансирование/Благодарности

Работа частично выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору А.С. Алексееву (МГУ имени М.В. Ломоносова) и члену-корреспонденту РАН А.С. Бякову, чьи замечания и предложения значительно повысили научное качество данной статьи.

Литература

- Силантьев В.В., Мифтахутдинова Д.Н., Сунгатуллина Г.М., Сафаров А.Ф., Валидов М.Ф., Ганиев Б.Г., Шуматбаев К.Д., Хабилов Р.М., Базаревская В.Г., Судаков В.А., Нургалеева Н.Г., Дуглав Ю.А., Вандин А.С., Драздова А.В., Рогов А.М. (2025). Модель накопления осадков с высоким содержанием органического вещества в Камско-Кинельской системе прогибов на рубеже девона и карбона (Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, Восточно-Европейская платформа): биофации, условия и скорость накопления. *Георесурсы*, 27(4). (В печати)
- Сунгатуллина Г.М., Силантьев В.В., Мифтахутдинова Д.Н., Сафаров А.Ф., Валидов М.Ф., Ганиев Б.Г., Шуматбаев К.Д., Хабилов Р.М. (2025). Первые данные по изучению пограничных девонско-каменноугольных конодонтов в депрессионных отложениях Камско-Кинельской системы прогибов Восточно-Европейской платформы (Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, Сарайлинская впадина). *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*, 167(1), с. 130–153. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.130-153>
- Фортунова Н.К., Зайцева Е.Л., Кононова Л.И., Баранова А.В., Бушуева М.А., Михеева А.И., Афанасьева М.С., Обуховская Т.Г. (2018). Литолого-фациальная и биостратиграфическая характеристика верхнедевонских отложений опорной скважины 1 Мелекесская (Мелекесская впадина, Волго-Уральская область). *Бюллетень МОИП, Отдел геологический*, 93(5–6), с. 3–49.
- Фортунова Н.К., Зайцева Е.Л., Бушуева М.А., Ермолова Т.Е., Михеева А.И., Ступак А.А., Баранова А.В., Кононова Л.И., Мамонтов Д.А., Харченко С.И., Авдеева А.А., Канев А.С., Евдокимов Н.В., Шишкина Т.Ю., Володина А.Г., Холмянская Н.Ю., Кравченко М.С.,

Афанасьева М.С., Евдокимова И.О. (2023). Стратиграфия нижнего карбона Волго-Уральского субрегиона (материалы к актуализации стратиграфической схемы). Под ред. Н.К. Фортунатовой. М.: ВНИГНИ, 288 с.

Шакиров В.А., Вилесов А.П., Морозов В.П., Хаюшкин А.С., Андрушкевич О.Ю., Сосновская Е.Б., Немков И.П., Лопатин А.П., Гиляев Г.Г. (2022). Породы-вулканиты в конденсированных доманиковых фациях Муханово-Ероховской внутришельфовой впадины. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 2(362), с. 14–26. [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-2\(362\)-14-26](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-2(362)-14-26)

Alekseev A.S., Nikolaeva S.V., Goreva N.V., Donova N.B., Kossovaya O.L., Kulagina E.I., Kicheva N.A., Kurilenko A.V., Kutugin R.V., Popeko L.I., Stepanova T.I. (2022). Russian regional Carboniferous stratigraphy. *Geological Society Special Publication*, 512, pp. 49–117. <https://doi.org/10.1144/SP512-2021-134>

Aretz M., Herbig H.-G., Wang X.D., Gradstein F.M., Agterberg F.P., Ogg J.G. (2020). The Carboniferous period, in Gradstein J.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (eds.). *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam: Elsevier, pp. 811–874. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00023-1>

Becker T.R., Marshall J.E.A., Da Silva A.C., Agterberg F.P., Gradstein F.M., Ogg J.G. (2020). The Devonian Period, in Gradstein J.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (eds.). *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam: Elsevier, pp. 733–810. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>

Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W., Kinny P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), pp. 469–500.

Davydov V.I. (2020). Shift in the Paradigm for GSSP Boundary Definition. *Gondwana Research*, 86, pp. 266–286. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.005>

Davydov V.I., Korn D., Schmitz M.D. (2012). The Carboniferous Period, in: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M. (eds.). *The Geologic Time Scale 2012*, Vol. 2, Elsevier, Oxford, 603–651. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00023-8>

De Vleeschouwer D., Rakocinski M., Racki G., Bond D.P.G., Sobien K., Claeys P. (2013). The astronomical rhythm of Late-Devonian climate change (Kowala section, Holy Cross Mountains, Poland). *Earth and Planetary Science Letters*, 365, pp. 25–37.

Deep Time Maps (2020). Paleozoic 360 Ma Moll Dev. <https://deeptimemaps.com/map-lists-thumbnails/global-series/>

Du X., Lu Y., Duan D., Liu Z., Zhao K., Jia J., Fu, H. (2020). Was volcanic activity during the Ordovician–Silurian transition in South China part of a global phenomenon? Constraints from zircon U–Pb dating of volcanic ash beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 114, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104209>

Du X., Jia J., Zhao K., Shi J., Shu Y., Liu Z., Duan D. (2021). Was the volcanism during the Ordovician–Silurian transition in South China actually global in extent? Evidence from the distribution of volcanic ash beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104721. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104721>

Ferri F., McMechan M., Richards B., Friedman R. (2021). Organic-Rich Upper Devonian Shales of the Patry and Exshaw Formations (Besa River Group) in the Subsurface of Liard Basin. *British Columbia Geological Survey Paper*, 42 p. https://cmscontent.nrs.gov.bc.ca/geoscience/PublicationCatalogue/Paper/BCGS_P2021-02.pdf

Harrigan C.O., Schmitz M.D., Over D.J., Traylor R.B., Davydov V.I. (2022). Recalibrating the Devonian Time Scale: A New Method for Integrating Radioisotopic and Astrochronologic Ages in a Bayesian Framework. *Bulletin of the Geological Society of America*, 134 (7–8), pp. 1931–1948. <https://doi.org/10.1130/B36128.1>

International Chronostratigraphic Chart (2024). <https://stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2024-12.pdf>

Kabanov P.B. (2022). Jura Creek field trip: the drowning unconformity and anoxic sediments at the Devonian–Carboniferous boundary, Alberta. Geological Survey of Canada. Open File 8922. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/mcan-nrcan/m183-2/M183-2-8922-eng.pdf

Kaufmann B. (2006). Calibrating the Devonian Time Scale: A Synthesis of U–Pb ID-TIMS Ages and Conodont Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 76 (3–4), pp. 175–90. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.01.001>

Liu Y.Q., Ji Q., Kuang H.W., Jiang X.J., Xu H., Peng N. (2012). U–Pb Zircon Age, Sedimentary Facies, and Sequence Stratigraphy of the Devonian–Carboniferous Boundary, Daposhang Section, Guizhou, China. *Palaeoworld* 21(2), pp. 100–107. <https://doi.org/10.1016/J.PALWOR.2012.03.001>

Ludwig K.R. (2003). User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *BGC Special Publication*, 4, 72 p.

Myrow P.M., Ramezani J., Hanson A.E., Bowring S.A., Racki G., Rakocinski M. (2014). High-Precision U–Pb Age and Duration of the Latest Devonian (Famennian) Hangenberg Event, and Its Implications. *Terra Nova* 26(3), pp. 222–229. <https://doi.org/10.1111/ter.12090>

Paton Ch., Woodhead J.D., Hellstrom J.C., Herg J.M., Greig A., Maas R. (2010). Improved laser ablation U–Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3), pp. 1–36.

Rogov M.A., Panchenko I.V., Augland L.E., Ershova V.B., Yashunsky V.Y. (2023). The First CA-ID-TIMS U–Pb Dating of the Tithonian/Berriasian Boundary Beds in a Boreal Succession. *Gondwana Research*, 118, pp. 165–73. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.02.010>

Silantiev V.V., Miftakhutdinova D.N., Nurgalieva N.G. (2024). From Siliciclastics to Carbonates and Black shales: Deciphering Sedimentary Continuity and Discontinuity in the Devonian Landscapes of the Volga-Ural Petroleum Province. *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp. 62–82. <https://doi.org/10.18559/grs.2024.4.1>

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008). Plesovice zircon – a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2), pp. 1–35.

Trapp E., Kaufmann B., Mezger K., Korn D., Weyer D. (2004). Numerical Calibration of the Devonian–Carboniferous Boundary: Two New U–Pb Isotope Dilution–Thermal Ionization Mass Spectrometry Single-Zircon Ages from Hasselbachtal (Sauerland, Germany). *Geology*, 32(10), pp. 857–860. <https://doi.org/10.1130/G20644.1>

Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995). Three Natural Zircon Standards for U–TH–PB, LU–HF, Trace Element and Ree Analyses. *Geostandards Newsletters*, 19(1), pp. 1–23.

Wu Y., Zheng Y. (2004). Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49, pp. 1554–1569. <https://doi.org/10.1007/BF03184122>

Xu J., Hou H., Ramezani J., Fang Q., Zhang S., Yang T., Chu Z., Wu H. (2024). Geochronological Constraints on the Hangenberg Event of the Latest Devonian in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 642, 112147. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2024.112147>

Сведения об авторах

Владимир Владимирович Силантьев – доктор геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет; профессор, Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Данис Карлович Нурғалиев – доктор геол.-минерал. наук, профессор, проректор по направлениям нефтегазовых технологий, природопользования и наук о Земле, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Danis.Nourgaliyev@kpfu.ru

Гузаль Марсовна Сунгатуллина – кандидат геол.-минерал. наук, доцент кафедры палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Guzel.Sungatullina@kpfu.ru

Динара Надировна Мифтахутдинова – кандидат геол.-минерал. наук, старший преподаватель кафедры палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет; доцент, Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

Анна Викторовна Куликова – кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник НОЦ Геотермохронологии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, Кремлевская, д. 18
e-mail: Ak_Cool@mail.ru

Нурия Гавазовна Нурғалиева – доктор геол.-минерал. наук, профессор кафедры геологии нефти и газа, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Nouria.Nourgalieva@kpfu.ru

Яна Ягфаровна Саётгалиева – инженер кафедры палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: YYSaetgaleeva@kpfu.ru

Артём Сергеевич Вандин – студент, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18
e-mail: Artem.Vandin@kpfu.ru

Статья поступила в редакцию 16.05.2025;
Принята к публикации 20.06.2025; Опубликовано 30.06.2025

IN ENGLISH

SHORT COMMUNICATION

First U–Pb LA-ICP-MS Radioisotopic Ages of the Devonian–Carboniferous Boundary Black Shales (Domanik Facies) in the Kama–Kinel Trough System, Volga–Ural Petroleum Province, East European Platform

V.V. Silantiev^{1,2*}, D.K. Nurgaliev¹, G.M. Sungatullina¹, D.N. Miftakhutdinova^{1,2}, A.V. Kulikova¹, N.G. Nourgalieva¹, Ya.Ya. Saetgaleeva¹, A.S. Vandin¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²Kazan Federal University, Branch in Jizzakh, Jizzakh, Republic of Uzbekistan

*Corresponding author: Vladimir V. Silantiev, e-mail: vsilant@gmail.com

Abstract. For the first time, zircons from thin volcanic ash layers contained within organic-rich black shales (Domanik facies) at the Devonian–Carboniferous boundary have been dated using the U–Pb LA-ICP-MS method. The studied material comes from core samples of two boreholes located in the axial and marginal zones of the Kama–Kinel Trough System within the Volga–Ural Petroleum Province. In the axial zone, the base of the *Siphonodella quadruplicata* conodont zone yielded a concordant U–Pb age of 357.6 ± 1.7 Ma. In the marginal zone, the upper part of the *Palmatolepis gracilis expansa* Zone provided a concordant U–Pb age of 360.0 ± 1.2 Ma. These ages agree, within analytical uncertainty, with the current conodont-based chronostratigraphic framework and allow refinement of the onset of the Hangenberg Event in the studied basin.

Keywords: East European Platform, Kama–Kinel Trough System, Devonian, Carboniferous, black shales, Domanik facies, U–Pb LA-ICPMS zircon dating

Recommended citation: Silantiev V.V., Nurgaliev D.K., Sungatullina G.M., Miftakhutdinova D.N., Kulikova A.V., Nourgalieva N.G., Saetgaleeva Ya.Ya., Vandin A.S. (2025). First U–Pb LA-ICP-MS Radioisotopic Ages of the Devonian–Carboniferous Boundary Black Shales (Domanik Facies) in the Kama–Kinel Trough System, Volga–Ural Petroleum Province, East European Platform. *Georesursy = Georesources*, 27(2), pp. 297–304. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.2.22>

Acknowledgements

This work was partly funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project No. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities.

We would like to express our sincere gratitude to Professor Alexander S. Alekseev (Lomonosov Moscow State University) and Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Alexander S. Biakov, whose comments and suggestions have significantly enhanced the scientific quality of this article.

References

- Alekseev A.S., Nikolaeva S.V., Goreva N.V., Donova N.B., Kossovaya O.L., Kulagina E.I., Kicheva N.A., Kurilenko A.V., Kutugin R.V., Popeko L.I., Stepanova T.I. (2022). Russian regional Carboniferous stratigraphy. *Geological Society Special Publication*, 512, pp. 49–117. <https://doi.org/10.1144/SP512-2021-134>
- Aretz M., Herbig H.-G., Wang X.D., Gradstein F.M., Agterberg F.P., Ogg J.G. (2020). The Carboniferous period, in Gradstein J.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (eds.). *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam: Elsevier, pp. 811–874. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00023-1>
- Becker T.R., Marshall J.E.A., Da Silva A.C., Agterberg F.P., Gradstein F.M., Ogg J.G. (2020). The Devonian Period, in Gradstein J.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (eds.). *Geologic Time Scale 2020*. Amsterdam: Elsevier, pp. 733–810. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>
- Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W., Kinny P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), pp. 469–500.
- Davydov V.I. (2020). Shift in the Paradigm for GSSP Boundary Definition. *Gondwana Research*, 86, pp. 266–286. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.005>
- Davydov V.I., Korn D., Schmitz M.D. (2012). The Carboniferous Period, in: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M. (eds.). *The Geologic Time Scale 2012*, Vol. 2, Elsevier, Oxford, 603–651. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00023-8>
- De Vleeschouwer D., Rakocinski M., Racki G., Bond D.P.G., Sobien K., Claeys P. (2013). The astronomical rhythm of Late-Devonian climate change (Kowala section, Holy Cross Mountains, Poland). *Earth and Planetary Science Letters*, 365, pp. 25–37.
- Deep Time Maps (2020). Paleozoic 360 Ma Moll Dev. <https://deeptimemaps.com/map-lists-thumbnails/global-series/>
- Du X., Lu Y., Duan D., Liu Z., Zhao K., Jia J., Fu, H. (2020). Was volcanic activity during the Ordovician–Silurian transition in South China part of a global phenomenon? Constraints from zircon U–Pb dating of volcanic ash

beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 114, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104209>

Du X., Jia J., Zhao K., Shi J., Shu Y., Liu Z., Duan D. (2021). Was the volcanism during the Ordovician–Silurian transition in South China actually global in extent? Evidence from the distribution of volcanic ash beds in black shales. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104721. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104721>

Ferri F., McMechan M., Richards B., Friedman R. (2021). Organic-Rich Upper Devonian Shales of the Patry and Exshaw Formations (Besa River Group) in the Subsurface of Liard Basin. *British Columbia Geological Survey Paper*, 42 p. https://cmscontent.nrs.gov.bc.ca/geoscience/PublicationCatalogue/Paper/BCGS_P2021-02.pdf

Fortunatova N.K., Zaitseva E.L., Kononova L.I., Baranova A.V., Bushueva M.A., Mikheeva A.I., Afanasyeva M.S., Obukhovskaya T.G. (2018). Lithological-facies and biostratigraphic characteristics of Upper Devonian deposits in the 1 Melekesskaya Reference Borehole (Melekess Depression, Volga–Ural region). *Bulletin MOIP. Geological Series*, 93(5–6), pp. 3–49. (In Russ.)

Fortunatova N.K., Zaitseva E.L., Bushueva M.A., Ermolova T.E., Mikheeva A.I., Stupak A.A., Baranova A.V., Kononova L.I., Mamontov D.A., Kharchenko S.I., Avdeeva A.A., Kanev A.S., Evdokimov N.V., Shishkina T.Yu., Volodina A.G., Kholmyanskaya N.Yu., Kravchenko M.S., Afanasyeva M.S., Evdokimova I.O. (2023). Stratigraphy of the Lower Carboniferous of the Volga–Ural Subregion. Moscow: VNIGNI, 288 p. (In Russ.)

Harrigan C.O., Schmitz M.D., Over D.J., Trayler R.B., Davydov V.I. (2022). Recalibrating the Devonian Time Scale: A New Method for Integrating Radioisotopic and Astrochronologic Ages in a Bayesian Framework. *Bulletin of the Geological Society of America*, 134 (7–8), pp. 1931–1948. <https://doi.org/10.1130/B36128.1>

International Chronostratigraphic Chart (2024). <https://stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2024-12.pdf>

Kabanov P.B. (2022). Jura Creek field trip: the drowning unconformity and anoxic sediments at the Devonian–Carboniferous boundary, Alberta. Geological Survey of Canada. Open File 8922. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/rncan-nrcan/m183-2/M183-2-8922-eng.pdf

Kaufmann B. (2006). Calibrating the Devonian Time Scale: A Synthesis of U–Pb ID-TIMS Ages and Conodont Stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 76 (3–4), pp. 175–90. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.01.001>

Liu Y.Q., Ji Q., Kuang H.W., Jiang X.J., Xu H., Peng N. (2012). U–Pb Zircon Age, Sedimentary Facies, and Sequence Stratigraphy of the Devonian–Carboniferous Boundary, Daposhang Section, Guizhou, China. *Palaeoworld* 21(2), pp. 100–107. <https://doi.org/10.1016/J.PALWOR.2012.03.001>

Ludwig K.R. (2003). User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *BGC Special Publication*, 4, 72 p.

Myrow P.M., Ramezani J., Hanson A.E., Bowring S.A., Racki G., Rakociński M. (2014). High-Precision U–Pb Age and Duration of the Latest Devonian (Famennian) Hangenberg Event, and Its Implications. *Terra Nova* 26(3), pp. 222–229. <https://doi.org/10.1111/ter.12090>

Paton C., Woodhead J.D., Hellstrom J.C., Herg J.M., Greig A., Maas R. (2010). Improved laser ablation U–Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3), pp. 1–36.

Rogov M.A., Panchenko I.V., Augland L.E., Ershova V.B., Yashunsky V.Y. (2023). The First CA-ID-TIMS U–Pb Dating of the Tithonian/Berriasian Boundary Beds in a Boreal Succession. *Gondwana Research*, 118, pp. 165–73. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.02.010>

Shakirov V.A., Vilesov A.P., Morozov V.P., Khayuzkin A.S., Andrushkevich O.Yu., Sosnovskaya E.B., Nemkov I.P., Lopatin A.P., Gilaev G.G. (2022). Volcaniclastic rocks in condensed Domanik facies of the Mukhanovo–Erokhovo intrashelf depression. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2(362), pp. 14–26. (In Russ.) [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-2\(362\)-14-26](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2022-2(362)-14-26)

Silantiev V.V., Miftakhutdinova D.N., Nurgalieva N.G. (2024). From Siliciclastics to Carbonates and Black shales: Deciphering Sedimentary Continuity and Discontinuity in the Devonian Landscapes of the Volga–Ural Petroleum Province. *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp.62–82. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.1>

Silantiev V.V., Miftakhutdinova D.N., Sungatullina G.M., Safarov A.F., Validov M.F., Ganiev B.G., Shumatbaev K.D., Khabipov R.M., Bazarevskaya V.G., Sudakov V.A., Nurgalieva N.G., Duglav Yu.A., Vandin A.S., Drazdova A.V., Rogov A.M. (2025). Model of organic-rich sediment accumulation in the Kama–Kinel Trough System across the Devonian–Carboniferous boundary. *Georesursy = Georesources*, 26(4). (In Russ.) (In Press)

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008). Plesovice zircon – a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2), pp. 1–35.

Sungatullina, G.M., Silantiev, V.V., Miftakhutdinova, D.N., Safarov, A.F., Validov, M.F., Ganiev B.G., Shumatbaev K.D., Khabipov R.M. (2025).

First conodont data from the Devonian–Carboniferous boundary interval in the Kama–Kinel Trough System, East European Platform. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta Seriya Estestvennyye Nauki*, 167(1), pp. 130–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.130-153>

Trapp E., Kaufmann B., Mezger K., Korn D., Weyer D. (2004). Numerical Calibration of the Devonian–Carboniferous Boundary: Two New U–Pb Isotope Dilution–Thermal Ionization Mass Spectrometry Single-Zircon Ages from Hasselbachtal (Sauerland, Germany). *Geology*, 32(10), pp. 857–860. <https://doi.org/10.1130/G20644.1>

Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995). Three Natural Zircon Standards for U–TH–PB, LU–HF, Trace Element and Re Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1), pp. 1–23.

Wu Y., Zheng Y. (2004). Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49, pp. 1554–1569. <https://doi.org/10.1007/BF03184122>

Xu J., Hou H., Ramezani J., Fang Q., Zhang S., Yang T., Chu Z., Wu H. (2024). Geochronological Constraints on the Hangenberg Event of the Latest Devonian in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 642, 112147. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2024.112147>

About the Authors

Vladimir V. Silantiev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of Department of Paleontology and Stratigraphy, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University; Professor, Kazan Federal University, Branch in Jizzakh 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Danis K. Nurgaliev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Vice Rector of Petroleum Technologies, Environmental Management, and Earth Sciences, Kazan Federal University 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Guzal M. Sungatullina – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of Department of Paleontology and Stratigraphy, Kazan Federal University 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Guzel.Sungatullina@kpfu.ru

Dinara N. Miftakhutdinova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Lecturer of Department of Paleontology and Stratigraphy, Kazan Federal University; Lecturer, Kazan Federal University, Branch in Jizzakh 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

Anna V. Kulikova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, REC of Geothermochronology, Kazan Federal University 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Ak_Cool@mail.ru

Nouria G. Nourgalieva – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Nouria.Nourgalieva@kpfu.ru

Yana Y. Saetgaleeva – Engineer, Department of Paleontology and Stratigraphy, Kazan Federal University 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: YYSaetgaleeva@kpfu.ru

Artem S. Vandin – Student, Kazan Federal University

18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Artem.Vandin@kpfu.ru

Manuscript received 16 May 2025;

Accepted 20 June 2025; Published 30 June 2025

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)