

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

ТОМ 64 • № 1 • 2025 • ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Каримова О.В., Еремин Н.Н., Межуева А.А., Упорова Н.С., Золотарев А.А., Чареев Д.А. Структурные преобразования и фазовый переход фрудит (α -PdBi ₂) — урванцевит (β -PdBi ₂) при высоких температурах	3
Левитан М.А. Первые результаты сравнительного анализа химического состава плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов	10
Спиридонов Э.М. О продуктивности рудоносных интрузивов и возможной импактной инициации сибирской трапповой формации и норильских месторождений Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co	16
Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И. Рудоносные монцонитоиды Сарычеку Алмалыкского района (Срединный Тянь-Шань)	22
Казак Е.С., Шиндина Н.Е. Лабораторные методы определения состава поровых вод слабопроницаемых отложений	30
Борисов А.А., Богуславский М.А. Факторы формирования Буруктальского месторождения силикатного никеля	41
Кожанов Д.Д., Большакова М.А., Ситар К.А., Боталов А.Н., Широбокова Ю.В., Габдрахманова Д.И., Мальцев В.В., Заиченко С.Ш. Нефтегазоматеринские породы в разрезах верхнего рифея российской части Восточно-Европейской платформы и сопредельных складчатых областей	47
Попов П.П., Большакова М.А., Пономарева Г.Ю., Хопта И.С. Характеристика нижнепермских потенциально нефтегазоматеринских толщ Предуральского краевого прогиба на примере дивыинской свиты	60
Шарипов Ф.А., Вобликова Е.Ю., Киреева Т.А., Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А. Прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция при разработке нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботубинской антеклизы (Восточная Сибирь)	69
Алферьева Я.О., Микишин А.В., Щекина Т.И., Григорьева Е.И. Взаимодействие фторсодержащего алюмосиликатного расплава и кальцита при 750 °C, 1 кбар и разном режиме летучих компонентов	78
Шевченко Г.А., Большакова М.А. Текущее состояние применения методов науки о данных в геохимии нефти и газа	88
Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Кунченко Д.С., Петровский К.А., Сафуанова К.Р. Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полноволнового моделирования	97

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Karimova O.V., Eremin N.N., Mezhueva A.A., Uporova N.S., Zolotarev A.A., Chareev D.A.</i> Structural transformations and phase transition froodite (α -PdBi ₂) — urvantsevite (β -PdBi ₂) at high temperature	3
<i>Levitin M.A.</i> First results of comparative analysis of Pleistocene sediments chemical composition from the Pacific and Atlantic oceans	10
<i>Spiridonov E.M.</i> The state of the productivity of ore-bearing intrusions and the possible impact initiation of the Siberian trap formation and the Norilsk Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co deposits	16
<i>Karimova F.B., Jumaniyazov D.I.</i> Ore-bearing monzonitoids of Sarycheku Almalyk district (Middle Tien-Shan)	22
<i>Kazak E.S., Shindina N.E.</i> Laboratory methods of pore water extraction from low permeability rocks to study its chemical composition	30
<i>Borisov A.A., Boguslavsky M.A.</i> Factors in the formation of the Buruktal nickel silicate deposit	41
<i>Kozhanov D.D., Bolshakova M.A., Sitar K.A., Botalov A.N., Shirobokova I.V., Gabdrakhmanova D.I., Maltsev V.V., Zaichenko S.S.</i> Upper riphean source rocks of the East European platform Russian part and adjacent folded areas	47
<i>Popov P.P., Bolshakova M.A., Ponomareva G.Yu., Khopta I.S.</i> Characteristics of the lower permian potential oil and gas source stories of the Pre-Ural foredeep on the example of the Divinskaya formation	60
<i>Sharipov F.A., Voblikova E.Yu., Kireeva T.A., Mukhametshin V.Sh., Gilyazetdinov R.A.</i> Forecast of calcium, barium and strontium sulfate salt deposits during development of the Nepa-Botuoba anteclide oil and gas condensate field (Eastern Siberia)	69
<i>Alferyeva Ya.O., Mikshin A.V., Shchekina T.I., Grigorieva E.I.</i> Interaction of fluorine-containing aluminosilicate melt and calcite at 750°C, 1 kbar and different volatile component regimes	78
<i>Shevchenko G.A., Bolshakova M.A.</i> Applications of Data Science methods in petroleum geochemistry: current state	88
<i>Ampilov Yu.P., Vershinin A.V., Kunchenko D.S., Petrovsky K.A., Safanova K.R.</i> Prediction of thin-layer thickness using seismic full-wave modeling	97

УДК 549.02

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-3-9

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ФРУДИТ (α -PdBi₂) — УРВАНЦЕВИТ (β -PdBi₂) ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Оксана Владимировна Каримова¹✉, Николай Николаевич Еремин²,
Анна Алексеевна Межуева³, Наталья Сергеевна Упорова⁴,
Андрей Анатольевич Золотарев⁵, Дмитрий Александрович Чареев⁶

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; oxana.karimova@gmail.com✉

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; neremin@mail.ru

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; ann_mezhueva@mail.ru

⁴ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваричского Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия; nuporova84@yandex.ru

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; aazolotarev@gmail.com

⁶ Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН, Черноголовка, Россия; charlic@mail.ru

Аннотация. Высокотемпературными *in-situ* методами (дифференциально-термический анализ, высокотемпературная монокристальная дифракция) изучен фазовый переход, происходящий в структуре соединения PdBi₂. По данным высокотемпературной монокристальной дифракции рассчитаны структуры полиморфных модификаций PdBi₂ при температурах 300, 373, 473, 573 и 637 К. В диапазоне температур от 300 К (27 °C) до 573 К (300 °C) существует низкотемпературная модификация α -PdBi₂, соответствующая минералу фрудиту, которая характеризуется моноклинной сингонией и пространственной группой C2/m ($a = 12,726(1)\text{\AA}$, $b = 4,2605(4)\text{\AA}$, $c = 5,5668(5)\text{\AA}$, $\beta = 102,51(1)$ °, $V = 299,95(5)\text{\AA}^3$, $Z = 2$). При температуре 673К (400 °C) зафиксирована высокотемпературная модификация β -PdBi₂, обладающая тетрагональной сингонией и пространственной группой I4/mmm ($a = 3,3876(3)$ Å, $c = 13,092(2)$ Å, $V = 150,24(4)$ Å³, $Z = 1$), являющаяся аналогом минерала урванцевита. Фазовый переход относится к переходу I типа и является реконструктивным полиморфным превращением с перестройкой I координационной сферы.

Ключевые слова: фрудит, урванцевит, полиморфный переход, висмутид палладия, высокотемпературная дифрактометрия, дифференциально-термический анализ

Для цитирования: Каримова О.В., Еремин Н.Н., Межуева А.А., Упорова Н.С., Золотарев А.А., Чареев Д.А. Структурные преобразования и фазовый переход фрудит (α -PdBi₂) — урванцевит (β -PdBi₂) при высоких температурах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 3–9.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND PHASE TRANSITION FROODITE (α -PdBi₂) — URVANTSEVITE (β -PdBi₂) AT HIGH TEMPERATURE

Oksana V. Karimova¹✉, Nikolay N. Eremin², Anna A. Mezhueva³,
Natalia S. Uporova⁴, Andrey A. Zolotarev⁵, Dmitriy A. Chareev⁶

¹ Institute of Geology of Ore Deposits RAS, Moscow, Russia; oxana.karimova@gmail.com✉

² Institute of Geology of Ore Deposits RAS; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; neremin@mail.ru

³ Institute of Geology of Ore Deposits RAS, Moscow, Russia; ann_mezhueva@mail.ru

⁴ Zavaritzkiy Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Ekaterinburg, Russia; nuporova84@yandex.ru

⁵ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; aazolotarev@gmail.com

⁶ Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russia; charlic@mail.ru

Abstract. The phase transition in the structure of the PdBi₂ compound was studied using high-temperature *in-situ* methods (differential thermal analysis, high-temperature single-crystal X-ray diffraction). The structures of PdBi₂ polymorphic modifications were refined at temperatures of 300, 373, 473, 573 and 637 K based on the high-temperature single-crystal X-ray diffraction data. A low-temperature modification of α -PdBi₂ is monoclinic, space group C2/m ($a = 12.726(1)\text{\AA}$, $b = 4.2605(4)\text{\AA}$, $c = 5.5668(5)\text{\AA}$, $\beta = 102.51(1)$ °, $V = 299.95(5)\text{\AA}^3$, $Z = 2$). It is stable in the temperature range from 300K (27 °C) to 573K (300 °C) and is corresponding to the mineral froodite. A high-temperature modification of β -PdBi₂ was fixed at the temperature 673K (400 °C). The phase β -PdBi₂ is structural analogue of the mineral urvancevite: it's tetragonal, space group I4/mmm ($a = 3.3876(3)$ Å, $c = 13.092(2)$ Å, $V = 150.24(4)$ Å³, $Z = 1$). The phase transition refers to a type I and is a reconstructive polymorphic transformation with a rearrangement of the first coordination sphere.

Keywords: froodite, urvantsevite, polymorphic transition, palladium bismuthide, high-temperature X-ray diffraction, differential thermal analysis

For citation: Karimova O.V., Eremin N.N., Mezhueva A.A., Uporova N.S., Zolotarev A.A., Chareev D.A. Structural transformations and phase transition froodite (α -PdBi₂) — urvanzhevite (β -PdBi₂) at high temperature. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 3–9. (In Russ.).

Введение. Среди минералов платиновой группы (МПГ) известно два минерала — фрудит и урванцевит, которые имеют в своем составе палладий и висмут в соотношении Pd:Bi = 1:2.

Минерал фрудит (PdBi₂) был открыт в 1973 г. на месторождении Садбери, Канада, в руднике Фруд (Frood), по имени которого он и был назван [Cabri, et al., 1973]. По мнению Ферроу с соавторами фрудит — второй по распространенности минерал палладия (после миченерита, PdBiTe) в Cu-Ni сульфидных рудах месторождений района Садбери (Канада) [Cabri, et al., 1976; Farrow, et al., 1997, 2002].

Фрудит описан также в российских месторождениях Норильского рудного поля [Komarova, et al., 2002, Спиридовон, 2015], и Мончегорского комплекса (Кольский п-ов, Россия) [Deveev, et al., 2002; Гроховская и др., 2003]; а также, например, в Богемии (Чехия) [Cabri, 2002] и др.

Спиридовон (2015) относит фрудит к МПГ поздней пневматолитовой стадии формирования Pd-Pt минерализации Норильского рудного поля. В этих рудах фрудит образует вкрапления в галените и Fe-Cu-Ni-сульфидах размерами от нескольких микрон до 0,5 мм.

Минерал урванцевит (Pd(Bi,Pb)₂) встречается гораздо реже. Впервые он был описан в Cu-Ni сульфидных рудах месторождения Талнах (Норильское рудное поле) Россия [Рудашевский и др., 1976], и, позднее, в месторождении Октябрьское, Норильский р-н, Россия [Cabri, 2002].

Кристаллические структуры минералов фрудита и урванцевита на природных образцах не изучались. Дебаеграммы, полученные при описании минералов, указывают на идентичность структур фрудита и урванцевита структурам двух полиморфных модификаций синтетического соединения PdBi₂. Фрудит обладает структурой низкотемпературной моноклинной модификации с пространственной группой C2/m. Урванцевит имеет структуру высокотемпературной модификации с тетрагональной сингонией и пространственной группой I4/mmm.

Следует отметить, что химический состав природного урванцевита отличается от идеальной формулы PdBi₂ и характеризуется наличием свинца. Возможно, именно наличие примеси свинца является необходимым условием существования минерала урванцевита в природе. Для того, чтобы определить пределы устойчивости обоих структурных типов в зависимости от изменения состава и температуры, необходимо провести исследование, которое будет включать синтез фаз с разным содержанием примеси свинца и уточнение их структур; высокотемпературные эксперименты, определяющие зависимость структурного состояния фаз с различными составами в ряду PdBi-PdPb от изменения температуры. В данной статье представлены результаты

исследования изменения структуры синтетического соединения PdBi₂ с составом крайнего члена ряда без примеси свинца в условиях высоких температур.

Методика. Для выполнения исследования был проведен синтез низкотемпературной модификации α -PdBi₂. Соответствие продукта синтеза искомому соединению определялось методом рентгенофазового анализа. Структурные изменения, происходящие в соединении α -PdBi₂ в условиях высоких температур, изучались методами термического анализа и высокотемпературной монокристальной дифракции.

Экспериментальная часть. *Синтез.* Синтез α -PdBi₂ общей массой 2 г проводился «сухим» методом в вакуумированных ампулах из кварцевого стекла из элементов, взятых в стехиометрическом соотношении с незначительным (15 мг) избытком висмута. Сначала ампула отжигалась месяц при температуре 550 °C, затем закаливалась в воде, затем месяц отжигалась при 300 °C. Далее ампула вскрывалась, вещество перетиралось, и вновь помещалось в ампулу. Ампула вакуумировалась, заваривалась и отжигалась при 310 °C в течение месяца. Далее ампула охлаждалась в холодной воде и вскрывалась.

Рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовый анализ продуктов синтеза выполнен на порошковом дифрактометре PROTO с использованием кобальтового излучения ($K\alpha$ Co 1,7902 Å) при пошаговом режиме съемки (шаг 0,05 °) в диапазоне углов 2θ от 8 до 90°. Экспозиция в точке составляла 1 с. Обработка полученных данных производилась при помощи программы Jade 6, диагностика — по базе данных PDF-2 [Materials Data Inc, 2003].

В результате рентгенофазового анализа установлено, что в процессе синтеза получено соединение, соответствующее низкотемпературной α -модификации PdBi₂, (карточка PDF#89-2027), являющееся аналогом минерала фрудита PdBi₂. Также в образце присутствует 2,5 % металлического висмута (рис. 1).

Дифференциально-термический анализ. Исследование физико-химических процессов и термических характеристик образца α -PdBi₂ выполнено с использованием прибора синхронного термического анализа STA 449 F5 Jupiter (NETZSCH) методами дифференциального термического анализа (ДТА) и термогравиметрии (ТГ) в температурном интервале 30–600 °C в режиме нагрева. Измерения выполнены в тиглях из корунда (масса навесок ~50 мг) при скорости сканирования 10 °C/мин. Все исследования проведены в токе (50 мл/мин) аргона, камера предварительно вакуумировалась и промывалась аргоном. Калибровка температуры и чувствительности (определения энталпии реакций по площади пика) проведена по металлам (In, Sn, Bi, Zn, Al, Ni, Ag, Au) чистотой не ниже 99,99 масс. %. Погрешность в определении температуры составляет ± 1 °, ошибка

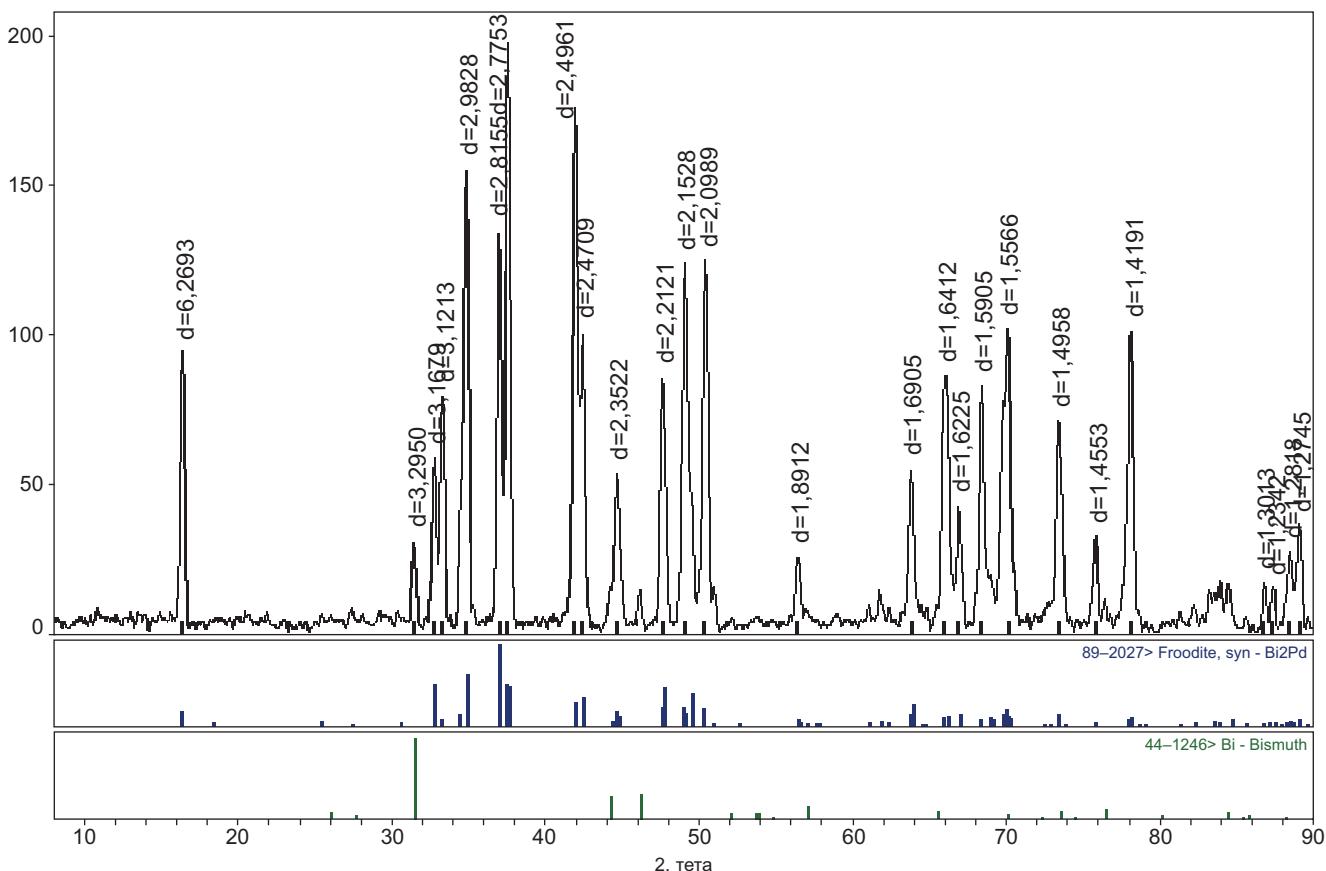


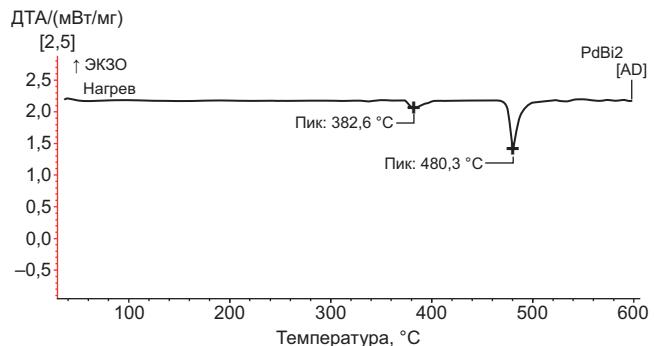
Рис. 1. Дифрактограмма продуктов синтеза

в определении изменения массы $\pm 0,05\%$ (свидетельство о поверке № С-С/22-12-2023/306688935). Обработка данных ДТА-ТГ производилась с использованием программного обеспечения NETZSCH Proteus. По кривым ТГ и ДТГ определялись изменения массы образцов при нагревании и охлаждении; кривая ДТА служила для характеристики наблюдаемых термических эффектов физико-химических процессов и термических характеристик образцов.

На ДТА-кривой нагрева соединения PdBi_2 (рис. 2) зафиксированы два эндотермических пика при температурах $382,6^\circ\text{C}$ и $480,3^\circ\text{C}$, соответственно. Эндотермическая реакция при температуре $382,6^\circ\text{C}$ (655 K) соответствует температуре полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \beta$ соединения PdBi_2 . Термический эффект при температуре $480,3^\circ\text{C}$ связан с конгруэнтным плавлением соединения PdBi_2 или с температурой ликвидус (T_L), выше которой образец находится в жидком состоянии. При плавлении отмечается глубокий эндотермический пик. Зафиксированное значение изменения массы в температурном интервале $30\text{--}600^\circ\text{C}$ не превышает предела погрешности изменения массы ($0,05\%$) встроенных весов прибора.

Энтальпия реакции, вычисленная по площади пика, показывает, что энергия, необходимая для полиморфного превращения $\alpha\text{-PdBi}_2 \rightarrow \beta\text{-PdBi}_2$, равна $-13,1\text{ Дж/г}$.

Высокотемпературная монокристальная рентгеновская дифракция. Серия высокотемпературных

Рис. 2. Температурная зависимость ДТА образца PdBi_2 , полученная в режиме нагрева в атмосфере аргона при скорости сканирования $10^\circ\text{C}/\text{мин}$

рентгеноструктурных экспериментов для соединения PdBi_2 получена на монокристальном дифрактометре Rigaku XtaLab Synergy-S, оснащенном высокостабильным микрофокусным источником излучения PhotonJet-S (MoKa, 50 кВ, 1,0 мА) и высокоскоростным детектором HyPix-6000HE. Получено пять массивов рентгено-дифракционных данных при температурах: $300,0(5)\text{ K}$, $373,0(4)\text{ K}$, $473,0(6)\text{ K}$, $573,0(5)\text{ K}$, $673,0(5)\text{ K}$. Для предотвращения окисления кристалл помещался в капилляр из кварцевого стекла. Обработка массивов дифракционных данных, введение поправок на фактор Лоренца и эффект поляризации, уточнение параметров элементарной ячейки проведены с помощью программного пакета CrysAlis [Agilent, 2012]. Эмпирическая поправка на

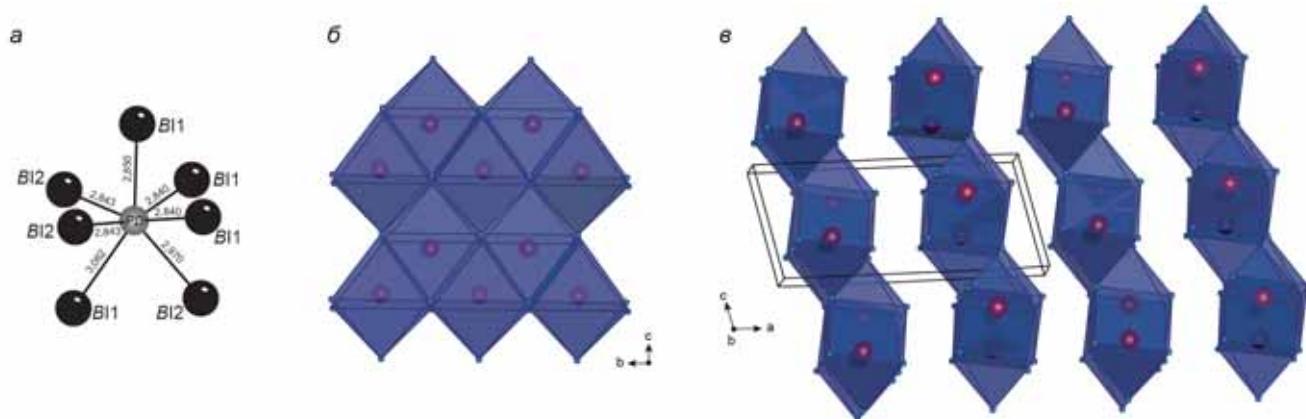


Рис. 3. Кристаллическая структура α -PdBi₂: *а* — координационный полиэдр палладия; *б* — фрагмент слоя из полиэдров палладия в проекции, перпендикулярной параметру *a*; *в* — слои из полиэдров PdBi₇, проекция вдоль параметра *b*

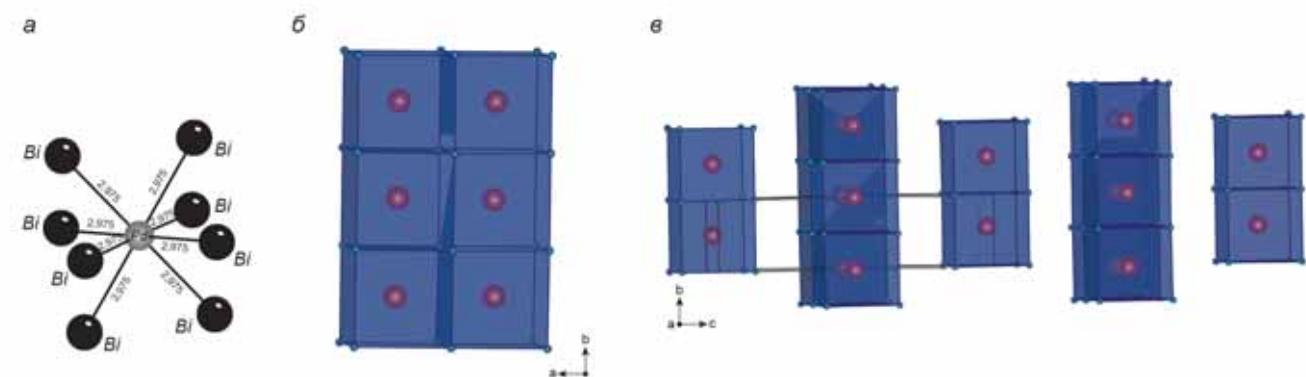


Рис. 4. Кристаллическая структура β -PdBi₂: *а* — координационный полиэдр палладия; *б* — фрагмент слоя из полиэдров палладия, проекция перпендикулярная параметру *a*; *в* — слои из полиэдров PdBi₈, проекция вдоль параметра *b*

поглощение введена с помощью программы SCALE3 ABSPACK [Agilent, 2012].

Кристаллические структуры полиморфных модификаций PdBi₂ при разных температурах были решены прямыми методами и уточнены в анизотропном приближении с помощью программ SHELX [Sheldrick 2008, 2015] в рамках программной среды WinGX [Farrugia, 1999]. В табл. 1 приведены характеристики рентгено-дифракционных экспериментов, результаты решения и уточнения структур. В табл. 2 представлены кристаллографические характеристики полиморфных модификаций PdBi₂ при разных температурах.

Установлено, что в диапазоне температур от 300К (27°C) до 573 К (300°C) существует низкотемпературная модификация α -PdBi₂, которая характеризуется моноклинной сингонией и пространственной группой C2/m. При дальнейшем нагреве происходит фазовый переход, и при температуре 673К (400°C) зафиксирована высокотемпературная модификация β -PdBi₂, обладающая тетрагональной сингонией и пространственной группой I4/mmm.

Обсуждение результатов. В структуре низкотемпературной моноклинной модификации α -PdBi₂ атомы висмута занимают две кристаллографически независимые 4*i* Уайкофф позиции с точечной сим-

метрией *t*. Атомы палладия заселяют одну позицию 4*i* Уайкофф (табл. 3).

Атомы палладия имеют семь ближайших атомов висмута в структуре α -PdBi₂. Координационный полиэдр вокруг атомов Pd — одношапочный октаэдр (рис. 3, *a*). Расстояния Pd-Bi изменяются от 2,840 Å до 3,060 Å (табл. 4). Семивершинники PdBi₇ соединяются общими гранями в слои-стенки, простирающиеся параллельно плоскости (011) структуры (рис. 3, *б*). Слои чередуются вдоль параметра *a* структуры и объединяются с помощью связей Bi-Bi (рис. 3, *в*).

В структуре высокотемпературной тетрагональной модификации β -PdBi₂ атомы висмута занимают одну кристаллографическую позицию — 4*e* Уайкофф, с точечной симметрией 4*mm*. Атомы палладия располагаются в позиции Уайкофф — 2*b* с более высокой точечной симметрией 4/*mmmm* (табл. 5). В этой модификации атомы палладия имеют восемь ближайших соседей. Координационный полиэдр — тетрагональная призма. Все восемь Pd-Bi расстояний одинаковые и равны 2,975 Å (табл. 6; рис. 4, *a*).

Общий мотив структуры сохраняется и в высокотемпературной модификации: полиэдры PdBi₈ объединяются общими гранями и ребрами в слои (рис. 4, *б*). Слои простираются параллельно плоскости (110) и чередуются вдоль длинной

Характеристики рентгено-дифракционных экспериментов, параметры решения и уточнения структур полиморфных модификаций PdBi_2

Таблица 1

Дифрактометр	XtaLAB Synergy Hybrid Pixel Array Detector				
Излучение	Mo $\text{K}\alpha$ ($\lambda = 0,7107 \text{ \AA}$)				
Температура, К	300	373	473	573	673
θ_{\max} , °	27,4	26,5	26,5	26,5	26,4
Пределы h , k , l ,	$-15 \leq h \leq 16$, $-3 \leq k \leq 5$, $-7 \leq l \leq 7$				
Число рефлексов: измеренных/независимых (N_1)/ $c I > 4\sigma(I)$ (N_2)	1423/ 387/ 319	1379/ 354/ 300	1400/ 358/ 288	1408/ 360/ 270	645/ 67/ 59
R_1 по N_1 / R_2 по N_2	0,0764/ 0,0614	0,0590/ 0,0706	0,0558/ 0,0721	0,0630/ 0,0880	0,0500/ 0,0461
S	1,13	1,08	1,08	1,07	1,10

Таблица 2

Кристаллографические характеристики полиморфных модификаций PdBi_2

Минерал/фаза	Сингония, пр. группа	a	b	c	β	V	Z	T, К
Фрудит α - PdBi_2	Моноклинная $C2/m$	12,726(1)	4,2605(4)	5,5668(5)	102,51(1)	299,95(5)	2	300
		12,759(1)	4,2696(4)	5,6758(6)	102,41(1)	301,98(6)	2	373
		12,792(2)	4,2766(4)	5,6819(6)	102,35(1)		2	473
		12,861(2)	4,2861(5)	5,6965(8)	102,51(2)	306,55(8)	2	573
Урванцевит β - PdBi_2	Тетрагональная $I4/mmm$	3,3876(3)	3,3876(3)	13,092(2)		150,24(4)	1	673

Таблица 3

Координаты и коэффициенты тепловых колебаний атомов в структуре α - PdBi_2 в диапазоне температур от 300 до 573 К

Атом	Позиция Уайкофф	x	y	z	U^{11}	U^{22}	U^{33}	U^{23}	U^{13}	U^{12}	U_{eq}	T, К
Bi1	4i	0,1564(1)	1,0	0,8158(2)	0,020(1)	0,0171(9)	0,0093(8)	0	0,0038(6)	0	0,0154(6)	300
		0,1563(1)	1,0	0,8158(2)	0,023(1)	0,0201(9)	0,0137(9)	0	0,0057(7)	0	0,018(7)	373
		0,1560(1)	1,0	0,8156(2)	0,031(1)	0,0264(9)	0,0204(8)	0	0,0064(6)	0	0,0258(6)	473
		0,1565(2)	1,0	0,8151(3)	0,044(1)	0,034(1)	0,0276(9)	0	0,0099(8)	0	0,0347(7)	573
Bi2	4i	0,4264(1)	0	0,7068(2)	0,0165(1)	0,0193(9)	0,0122(8)	0	0,0020(6)	0	0,016(6)	300
		0,4262(1)	0	0,7070(2)	0,0176(1)	0,0228(9)	0,0175(9)	0	0,0028(7)	0	0,0195(7)	373
		0,4259(1)	0	0,7070(2)	0,026(1)	0,0301(9)	0,0247(9)	0	0,0037(7)	0	0,0272(7)	473
		0,4260(2)	0	0,7066(3)	0,038(1)	0,038(1)	0,032(1)	0	0,006(8)	0	0,0363(7)	573
Pd	4i	0,2759(3)	0,5	0,6709(5)	0,028(2)	0,014(1)	0,009(1)	0	0,004(1)	0	0,016(7)	300
		0,2759(3)	0,5	0,6714(5)	0,028(2)	0,017(1)	0,014(2)	0	0,004(1)	0	0,0197(9)	373
		0,2755(3)	0,5	0,6712(5)	0,041(2)	0,022(1)	0,019(1)	0	0,004(1)	0	0,0277(9)	473
		0,2761(3)	0,5	0,6719(6)	0,055(3)	0,030(2)	0,026(2)	0	0,009(2)	0	0,037(1)	573

Таблица 4

Межатомные расстояния в структуре модификации α - PdBi_2 в диапазоне температур 300–573 К

Тип связи	Длина связи, Å	Температура, К	Тип связи	Длина связи, Å	Температура, К	Тип связи	Длина связи, Å	Температура, К
Pd-Bi1	2,8401(2) x2	300	Pd-Bi1	2,8497(3)	300	Pd-Bi1	3,0622(3)	300
	2,846(2) x2	373		2,853(3)	373		3,069(3)	373
	2,849(2) x2	473		2,860(3)	473		3,075(3)	473
	2,858(3) x2	573		2,863(4)	573		3,080(4)	573
Pd-Bi2	2,8425(2) x2	300	Pd-Bi2	2,9700(3)	300			
	2,847(3) x2	373		2,981(3)	373			
	2,854(3) x2	473		2,982(3)	473			
	2,860(3) x2	573		2,996(4)	573			

Таблица 5

Координаты атомов в структуре β -PdBi₂ при температуре 673 К

Атом	Позиция Уайкофф	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>U</i> ¹¹	<i>U</i> ²²	<i>U</i> ³³	<i>U</i> ²³	<i>U</i> ¹³	<i>U</i> ¹²	<i>U</i> _{eq}
Bi	4e	0,5	0,5	0,6348(2)	0,057(1)	0,057(1)	0,059(2)	0	0	0	0,057(1)
Pd	2b	0	0	0	0,0628(2)	0,0628(2)	0,054(3)	0	0	0	0,059(2)

Таблица 6

Межатомные расстояния в структуре модификации β -PdBi₂

Тип связи	Длина связи, Å	Температура, К
Pd-Bi1 x8	2,975(1)	673

Сравнительная характеристика связей Pd-Bi в полиморфных модификациях соединения PdBi₂

Типы взаимодействия и длины связей Pd-Pd в α -PdBi ₂ (300К) Å	
Внутри слоя	Между слоями
2,863; 4,260; 4,466	6,090, 6,400; 6,710

Типы взаимодействия и длины связей Pd-Pd в β -PdBi ₂ (673К) Å	
Внутри слоя	Между слоями
3,388, 4,790	6,970

оси ячейки (*c*) с пустым межслоевым пространством (рис. 4, *в*).

Фазовый переход происходит по реконструктивному механизму. В процессе фазового перехода атомы палладия и висмута смещаются из своих позиций с образованием более высоко симметричных позиций. Две кристаллографические правильные системы точек, которые занимают атомы палладия в низкотемпературной модификации α -PdBi₂, объединяются в высокотемпературной β -PdBi₂ в одну. Образуется дополнительная связь Pd-Bi. Повышается координационное число полиэдров палладия.

В структуре низкотемпературной модификации α -PdBi₂ расстояния между атомами палладия внутри слоя имеют значения от 2,86 до 5,56 Å (табл. 7), а между слоями — в пределах 6,40–6,71 Å. В структуре высокотемпературной модификации β -PdBi₂ расстояния Pd-Pd внутри слоя равны 3,388 и 4,790 Å, а между слоями 6,97 Å. В результате фазового перехода α -PdBi₂ → β -PdBi₂ минимальные расстояния Pd-Pd увеличиваются внутри слоя на 17,5 %, а между

слоями — на 14,8 %. Наибольшая перестройка происходит внутри слоя Pd-Bi полиэдров.

В результате проведенных *in-situ* высокотемпературных экспериментов изучен полиморфный переход фурдит, α -PdBi₂ → урванцевит, β -PdBi₂ (на синтетических аналогах). При полиморфном превращении реконструктивные преобразования касаются только первой и не затрагивают вторую координационную сферу. Общий мотив структуры сохраняется. Согласно классификации полиморфизма по М.Дж. Бюргеру [Бюргер, 1971], и расширенной систематике полиморфных превращений С.К. Филатова и П. Пауфлера [2019] фазовый переход относится к переходу I типа и является реконструктивным полиморфным превращением с перестройкой I координационной сферы. Установлена температура полиморфного перехода α -PdBi₂– β -PdBi₂ — 382 °C, и температура плавления β -PdBi₂ — 480 °C.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-00470.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бюргер М.Дж. Фазовые переходы // Кристаллография. 1971. Т. 16. С. 1084–1096.

Гроховская Т.Л., Бакаев Г.Ф., Шолохнев В.В. и др. Рудная платинометальная минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский п-ов, Россия) // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 4. С. 329–352.

Рудашевский Н.С., Макаров В.Н., Медведева Е.М. и др. Урванцевит, Pd(Bi,Pb)₂, новый минерал в системе Pd-Bi-Sb // Записки ВМО. 1976. Т. 105. С. 704–709.

Спиридовон Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в Норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 445–476.

Филатов С.К., Пауфлер П. Систематика полиморфных превращений кристаллов, обобщенная на основе критериев Бюргера // Записки РМО. 2019. Т. 148, № 5. С. 1–23.

Agilent. CrysAlis P.R.O. Agilent Technologies UK Ltd — Yarnton, Oxfordshire, England. 2012.

Dedeev A.V., Khashkovskaya T.N., Galkin A.S. PGE Mineralization of the Monchegorsk Layered Mafic-Ultramafic Intrusion of the Kola Peninsula // The Geology, Geochemistry,

Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements / Ed. by L.J. Cabri. 2002. CIM Special Volume 54. P. 569–578.

Cabri L.J., Harris D.C., Gait R.I. Michenerite (PdBiTe) redefined and froodite (PdBi₂) confirmed from the Sudbury area // Canadian Mineralogist. 1973. Vol. 11. P. 903–912.

Cabri L.J., Laflamme J.H.G. The mineralogy of the platinum group elements from some Cu-Ni deposits in the Sudbury area, Ontario // Economic Geology. 1976. Vol. 71. P. 1159–1195.

Cabri L.J. The Platinum-Group Minerals // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements / Ed. by L.J. Cabri. 2002. CIM Special Volume 54. P. 13–130.

Farrow C.E.G., Watkinson D.H. Diversity of precious-metal mineralization in footwall Cu-Ni-PGE deposits, Sudbury, Ontario: Implications for hydrothermal models of formation // Canadian Mineralogist. 1997. Vol. 35. P. 817–839.

Farrow C.E.G., Lightfoot P.C. Sudbury PGE Revisited: Toward an Integrated Model / The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group

Elements / Ed. by L.J. Cabri. 2002. CIM Special Volume 54. P. 275–298.

Farrugia L.J. WinGX Program System // J. Appl. Cryst. 1999. Vol. 32. P. 837.

Komarova M.Z., Kozyrev S.M., Simonov O.N., Lulko V.A. The PGE Mineralization of Disseminated Sulphide Ores of the Noril'sk-Taimyr Region // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group

Elements / Ed. by L.J. Cabri. 2002. CIM Special Volume 54. P. 547–568.

Sheldrick G.M. A short history of SHELX // Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography. 2008. Vol. 64(1). P. 112–122.

Sheldrick G.M. Crystal structure refinement with SHELXL // Acta Crystallographica. 2015. Vol. 71. P. 3–8.

Статья поступила в редакцию 04.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК 551.35: 551.79

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-10-15

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТИХОГО И АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНОВ

Михаил Аркадьевич Левитан[✉]

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@mail.ru[✉],
<https://orcid.org/0000-0003-0012-3708>

Аннотация. Проведено сравнение геохимических особенностей плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов. Для расчета их среднего химического состава использованы результаты около 20000 элементоопределений для осадков Атлантического океана и свыше 47000 элементоопределений для осадков Тихого океана. Гемипелагические глины и вулканогенные отложения Тихого океана довольно близки по своему химическому составу, в отличие от подобных отложений Атлантики. Установлено, что в среднем отложения Атлантического океана более карбонатны, чем плейстоценовые отложения Тихого океана (32,09 мас. % CaCO_3 против 18,18 мас. % CaCO_3 , соответственно). Отложения Атлантического океана сильнее обогащены MgO и P_2O_5 , в них выше содержание ППП. Отложения Тихого океана обогащены оксидами остальных петротривальных элементов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Na_2O , K_2O). Для всех литологических типов осадков кроме гемипелагических глин выявлено преобладание абсолютных масс всех основных химических компонентов в Атлантике. Выдвинуто предположение о том, что эта особенность объясняется, главным образом, большим отношением площади водосбора к площади бассейна аккумуляции в Атлантическом океане.

Ключевые слова: Плейстоцен, донные осадки, Тихий океан, Атлантический океан, химический состав

Для цитирования: Левитан М.А. Первые результаты сравнительного анализа химического состава плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 10–15.

FIRST RESULTS OF COMPARATIVE ANALYSIS OF PLEISTOCENE SEDIMENTS CHEMICAL COMPOSITION FROM THE PACIFIC AND ATLANTIC OCEANS

Mikhail A. Levitan[✉]

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; m-levitan@mail.ru[✉]

Abstract. Geochemical peculiarities of Pleistocene sediments from the Pacific and Atlantic oceans have been compared. We used almost 20000 determinations of elements for the Atlantic Ocean sediments and more than 47000 determinations for the Pacific Ocean sediments to calculate their mean chemical composition. Pacific hemipelagic clays and volcanic sediments are rather close by their composition. It differs them from the Atlantic Ocean. It was revealed that in average Atlantic sediments are more calcareous than Pleistocene sediments of the Pacific Ocean (32.09 mas. % CaCO_3 vs 18.18 mas. % CaCO_3 , respectively). They are enriched by MgO and P_2O_5 and have a higher LOI. The Pleistocene of the Pacific Ocean is enriched by oxides of other major elements (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , Na_2O , K_2O). Mass accumulation rates of all chemical components for main lithological types (with exclusion of hemipelagic clays) dominate in the Atlantic. We proposed that these results are due to higher ratio of watershed area to accumulation basin area in the Atlantic Ocean.

Keywords: Pleistocene, bottom sediments, Pacific Ocean, Atlantic Ocean, chemical composition

For citation: Levitan M.A. First results of comparative analysis of Pleistocene sediments chemical composition from the Pacific and Atlantic oceans. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 10–15. (In Russ.).

Введение. В мировой морской геологии одним из приоритетных научных направлений является изучение геохимического межбассейнового фракционирования основных океанов. С этой целью для последующего сравнительного анализа исследуют состав взвешенного осадочного вещества, современные донные осадки, гидрохимию водной толщи. Следует специально подчеркнуть роль изучения последнего из перечисленных объектов, чьему посвящен важный международный проект по исследованию микроэлементов и их изотопов в океане

“GEOTRACERS” [Anderson, 2020; Middag, et al., 2015; Zheng, et al., 2022].

В то же время исследованию геохимического фракционирования более древних океанических осадочных бассейнов пока не уделяется достаточного внимания. Недавно автор предпринял попытку подобного исследования для плейстоценовых отложений Индийского и Атлантического океанов [Левитан, 2024]. Настоящее краткое сообщение продолжает эту тему на примере плейстоценовых осадков Тихого и Атлантического океанов.

Фактический материал. В качестве фактического материала использовали отчеты по рейсам международного проекта по глубоководному бурению океана, содержащие информацию о химическом составе плейстоценовых (в понимании [Gradstein, et al., 2004]) отложений Тихого и Атлантического океанов. К указанной информации добавлены сведения из других литературных источников. В этом плане особенно важно отметить работу Е.М. Емельянова с соавторами [Емельянов и др., 1975] по Атлантике; Н.А. Лисицыной и ее коллег [Лисицына, Дворецкая, 1972; Лисицына и др., 1973], а также И.И. Волкова с соавторами [Волков и др., 1974] по Тихому океану. Все основные литературные источники по Атлантике указаны в статье [Левитан и др., 2024]. Подобная работа по Пацифику еще не закончена.

Всего по Атлантическому океану использовано более 2500 проб и примерно 20000 элементоопределений, а по Тихому океану — свыше 4000 проб и более 47000 элементоопределений. Методы работы с выборками данных по отдельным океанам довольно подробно освещены в статьях [Левитан и др., 2023, 2024].

Полученные результаты и их обсуждение. В итоге выполненных исследований удалось определить средние арифметические химические составы основных типов плейстоценовых отложений Атлантического [Левитан и др., 2024] и Тихого океанов. С использованием данных по средневзвешенному литологическому составу плейстоцена указанных океанов [Левитан, 2021], рассчитаны средневзвешенные химические составы отложений. По этим данным вычислены средние арифметические химические составы для всего плейстоценового осадочно-чехла как Пацифики, так и Атлантики. Наконец, была проделана работа по расчету абсолютных масс основных химических компонентов для всех главных типов плейстоценовых отложений обоих океанов. Полученные результаты представлены в таблицах с последующей интерпретацией. В данном кратком сообщении показаны результаты первых трех частей проделанной работы.

Различия в составе плейстоценовых осадков Тихого и Атлантического океанов по коэффициентам сравнения в вулканогенных отложениях к гемипелагическим глинам. Отмечено существенное сходство средних арифметических химических составов вулканогенных отложений и гемипелагических глин в плейстоцене Пацифики. Сопоставим коэффициенты сравнения (КС) в Атлантическом океане (на основе статьи [Левитан и др., 2024]) и в Тихом океане (табл. 1).

Автором принято, что значения КС от 0,7 до 1,4 свидетельствуют о большой близости химических составов сравниваемой пары отложений. В соответствии с результатами табл. 1 в эту категорию попадают 11 компонентов в Атлантике и 16 компонентов в Пацифике. Сильно обеднены (КС < 0,7) вулканогенные отложения тремя компонентами

Таблица 1
Коэффициенты сравнения (КС) содержаний химических компонентов в вулканогенных отложениях к гемипелагическим глинам в плейстоцене Атлантического и Тихого океанов

Компонент	Атлантический океан	Тихий океан
SiO ₂	1,2	1,0
TiO ₂	1,0	1,4
Al ₂ O ₃	0,8	0,7
Fe ₂ O ₃	1,4	0,9
MnO	2,1	1,1
MgO	0,7	1,0
CaO	2,4	2,2
Na ₂ O	1,8	1,1
K ₂ O	0,9	0,6
P ₂ O ₅	2,8	0,9
ППП	0,5	1,0
V	1,7	0,6
Cr	1,5	0,8
Co	0,6	1,2
Ni	1,2	0,6
Cu	1,2	1,2
Zn	1,2	0,9
Rb	0,6	0,8
Sr	1,6	0,8
Ba	0,8	0,5
Zr	2,3	0,8

в Атлантическом океане (ППП, Co, Rb) и четырьмя — в Тихом (K₂O, V, Ni, Ba). Слабое обогащение ($1,4 < \text{КС} < 2,0$) отмечено для четырех компонентов в Атлантике (Na₂O, V, Cr, Sr) и отсутствует полностью в Пацифики. Наконец, вулканогенные отложения заметно обогащены ($\text{КС} > 2,0$) четырьмя компонентами в Атлантическом океане (MnO, CaO, P₂O₅, Zr) и только одним — в Тихом (CaO). Изложенные результаты позволяют утверждать, что гемипелагические глины и вулканогенные отложения существенно ближе по среднему химическому составу друг к другу в Тихом океане, чем в Атлантическом. Это различие между океанами обусловлено, скорее всего, известным доминированием геодинамического типа активных окраин Тихого океана по сравнению с геодинамикой литосферы Атлантики. Отсюда следует, что гемипелагические глины плейстоцена Пацифики в некоторых отношениях можно рассматривать как вулкано-терригенные образования.

Сравнение средних химических составов плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов. Анализ данных табл. 2 показал, что существуют две группы компонентов по отношениям их содержаний в осадках Тихого океана к осадкам Атлантики: менее 1,0 и более 1,0. К первой группе относятся CaO, MgO, P₂O₅, ППП. Полученные значения для CaO и ППП объясняются почти вдвое более высокой средней карбонатностью атлантических

осадков (32,09 мас. % CaCO_3 против 18,18 мас. %, соответственно). Повышенная карбонатность плейстоцена Атлантики по сравнению с плейстоценом Пацифики обусловлена несколькими обстоятельствами (табл. 3): 1) заметно более высоким отношением PP/L в Атлантике (PP — аббревиатура термина «*primary production*», т. е. «первичная продукция», широко применяемого в англоязычной научной литературе, например, в [Behrenfeld, Falkowski, 1997]; L — часть отношения B/L , т. е. отношения площади водосбора (B) к площади бассейна аккумуляции (L), введенного Н.М. Страховым и применявшегося, например, в монографии А.П. Лисицына [Лисицын, 1978]; отношение PP/L впервые вводится автором в данной статье), которое указывает на первичную продукцию [Behrenfeld, Falkowski, 1997], приходящуюся на значительно меньшую площадь океана по сравнению с Пацифией [Лисицын, 1978]; 2) существенно большей величиной отношения B/L для Атлантического океана, что приводит к превышению потоков биогенных элементов и компонентов с континентов и, в результате, к большим абсолютным массам CaCO_3 в современную эпоху [Лисицын, 1978], и в плейстоцене [Левитан, 2021]; 3) меньшей долей глубоководных котловин в рельфе дна Атлантического океана по сравнению с Тихим [Harris, et al., 2014]. Низкое отношение (0,53) для P_2O_5 обусловлено большой ролью в нашей выборке по Атлантике образцов осадков из Бенгельского апвеллинга.

Таблица 2

Сравнение среднего химического состава (мас. %) плейстоцена Тихого и Атлантического океанов

Компоненты	Тихий океан	Атлантический океан	Тихий океан/Атлантический океан
SiO_2	49,32	40,13	1,23
TiO_2	0,60	0,53	1,13
Al_2O_3	15,75	12,32	1,28
Fe_2O_3	7,70	6,54	1,18
MnO	0,21	0,19	1,11
MgO	2,40	2,67	0,90
CaO	10,18	17,97	0,57
Na_2O	2,19	1,80	1,22
K_2O	3,04	1,94	1,57
P_2O_5	0,16	0,30	0,53
ППП	8,45	15,61	0,54

Близкая к 1,0 величина отношения для MgO вызвана тем, что частично этот компонент входит в состав биогенного карбоната кальция, а также частично присутствует в бескарбонатном веществе осадков. Отношения более 1,0 демонстрируют все оставшиеся компоненты, так как бескарбонатного вещества в среднем в Тихом океане больше, чем карбонатного. При этом для SiO_2 можно отметить некоторую роль (относительно невысокую) диатомовых илов Пацифики. Интересно, что самые высокие

отношения содержаний в осадках Тихого океана к осадкам Атлантики выявлены для K_2O и Al_2O_3 . Ряд авторов указывают на широкое распространение на суше (в том числе и на островах) в тропической зоне Пацифики каолинитов и латеритов [Zheng, et al., 2022], обогащенных этими компонентами. Однако, повышенных концентраций растворенного Al вниз по разрезу водной толщи не отмечено [Zheng, et al., 2022].

Нормирование средних химических составов плейстоценовых отложений обоих океанов по PAAS (постархейским австралийским глинистым сланцам [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]) — одному из эталонов терригенных глинистых пород — показало, что океанические осадки (особенно в Атлантике) сильно обогащены CaO (табл. 4). Хорошо выражено также их обогащение Na_2O и MnO . Очевидно, что повышенная карбонатность обусловлена развитием различных типов океанических биогенных карбонатов, а относительная обогащенность Na_2O вызвана, прежде всего, составом морской воды. Не исключено, что определенное значение в этом плане имеет малое содержание калиевых полевых шпатов в океанических осадках [Серова и др., 1979; Тримонис, 1995]. Косвенным подтверждением такого предположения служат и максимально низкие отношения содержаний K_2O в исследованных осадках к их величинам в PAAS (табл. 4). Высокие значения MnO и близкие к содержаниям в PAAS концентрации Fe_2O_3 в плейстоценовых осадках обоих океанов (с учетом их повышенной карбонатности), вероятно, свидетельствуют о существенной роли гидрогенного вещества вследствие геохимической дифференциации и других процессов (например, влияния подводной гидротермальной деятельности). Отношения большинства оксидов петрогенных элементов к их содержаниям в PAAS (кроме CaO) свидетельствуют, возможно, об их терригенном источнике. При этом относительно повышенное отношение SiO_2 в плейстоценовых отложениях Тихого океана указывает и на определенную роль биогенного опала.

Абсолютные массы петрогенных компонентов в плейстоцене Тихого и Атлантического океанов. Для построения табл. 5 были учтены данные по массам сухого осадочного вещества основных типов плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов, площадям их распространения, скоростям накопления и их абсолютным массам [Левитан, 2021], а также по результатам вычислений средних арифметических химических составов этих же отложений ([Левитан и др., 2024] и данная статья).

Анализ данных табл. 5 также выявил две группы абсолютных масс петрогенных компонентов по их отношениям в осадках Тихого океана к осадкам Атлантики: менее 1,0 и более 1,0. К первой группе относятся почти все типы отложений, кроме гемипелагических глин, принадлежащих второй группе. В первой группе выявлены два исключения: Al_2O_3 в пелагических глинах и MnO в кокколитово-фо-

Таблица 3

Некоторые параметры современной и плейстоценовой седиментации в Тихом и Атлантическом океанах

Параметры	Тихий океан	Атлантический океан	Тихий океан/Атлантический океан
B/L	0,13	0,71	0,18
PP (10^9 т С/год) [Behrenfeld, Falkowski, 1997]	16,7	11,9	1,40
PP/L (10^9 т С/год \times млн км 2) (данные статья)	0,093	0,129	0,72
Площадь развития современных пелагических глин (тыс. км 2) [Лисицын, 1978]	70847	7284	9,73
Абсолютные массы литогенного вещества плейстоценовых отложений ($\text{г}/\text{см}^2 \times \text{тыс. лет}$) [Левитан, 2021]	1,20	1,64	0,73
Абсолютные массы CaCO_3 плейстоценовых отложений ($\text{г}/\text{см}^2 \times \text{тыс. лет}$) [Левитан, 2021]	0,24	1,01	0,24

Примечания. В — площадь современных водосборов [Левитан, 2024 и данная статья]; L — площадь современных океанов [Лисицын, 1978]; PP — современная первичная продукция. Величины В получены при обсчете карт из [Физико-географический..., 1964].

раминиферовых илах и глинах. Специфика Al_2O_3 в пелагических глинах Пацифики уже отмечалась выше при интерпретации табл. 2. Причиной столь высоких абсолютных масс MnO в относительно мелководных планктоногенных карбонатных илах может быть высокое содержание растворенного Mn в слое поверхностных вод Тихого океана [Zheng, et al., 2022]. Не исключено, что это же явление объясняет и сравнимые с Атлантикой высокие абсолютные массы MnO в диатомовых илах Пацифики.

В целом существование первой группы абсолютных масс обусловлено рядом причин, характерных для Тихого океана (табл. 3): 1) максимально низкими значениями отношения B/L; 2) огромными площадями распространения глубоководных котловин с их минимальными скоростями седиментации; 3) заметно более слабым развитием вулканогенных отложений по сравнению с Атлантикой [Левитан, 2021].

В то же время кажущееся противоречие между отношением B/L и высокими абсолютными массами гемипелагических глин в плейстоцене Пацифики (вторая группа) объясняется тем, что эти отложения распространены в относительно узком поясе вдоль активных окраин и получают питание осадочным материалом из крупнейших зон неотектонического горообразования (включая крупнейшие реки Китая и Юго-Восточной Азии). Ранее уже было отмечено, что для плейстоцена Атлантики заметная роль неотектонического фактора в поставке терригенного вещества отсутствует [Левитан, 2024].

Исключениями во второй группе являются пониженные отношения абсолютных масс P_2O_5 и CaO , что можно объяснить более высокой первичной продукцией в областях развития гемипелагических глин в Пацифики. Это, в свою очередь, обусловлено существованием глобально выраженной зоны повышенной первичной продукции над подводными частями континентальных окраин [Демидов, 2014].

Заключение. При сопоставлении отношений средних содержаний химических компонентов в вулканогенных отложения к гемипелагическим глинам выяснилось, что в плейстоцене Тихого океана

Таблица 4

Отношения среднего арифметического химического состава (мас. %) плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов к среднему составу PAAS

Компоненты	Тихий океан/PAAS	Атлантический океан/PAAS
SiO_2	0,82	0,67
TiO_2	0,64	0,56
Al_2O_3	0,80	0,63
Fe_2O_3	1,15	0,98
MnO	2,10	1,90
MgO	1,16	1,29
CaO	8,34	14,73
Na_2O	1,94	1,59
K_2O	0,80	0,51
P_2O_5	1,07	2,00
ППП	1,41	2,60

обе группы отложений обладают довольно близким составом (в отличие от Атлантики). Эта особенность объясняется преимущественно вулканогенным петрофондом областей водосбора на активных континентальных окраинах Пацифики.

Установлено, что плейстоценовые отложения Атлантического океана в среднем являются более карбонатными, чем плейстоцен Тихого океана (32,09 мас. % CaCO_3 против 18,18 мас. %). Причинами такого различия являются большие величины B/L в Атлантике (что вызывает повышенное поступление с суши питательных веществ, необходимых для биогенного образования CaCO_3), заметно более высокое отношение современной первичной продукции (следовательно, и продукции биогенных карбонатов) к площади океана, и меньшая роль глубоководных котловин в рельефе дна Атлантического океана. В плейстоцене, как и в современную эпоху [Лисицын, 1978], интенсивность накопления биогенных карбонатов в Атлантическом океане была гораздо выше, чем в Тихом (табл. 3).

Нормирование средних химических составов плейстоценовых отложений обоих океанов по PAAS

Таблица 5

Сравнение абсолютных масс (г/см² × тыс. лет) петрогенных компонентов некоторых основных типов плейстоценовых отложений Тихого и Атлантического океанов

Ком- понент	Тихий океан								Ком- понент	Атлантический океан								
	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO ₂	0,25	10,48	4,13	0,40	0,10	0,10	H.o.	0,37	SiO ₂	0,74	5,12	10,53	6,01	0,81	0,39	H.o.	0,71	
TiO ₂	0,003	0,13	0,05	0,007	0,001	0,002	H.o.	0,002	TiO ₂	0,01	0,07	0,16	0,07	0,01	0,006	0,01	0,004	
Al ₂ O ₃	0,11	3,66	0,99	0,10	0,02	0,02	H.o.	0,07	Al ₂ O ₃	0,30	1,55	2,63	1,10	0,41	0,10	1,03	0,27	
Fe ₂ O ₃	0,06	1,66	0,63	0,06	0,01	0,02	0,00002	0,02	Fe ₂ O ₃	0,18	0,90	1,29	1,23	0,17	0,07	0,20	0,07	
MnO	0,002	0,03	0,006	0,001	0,001	0,003	0,000002	0,001	MnO	0,01	0,01	0,02	0,19	0,004	0,002	0,004	0,001	
MgO	0,02	0,58	0,14	0,02	0,005	0,009	0,001	0,007	MgO	0,04	0,27	0,59	0,17	0,12	0,03	0,03	0,06	
CaO	0,006	0,50	0,18	0,04	0,18	0,25	0,041	0,01	CaO	0,04	0,68	0,95	0,67	1,08	0,61	3,63	0,12	
Na ₂ O	0,006	0,55	0,16	0,02	0,006	0,009	H.o.	0,016	Na ₂ O	0,02	0,21	0,35	0,27	0,05	0,03	0,07	0,04	
K ₂ O	0,03	0,53	0,34	0,01	0,003	0,004	H.o.	0,013	K ₂ O	0,04	0,24	0,45	0,20	0,04	0,02	0,10	0,03	
P ₂ O ₅	0,001	0,03	0,01	0,001	0,001	0,001	H.o.	0,001	P ₂ O ₅	0,005	0,03	0,03	0,08	0,01	0,005	0,03	0,006	
Ком- понент	Тихий океан /Атлантический океан																	
	1	2	3	4	5	6	7	8										
SiO ₂	0,34	2,05	0,39	0,07	0,12	0,26	H.o.	0,52										
TiO ₂	0,30	1,86	0,31	0,10	0,10	0,33	H.o.	0,50										
Al ₂ O ₃	3,67	2,36	0,38	0,09	0,05	0,20	H.o.	0,26										
Fe ₂ O ₃	0,33	1,84	0,49	0,05	0,06	0,29	0,0001	0,29										
MnO	0,20	3,00	0,30	0,005	0,25	1,50	0,0005	1,00										
MgO	0,50	2,15	0,24	0,12	0,04	0,30	0,03	0,12										
CaO	0,15	0,74	0,19	0,06	0,17	0,41	0,01	0,08										
Na ₂ O	0,30	2,62	0,46	0,07	0,12	0,30	H.o.	0,40										
K ₂ O	0,75	2,21	0,76	0,05	0,08	0,20	H.o.	0,43										
P ₂ O ₅	0,20	1,00	0,33	0,01	0,10	0,20	H.o.	0,17										

выявило их обогащение помимо CaO также Na₂O и MnO. Для Na₂O это обусловлено главным образом составом морской воды, а для MnO — ролью гидрогенного вещества (вследствие геохимической дифференциации, а также подводной гидротермальной деятельности [Лисицын, 1978]).

Установлены две группы абсолютных масс петрогенных компонентов по их отношениям в осадках Тихого океана к осадкам Атлантики: с отношениями менее 1,0 и более 1,0. К первой группе относятся почти все типы отложений, кроме гемипелагических глин, принадлежащих второй группе. Существование первой группы абсолютных масс обусловлено, главным образом, максимально низкими значениями отношения B/L для Пацифики. Специфика

очень больших потоков химических компонентов в гемипелагические глины Тихого океана обусловлена ролью эрозии поясов неотектонического горообразования, расположенных на водосборах Тихого океана. На водосборах Атлантического океана существенной роли неотектоники в поставке осадочного материала в бассейн аккумуляции не наблюдается [Левитан, 2024].

Благодарности. Автор признателен Т.А. Антоновой, Л.Г. Домарацкой, А.В. Кольцовой за помощь в работе над статьей. Замечания рецензентов позволили улучшить ее содержание.

Финансирование. Исследование выполнено за счет Госзадания ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волков И.И., Соколов В.С., Соколова Е.Г., Пилипчук М.Ф. Редкие и рассеянные элементы в осадках северо-западной части Тихого океана // Литол. и полезн. ископ. 1974. № 2. С. 3–22.

Демидов А.Б. Первичная продукция океанического фитопланктона: изменчивость и глобальные оценки // Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер

Земли / Ред.: Л.И. Лобковский, Р.И. Нигматулин. М.: Научный мир, 2014. С. 224–241.

Емельянов Е.М., Лисицын А.П., Ильин А.В. Типы донных осадков Атлантического океана. Результаты исследований по МГП. Океанологические исследования. Калининград, 1975. 579 с.

Левитан М.А. Первые результаты сравнительного анализа химического состава плейстоценовых отложений

Индийского и Атлантического океанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 3. С. 54–58.

Левитан М.А. Плейстоценовые отложения Мирового океана. М.: РАН, 2021. 408 с.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г., Кольцова А.В. Геохимические особенности плейстоценовых отложений Атлантического океана // Литол. и полезн. ископ. 2024. № 3. С. 323–344.

Левитан М.А., Антонова Т.А., Домарацкая Л.Г. и др. Химический состав плейстоценовых отложений Индийского океана // Литол. и полезн. ископ. 2023. № 5. С. 423–444.

Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.

Лисицына Н.А., Дворецкая О.А. Литологический профиль через Северо-Западную котловину Тихого океана // Литол. и полезн. ископ. 1972. № 4. С. 3–26.

Лисицына Н.А., Дворецкая О.А., Пушкина З.В., Черкасова Е.В. К геохимии элементов-гидролизатов в осадках Северо-Западной котловины Тихого океана // Литол. и полезн. ископ. 1973. № 6. С. 3–21.

Серова В.В., Лисицын А.П., Мурдмаа И.О. Кварц и полевые шпаты в осадках // Осадкообразование и магматизм океана / Отв. ред. П.Л. Безруков. М.: Наука, 1979. С. 198–210.

Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 379 с.

Тримонис Э.С. Терригенная седиментация в Атлантическом океане. М.: Наука, 1995. 255 с.

Физико-географический атлас Мира. М.: АН СССР и ГУГК, 1964. 298 с.

Anderson R.F. GEOTRACES: Accelerating Research on the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes. Annual Review of Marine Science (2020, January 3). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010318-095123>.

Behrenfeld M.J., Falkowski P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // Limnol. and Oceanogr. 1997. Vol. 42. №1. P. 1–20.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Smith A.G. A Geological Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 599 p.

Harris P.T., Macmillan-Lawler M., Rupp J., Baker E.K. Geomorphology of the oceans // Mar. Geol. 2014. Vol. 352. P. 4–24.

Middag R., van Hulten M.M.P., Van Aken H.M., et al. Dissolved aluminium in the ocean conveyor of the West Atlantic Ocean: Effects of the biological cycle, scavenging, sediment resuspension and hydrography // Mar. Chem. 2015. Vol. 177. Part I. P. 69–86.

Zheng L., Minami T., Takano S., Sohrin Y. Distributions of aluminum, manganese, cobalt, and lead in the western South Pacific: Interplay between the South and North Pacific // Geochim. Cosmochim. Acta. 2022. Vol. 338. P. 105–120.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК 553.48 + 552.11 (571.5)
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-16-21

О ПРОДУКТИВНОСТИ РУДОНОСНЫХ ИНТРУЗИВОВ И ВОЗМОЖНОЙ ИМПАКТНОЙ ИНИЦИАЦИИ СИБИРСКОЙ ТРАППОВОЙ ФОРМАЦИИ И НОРИЛЬСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co

Эрнест Максович Спиридовонов[✉]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ernstspiridon@gmail.com[✉]

Аннотация. Показана чрезвычайно высокая продуктивность норильских рудоносных интрузивов, которая превышает продуктивность крупнейшего Pt–Pd гиганта Бушвельда по палладию примерно в 20 000 раз, по платине — в 3000 раз. Столь огромная разница не может быть объяснена процессами дифференциации. Становление крупнейшей в Мире магматической формации — сибирской трапповой и сопряженных с ней самых крупных в Мире норильских месторождений палладия отвечает границе терминальной перми и раннего триаса, которая соответствует мощнейшему на Земле импактному событию в Восточной Антарктиде. Выдвинута гипотеза о возможной импактной инициации суперплума, породившего сибирскую трапповую формацию и крупнейшие норильские месторождения Pd. С этим коррелируются данные по геохимии палладия и платины в планетах Земной группы.

Ключевые слова: продуктивность рудоносных интрузивов, возможная импактная инициация сибирской трапповой формации и норильских месторождений палладия

Для цитирования: Спиридовон Э.М. О продуктивности рудоносных интрузивов и возможной импактной инициации сибирской трапповой формации и норильских месторождений Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 16–21.

THE STATE OF THE PRODUCTIVITY OF ORE-BEARING INTRUSIONS AND THE POSSIBLE IMPACT INITIATION OF THE SIBERIAN TRAP FORMATION AND THE NORILSK Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co DEPOSITS

Ernst M. Spiridonov[✉]

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ernstspiridon@gmail.com[✉]

Abstract. The extremely high productivity of the Norilsk ore-bearing intrusivs exceeding the palladium (20,000 times as much) and platinum (3,000 times as much) productivity of the largest Pt–Pd giant Bushveld, is shown. Such a huge difference cannot be explained by any differentiation processes. The largest igneous formation in the world, which is the Siberian Trap and the associated largest in the world Norilsk palladium deposits conform to the boundary of the terminal Permian and the Early Triassic corresponding to the most powerful impact event on Earth in East Antarctica. A hypothesis for the possible impact initiation of the superplume that generated the Siberian trap formation and the largest Norilsk Pd deposits has been suggested. This correlates with data on the palladium and platinum geochemistry in the terrestrial planets.

Keywords: productivity of ore-bearing intrusivs, possible impact initiation of the Siberian trap formation and Norilsk palladium deposit

For citation: Spiridonov E.M. The state of the productivity of ore-bearing intrusivs and the possible impact initiation of the Siberian trap formation and the Norilsk Pd-Pt-Rh-Cu-Ni-Co deposits. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 16–21. (In Russ.).

Введение. Одна из жемчужин Арктической области России — гигантские plutоногенные Норильские Co-Ni-Cu-Ag-Au-Rh-Pt-Pd месторождения. Магматогенные сульфидные руды этих месторождений содержат уникальное количество Pd и Pt. В этих месторождениях многое специфично. Они размещены в особой структуре Восточно-Сибирской платформы — в северо-западной зоне краевых дислокаций, строение которой промежуточное между платформой и складчатой областью [Годлевский, 1959; Маслов, 1963; Люлько и др., 1987, 1994; Simonov, et al., 1994; Спиридовонов, 2019], недалеко от границы

с Западно-Сибирской эпикаледено-герцинской плитой. Рудоносные интрузивы расположены над мощным выступом высокоплотных пород основного состава (рис. 1), судя по результатам интерпретации сейсмического профиля «Батолит» [Глубинное строение СССР..., 1991].

На дорифейской Восточно-Сибирской платформе интенсивно проявлен мантийный магматизм. Это крупнейшая в Мире магматическая провинция — сибирская трапповая формация [Соболев, 1936; Геология..., 1966] с Pt-Pd специализацией, с крупнейшими месторождениями палладия —

Норильскими месторождениями Co-Ni-Cu сульфидных руд [Котульский, 1946; Годлевский, 1959; Маслов, 1963; Степанов, 1981; Люлько и др., 1987, 1994; Степанов, Туровцев, 1988; Simonov, et al., 1994]. Объем изверженных базальтовых расплавов — от 1,5 до 12 млн км³ (Масайтис, 1983; Dobretsov, 2009). Изотопный U-Pb возраст по циркону и бадделеиту габбронорит-долеритов рудоносных интрузивов Норильского рудного поля — $251,2 \pm 0,3$ Ma [Kamo, et al., 1996; Kamo, et al., 2003]. Аналогичные датировки получены Rb/Sr и Ar/Ar методом по плагиоклазу, биотиту и амфиболу пород рудоносных интрузивов — $250,2 \pm 1,5$ Ma [Renne, 1995] и Re/Os методом по сульфидным рудам [Dalrymple, et al., 1991]. Практически тот же изотопный возраст установлен у вулканических траппов Норильского региона и рифтов Западно-Сибирской плиты [Изменения..., 2007]. В северной части Восточно-Сибирской платформы в Маймече-Котуйской провинции развиты траппы, аналогичные норильским, U-Pb возраст этих пород по циркону и бадделеиту — $251,7 \pm 0,5$ Ma [Kamo, et al., 2000]. Таким образом, возраст сибирской трапповой формации отвечает границе пермского и триасового периодов, установленной в стратотипе Мейшань в Южном Китае по морской фауне терминальной перми и раннего триаса, изотопная датировка этой границы — $251,2 \pm 0,3$ Ma [Bowring, et al., 1998].

Для посттрапповых щелочных базальтоидов, ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Маймече-Котуйской провинции с Pt-Ir-Os специализацией установлен U-Pb возраст по циркону и бадделеиту и U-Th-Pb возраст по первовскиту — $250,2 \pm 0,3$ Ma [Kamo, et al., 2000]. Одни из характерных образований Маймече-Котуйской провинции — дайки щелочных лампрофиров, в их числе — арфведсонит-флогопитовые минетты лампроитовой серии, богатые апатитом, который содержит до 22 масс. % SrO. Дайки точно таких же минетт с высоким Sr апатитом в Норильском рудном поле в руднике Заполярном секут интрузивные породы и сульфидные руды [Спиридовон, 2021; 2022б].

Таким образом, длительность формирования сибирской трапповой формации, включая Норильские месторождения, менее 1,5 Ma [Люлько и др., 1994; Спиридовон, 2010, 2019, 2022а], т. е. скорость накопления магматических расплавов и рудного вещества очень высока.

Одни из замечательных образований Сибирской трапповой формации — рудно-магматические системы Норильского рудного поля, которые содержат около 40 % мировых запасов Pd и 10 % Pt. Рудное поле образовано рядом рудоносных интрузивов норильского типа [Годлевский, 1959; Степанов, 1981; и др.] (рис. 2), практически наиболее поздних производных сибирской трапповой формации, возникшей на рубеже перми и триаса. В Талнахском рудном узле — это Хараелахский интрузив — месторождение Октябрьское, Верхнеталнахский интрузив —

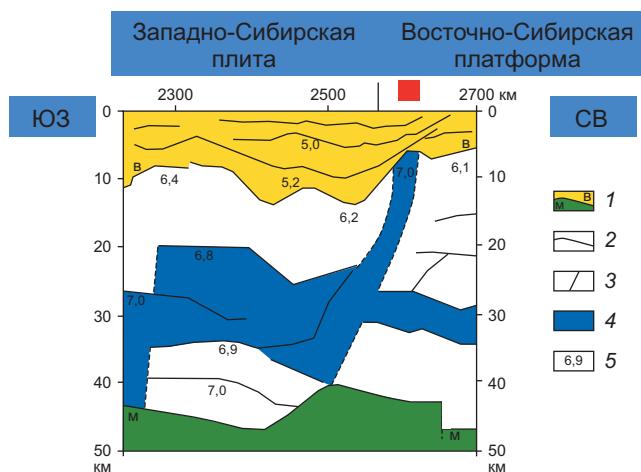


Рис. 1. Фрагмент сейсмического профиля «Батолит» [Глубинное строение..., 1991]. 1 — опорные сейсмические границы (В — фундамент, М — поверхность Мохо); 2 — внутренние сейсмические границы; 3 — границы блоков с различными скоростными характеристиками; 4 — блоки земной коры, сложенные породами основного состава; числа 5 — значения скоростей продольных волн, км/с. Красным показано географическое положение Норильского рудного поля

месторождение Талнахское; в Норильском рудном узле — это Норильские интрузивы — месторождения Норильское I, Масловское, Норильское II. Размеры лентообразных рудоносных интрузивов норильского типа составляют $0,3-2 \times 0,1-0,3 \times 25-30$ км. Суммарный их объем около 30 км³.

Недеформированные рудоносные интрузивы пересекли и метаморфизовали низы толщи вулканических траппов, которая смята в серию брахисинклиналей. Внедрение рудоносных интрузивов возможно было сопряжено со смятием вулканических траппов, которое могло быть вызвано раскрытием мощных рифтов, заполненных базальтами, на северо-востоке Западно-Сибирской плиты [Spiridonov, et al., 2018].

По мнению ведущих исследователей Норильских месторождений, породившие их магматические системы могли иметь глубинный мантийный источник [Котульский, 1946; Годлевский, 1959; Wooden, et al., 1992; Lightfoot, et al., 1993; Walker, et al., 1994; Arndt, et al., 2003; Naldrett, 2004; Лихачёв, 2006]. По данным В.К. Степанова [Степанов, 1981; Степанов, Туровцев, 1988] и натурным наблюдениям, в том числе автора [Спиридовон, 2019, 2022б], сульфидные расплавы внедрились из глубинного источника синхронно с силикатными расплавами, породившими рудоносные интрузивы норильского типа.

Возраст сибирской трапповой формации отвечает границе пермского и триасового периодов — 251 Ma. Именно в это время произошла крупнейшая экологическая катастрофа — вымерло более 70 % всей биоты Земли того времени, как наземной, так и морской. Считалось, что причиной экологической катастрофы были извержения сибирских плато-базальтов с колоссальным выбросом S, Cl, F и др. [Рябчиков и др., 1999].

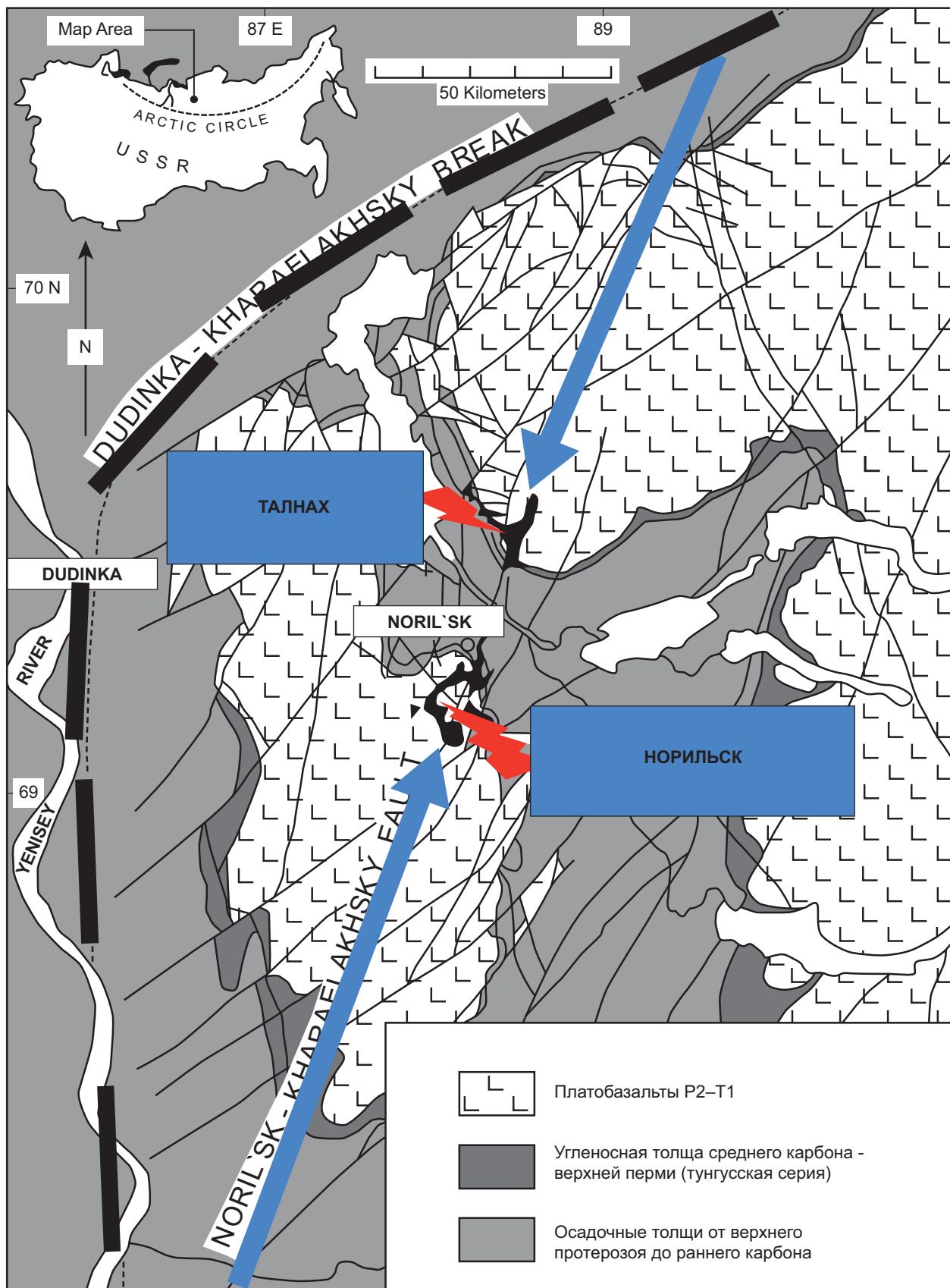


Рис. 2. Направления внедрения рудоносных интрузивов от границ платформы (черный пунктир) в Норильском рудном узле — с юго-запада на северо-восток, в Талнахском рудном узле — с северо-востока на юго-запад, показаны синими стрелами. Головные части рудоносных интрузивов показаны черной заливкой



Рис. 3. Местоположение импактного кратера на востоке Антарктиды в Земле Уикса

По представлениям ведущих петрологов [Arndt, et al., 1998; Рябчиков и др., 1999; Dobretsov, 2009] Сибирская трапповая формация порождена суперплюмом — мощным потоком вещества и энергии примерно от границы ядра Земли к ее поверхности.

В чем вероятная причина возникновения плюма гигантского масштаба, породившего Сибирскую трапповую формацию? Возможные ответы появились из Антарктиды и Китая. В районе Земли Уикса на востоке Антарктиды обнаружен самый крупный из известных на нашей планете астероидный кратер. Диаметр его воронки правильной круглой формы составляет 482 км (рис. 3), т. е. крупное космическое тело ударило почти перпендикулярно к поверхности Антарктического континента. Ученые убеждены в том, что возраст кратера около 250 Ma. В качестве подтверждения этого события и его следствия, в Китае в регионе Мейшань на границе слоев с морской фауной терминальной перми и слоев с морской фауной раннего триаса обнаружен горизонт с массой металлических частиц космического происхождения [Корчагин и др., 2010].

Стоит отметить, что почти все границы геологических периодов отвечают крупным импактным событиям [Масайтис и др., 1980; Carion, 2017].

Представляется, что причиной крупнейшей экологической катастрофы на границе пермского и триасового геологических периодов было мощнейшее импактное событие. Крупномасштабные извержения сибирских траппов — его возможное следствие.

Физики полагают жизнеспособным следующее предположение автора [Спиридовонов, 2019, 2022a].



Рис. 4. Палинспастическая реконструкция на время 250 Ma назад. Местоположение гигантского импактного кратера на земле Уикса в Антарктиде показано красной звездочкой, сибирских траппов — зеленой стрелкой

Мощная гидравлическая ударная волна от падения крупного космического тела 251 Ma тому назад дошла до жидкого ядра Земли, пронзила его и вызвала на противоположной стороне жидкого ядра выброс вещества и энергии, спровоцировав возникновение суперплюма — «прародителя» Сибирской трапповой формации и генетически связанных норильских месторождений. Палинспастическая реконструкция на время 250 Ma тому назад этому соответствует (рис. 4).

Эту гипотезу подтверждает необычайное богатство норильских руд палладием и платиной. Сравним два крупнейших месторождения платины и палладия — Бушвелд в Южной Африке и Норильское в Сибири. Объем магматической системы Бушвелда ~600 000 км³ [Carr, et al., 1999],

магматической системы Норильска ~ 30 км³ (оценка автора). При разнице в объеме в 20 000 раз, ресурсы палладия Норильска примерно равны Бушвелду, платины — только в 6 раз меньше. Таким образом, продуктивность магматической системы Норильска превышает таковую для Бушвелда по палладию примерно в 20 000 раз, по платине примерно в 3000 раз. Столь огромная разница не может быть объяснена никакими процессами дифференциации.

Известно, что в планетах Земной группы максимальные кларки платиновых металлов находятся в их металлических ядрах [Гольдшмидт, Петерс, 1938; Fleet, Stone, 1991; Лазаренков, Таловина, 2000; Ярошевский, 2004]. Из платиновых металлов пал-

ладий — наименее сидерофильтный и максимально халькофильный [Гольдшмидт, Петерс, 1938; Горбачёв и др., 1993; Ярошевский, 2004; Naldrett, 2004]. В ядре Земли по оценкам ведущих геохимиков немало серы. В верхней части жидкого ядра Земли возможно существование обогащенного палладием сульфидного расплава, несмешивающегося с металлическим. Именно такой сульфидный расплав мог попасть в суперплюм, возможно породивший Норильские месторождения с уникальными концентрациями палладия.

Финансирование. Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология Сибирской платформы (ред. И.И. Краснов, М.Л. Лурье, В.Л. Масайтис). М.: Недра, 1966. 447 с.
- Глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1991. 238 с.
- Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
- Гольдшмидт В.М., Петерс К. К геохимии благородных металлов // Сб. статей по геохимии редких элементов. М.; Л.: ГОНТИ НКТП СССР, 1938. С. 98–120.
- Горбачёв Н.С., Бругманн Г.Е., Налдретт А.Дж. и др. Окислительно-восстановительные условия и распределение платиновых металлов в сульфидно-силикатных магматических системах // Докл. РАН. 1993. Т. 331. С. 220–223.
- Изменения окружающей среды и климата. М.: ИГЕМ РАН, 2007. 200 с.
- Корчагин О.А., Цельмович В.А., Поспелов И.И., Цянь-тао Бянь. Космические магнетитовые микросферулы и металлические частицы вблизи границы перми и триаса в точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мейшань, Китай) // Докл. РАН. 2010. Т. 432, № 2. С. 232–238.
- Котульский В.К. К вопросу о происхождении магматических медно-никелевых месторождений // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51. С. 381–384.
- Лазаренков В.Г., Таловина И.В. Геохимия элементов платиновой группы. СПб.: Горный институт, 2000. 265 с.
- Лихачёв А.П. Платино-медно-никелевые и платино-никелевые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
- Люлько В.А., Амосов Ю.Н., Душаткин А.Б. Тектоника, рудоконтролирующие структуры и металлогеническое районирование Игарско-Норильского региона // Металлогенез Сибири. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1987. С. 143–149.
- Люлько В.А., Федоренко В.А., Степанов В.К. Геология и рудные месторождения Норильского района. Путеводитель VII Международного симпозиума по платине. М.; Норильск, 1994. 43 с.
- Масайтис В.Л. Пермский и триасовый вулканизм Сибири: проблемы динамических реконструкций // Зап. ВМО. 1983. Ч. 112. Вып. 4. С. 412–425.
- Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. 231 с.
- Маслов Г.Д. Тектоника Игарско-Норильского района и рудоконтролирующие структуры // Тектоника Сибири. Т. 2. Новосибирск: Наука, 1963. С. 336–350.
- Рябчиков И.Д., Соловова И.П., Нтафлос Т. Субщелочные базальты плато Пutorана (Восточная Сибирь) — условия магмообразования и потенциальная температура мантийного плюма // Докл. РАН. 1999. Т. 369, № 1. С. 107–110.
- Соболев В.С. Петрология траппов Сибирской платформы // Тр. Всесоюзного Арктического института. 1936. Т. 43. Геология. 214 с.
- Спиридовон Э.М. Арфведсонит-флогопитовые мицеллы лампроитовой серии Горного Крыма и Восточно-Сибирской платформы // Петрология и геодинамика геологических процессов. Иркутск, 2021. Т. 3. С. 100–104.
- Спиридовон Э.М. Возможная импактная инициация гигантской Сибирской трапповой формации и уникальных Норильских месторождений. Продуктивность рудоносных интрузивов // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. Апатиты: изд. ФИЦ КНЦ РАН, 2022а. С. 109–112.
- Спиридовон Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, 2019. С. 41–113.
- Спиридовон Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022б. № 6. С. 95–116.
- Спиридовон Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 6. С. 1356–1378.
- Степанов В.К. Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 162. 1981. С. 13–19.
- Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. 1988. Вып. 223. С. 86–94.
- Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. университета, 2004. 194 с.
- Arndt N., Chauvel C., Czamanske G., et al. Two mantle sources, two plumbing systems: tholeitic and alkaline magmatism of the Maymecha River basin, Siberian flood volcanic province // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. Vol. 133. P. 297–313.
- Arndt N.T., Czamanske G., Walker R.J. Geochemistry and origin of the intrusivehost of the Noril'sk — Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 495–515.
- Bowring S.A., Ervin D.M., Jin Y.G. The age of the Permian-Triassic boundary at Meishan, Southern China // Science. 1998. Vol. 280. P. 1039–1045.
- Campbell J.H., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., et al. Synchronism of the Siberian traps and the P-T boundary // Science. 1992. Vol. 258. P. 1760–1763.

- Carion A.* Impacts. Paris: 2017. 58 p.
- Carr H.W., Kruger F.J., Groves D.I., et al.* The petrogenesis of Merensky Reef potholes at the Western Platinum Mine, Bushveld Complex: Sr-isotopic evidence for synmagmatic deformation // Mineral. Deposita. 1999. Vol. 34. P. 335–347.
- Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Stepanov V.K., et al.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of samples from the Noril'sk — Talnach ore-bearing intrusions and the Siberian flood basalts // Eos. 1991. Vol. 72. P. 570.
- Dobretsov N.L.* Siberian superplume // Large igneous provinces of Asia, mantle plumes and metallogeny. Novosibirsk: SB RAS. 2009. P. 1–13.
- Fleet M.E., Stone W.E.* Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. Vol. 55. P. 245–253.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu.* U-Pb zircon and U-Th-Pb perovskite ages for Siberian flood volcanism, Maymecha-Kotuy area, Siberia // J. Conf. Abstr. 2000. Vol. 5. P. 569.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., et al.* Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with Permian — Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 214. P. 73–93.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Krogh T.E.* A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. Vol. 60. P. 3505–3511.
- Lightfoot P.C., Hawkesworth C.S., Hergt J., et al.* Remobilization of the continental lithosphere by mantle plumes: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeitic lavas of the Noril'sk district, Siberian Trap, Russia // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. Vol. 114. P. 171–188.
- Naldrett A.J.* Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2004. 727 p.
- Renne P.R.* Excess $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ in biotite and hornblende from Noril'sk-I intrusion, Siberia: implication for age of Siberian Traps // Earth Planet. Sci. Letter. 1995. Vol. 131. P. 165–176.
- Simonov O.N., Lul'ko V.A., Amosov Yu.N., et al.* Geological structure of the Noril'sk region // Sudbury — Noril'sk Symposium, Ontario Geological Survey, 1994. Spec. Vol. 5. P. 161–170.
- Spiridonov E., Stepanov V., Kulagov E., Belyakov S.* Real relationships of volcanic and orebearing intrusive traps in the Noril'sk ore field, Northern Siberia, Russia // 13th Intern. Platinum Symp. Polokwane, South Africa. 2018. P. 176–177.
- Walker R.J., Morgan J.W., Horan M.F., et al.* Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. P. 4179–4197.
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Bouse R.M., et al.* Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk-Talnakh ores, Siberia // Econ. Geol. 1992. Vol. 87. P. 1153–1165.

Статья поступила в редакцию 04.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК: 552.311:553 (575.1)
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-22-29

РУДОНОСНОСНЫЕ МОНЦОНИТОИДЫ САРЫЧЕКУ АЛМАЛЫКСКОГО РАЙОНА (СРЕДИННЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

Феруза Бахтиёровна Каримова^{1✉}, Денис Икрамович Джуманиязов²

¹ Институт геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева Госкомгеологии РУз (ИГиГ), Ташкент, Республика Узбекистан; karimova.ingeo@mail.ru✉

² Институт геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева Госкомгеологии РУз (ИГиГ), Ташкент, Республика Узбекистан; denisbey@list.ru

Аннотация. В статье приводятся новые фактические материалы месторождения Сарычеку. Также рассматривается распределение петrogenных, рудных и редких элементов в породах основания карьера. Представляется, что редкометалльная специализация обусловлена проявлением штоков кварцодержащих сиенит-порфиров.

Ключевые слова: рудное поле, медно-молибденовое месторождение, благородные, редкие металлы, минералого-geoхимические особенности, золото, серебро, медь, молибден

Для цитирования: Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И. Рудоносные монционитоиды Сарычеку Алмалыкского района (Срединный Тянь-Шань) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 22–29.

ORE-BEARING MONZONITOIDS OF SARYCHEKU ALMALYK DISTRICT (MIDDLE TIEN-SHAN)

Feruza B. Karimova^{1✉}, Denis I. Jumaniyazov²

¹ H.M. Abdullaev Institute of Geology and Geophysics. State Committee of the Republic of Uzbekistan for Geology and Mineral resource, Tashkent, Uzbekistan; karimova.ingeo@mail.ru✉

² H.M. Abdullaev Institute of Geology and Geophysics. State Committee of the Republic of Uzbekistan for Geology and Mineral resource, Tashkent, Uzbekistan; denisbey@list.ru

Abstract. The article presents new factual materials of the Sarychek deposit. The distribution of petrogenic, ore and rare elements in the rocks of the quarry base is also examined. It seems that the rare metal specialization is due to the manifestation of quartz-containing syenite porphyry rods.

Keywords: ore field, copper-molybdenum deposit, noble, rare metals, mineralogical and geochemical features, gold, silver, copper, molybdenum

For citation: Karimova F.B., Jumaniyazov D.I. Ore-bearing monzonitoids of Sarycheku Almalyk district (Middle Tien-Shan). *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 22–29. (In Russ.).

Введение. К геолого-промышленным типам медно-рудных месторождений Узбекистана относятся полиформационные комплексные медно-порфиро- вые месторождения Алмалыкского горнорудного района, в которых медь является ведущим полезным ископаемым, как по запасам промышленных руд, так и по количеству проявлений оруденения.

В настоящее время в районе известны очень многие проявления меди, из них несколько крупных месторождений: Кальмакыр, Ёшлик (Дальнее), Кызата, Сарычеку и др. Руды этих месторождений являются высококомплексными и кроме меди содержат молибден, золото, серебро, серу, рений, селен, теллур и другие компоненты. Полезные ископаемые от этих месторождений добываются открытым способом.

Месторождение Сарычеку расположено в предгорной части северного склона Кураминского хребта, между Мисканским и Саргаламским разломами, на правом борту реки Саукбулак, левого притока реки Ахангаран. Рудовмещающими породами здесь являются порфировые штоки и эфузивы кварцевых

порфиров. Медно-молибденовое месторождение Сарычеку было обнаружено в 1933 г. Начиная с 1955 г. были организованы геологоразведочные работы. Геологическое строение сходно с месторождением Кальмакыр, отрабатывается карьером [Каримова, Джуманиязов, 2023].

Постановка задачи. Почти все медно-порфиро- вые месторождения и рудопроявления Узбекистана находятся в Кураминских горах. Сарычеку является одним из важных медно-порфировых месторождений наряду с Кальмакыром и Ёшлик (Дальним) [Каримова и др., 2023]. Изучение минералогии и геохимии руд глубоких горизонтов месторождения Сарычеку весьма актуально в связи с его отработкой рудником и в связи с повышением комплексности руд.

Медь является обычным элементом для месторождения Сарычеку, который определяет промышленную ценность. Потенциально рудоносны на медь, молибден и благородные металлы малые интрузии гранодиорит-порфиров, выделенные как гуштайского, куюндинского, алмалыкского, джаныбекского

Таблица 1

Химический состав (в вес. %) пород месторождения Сарычеку

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п.п.п.	CO ₂	H ₂ O	SO ₃	Сумма
1	57,5	0,6	14,6	2,0	4,0	0,1	5,6	6,0	2,7	3,3	0,3	3,1	0,4	0,3		100
2	60,3	0,5	15,7	2,3	2,7	0,1	1,8	3,6	1,7	4,1	0,2	5,9	2,3	0,3		102
3	62,4	0,5	15,0	2,4	2,2	0,1	1,9	5,1	1,9	3,6	0,3	3,8	0,6	0,1		100
4	60,9	0,5	15,5	3,0	2,9	0,1	2,1	3,6	3,0	3,6	0,3	3,6	0,4	0,1		100
5	62,9	0,5	15,9	2,5	2,4	0,1	1,8	3,7	2,4	3,7	0,2	3,0	0,8	0,1		100
6	62,6	0,5	15,7	2,7	2,4	0,1	2,0	4,5	1,9	3,3	0,2	3,3	2,7	0,1		102
7	66,0	0,4	14,0	1,4	2,5	0,1	1,2	2,8	2,7	4,4	0,2	3,4	1,2	0,2		101
8	63,5	0,5	15,5	2,0	2,7	0,1	1,9	4,2	2,7	3,7	0,2	2,4	0,5	0,2		100
9	66,9	0,3	14,7	1,3	2,2	0,1	1,0	2,2	3,1	4,3	0,2	2,7	0,9	0,1		100
10	63,7	0,6	13,7	2,7	2,1	0,1	3,1	2,5	0,7	4,9	0,3	4,8	—	—		101,8
11	67,3	0,3	12,8	1,6	1,7	0,1	0,9	2,0	2,8	3,7	0,2	6,4	0,8	0,1		101
12	63,8	0,4	15,4	2,0	2,4	0,1	1,7	3,8	2,5	3,6	0,2	3,1	0,2	0,1		99
13	63,9	0,33	13,3	1,3	2,3	0,1	1,5	4,1	1,1	4,0	0,2	7,1	—	—		99,5
14	51,0	0,7	12,8	3,2	4,5	0,2	7,1	8,7	2,2	2,9	0,4	5,4	—	—		99,1
15	55,6	0,7	14,5	3,3	4,9	0,2	7,5	8,3	2,4	2,4	0,4	4,9	—	—		99,7
16	54,9	0,7	15,4	3,9	3,8	0,1	2,5	3,8	2,6	3,7	0,5	7,9	1,6	0,2		102
17	58,8	0,9	16,3	2,6	3,4	0,2	4,8	1,5	1,9	5,0	0,2	3,6	—	—		100,7
18	61,9	0,8	16,1	0,9	3,5	0,1	4,0	1,5	3,2	4,5	0,2	3,0	0,3	0,1		100
19	54,8	0,4	16,4	2,4	0,4	0,1	0,5	7,9	6,4	2,4	0,2	7,7	—	—		102,7
20	62,4	0,5	16,4	2,9	2,5	0,1	1,6	3,0	4,4	3,4	0,3	1,5	0,2	0,1		99
21	62,7	0,5	15,2	2,5	2,2	0,1	1,7	3,3	4,3	3,1	0,3	3,7	0,1	0,1		100
22	66,0	0,5	14,6	1,9	2,1	0,1	1,2	2,5	3,8	3,9	0,2	2,3	0,6	0,1		100
23	63,9	0,4	15,1	1,7	2,9	0,1	1,6	3,3	3,5	3,7	0,2	2,5	0,1	0,1		99
24	64,3	0,4	14,9	2,1	2,4	0,1	1,4	2,8	3,5	4,2	0,2	2,7	0,2	0,1		99
25	47,9	0,8	15,0	3,4	5,1	0,3	8,0	4,7	2,7	2,1	0,4	8,8	7,1	0,1		106
26	57,2	0,7	16,5	2,4	3,7	0,1	2,1	3,7	5,8	4,0	0,2	2,8	1,1	0,2	0,1	100,3
27	61,2	0,6	11,8	3,5	1,4	0,1	1,2	2,4	4,4	5,7	0,2			0,5		93,0

Примечание: 1–6 — диориты, 7–13 — гранодиориты; 14–15 — монцогаббро; 16 — монцодиориты; 17–19 — монzonиты; 20–24 — кварцевые монzonиты; 25 — эссецит; 26 — трахитовая формация Северного Тамдытая, Кураминская зона (среднее из 32 анализов) [Ахунджанов и др., 2019]; 27 — трахит [Арапов, 1983].

типов и «розовые» Сарычеку. Согласно работе [Медно-порфировые..., 1974], гранодиорит-порфиры «розовые» Сарычеку в других местах Алмалыкского района не установлены. Они обнажаются в виде небольшого штока в центральной части месторождения Сарычеку и являются основной рудовмещающей средой. Порфировые малые интрузии размещены в толщах андезитов и кварцевых порфиров раннего девона и карбонатно-терригенных пород среднего девона-нижнего карбона, прорывают гранодиориты Кураминского батолита (C₂) и ассоциирующие с ними вулканогенные свиты андезидиатитового состава. На месторождении Сарычеку выделены также дайки и некки с эруптивными брекчиями (так называемые «черные» гранодиорит-порфиры, диабазы, диоритовые порфиры, гранодиорит-порфиры

роговообманковые, сиенодиоритовые порфиры, граносиенит-порфиры, сиенит-порфиры и фельзит-порфиры пермского возраста) [Ахунджанов и др., 2023].

Материалы и методы. Из пород современной донной части карьеров месторождения Сарычеку авторами изучены и проанализированы силикатными, химическими, масс-спектрометрическими (ICP-MS-7500 Series Flilent Technologies (Япония)) методами габбро-диориты, гранодиориты, граниты, монцогаббро, монцодиориты, кварцевые монzonиты, монzonиты.

Результаты и их обсуждение. Ранее в публикациях были приведены минералого-геохимические особенности типов и сортов руд медно-порфировых месторождений Ёшлик (Дальнее) и Кальмакыр Ал-

Таблица 2

Нормативный состав (по методу CIPW) пород месторождения Сарычеку

	кварц	анортит	альбит	ортоклаз	корунд	диопсид	гиперстен	ильменит	магнетит	апатит	циркон	хромит
1	6,2	17,3	23,1	22,2		9,0	18,8	1,1	1,5	0,1	0,01	0,04
2	22,3	17,5	15,7	26,8	2,4	—	12,4	1,0	1,3	0,6	0,01	—
3	22,7	22,3	16,4	23,2	—	2,2	10,3	1,0	1,1	0,7	0,01	0,01
4	14,0	16,8	26,2	25,6	0,7	—	14,1	1,0	1,5	0,7	0,01	—
5	20,3	17,5	22,2	24,1	1,2	—	11,9	0,9	1,2	0,6	0,01	—
6	24,1	21,8	16,5	20,9	1,2	—	12,7	0,9	1,3	0,6	0,01	—
7	23,6	13,0	24,1	7,92	—	0,4	8,7	0,8	0,99	0,37	0,03	0,01
8	18,9	18,9	22,9	24,6	—	0,8	11,3	0,9	1,2	0,6	0,01	0,01
9	23,6	30,0	27,1	6,4	0,9	—	7,9	0,7	0,9	0,4	0,01	—
10	26,95	25,7	29,1	30,8	3,4	—	14,97	1,23	1,2	0,6	0,01	0,01
11	29,8	9,3	25,1	25,8	0,6	—	7,5	0,7	0,9	0,4	0,01	—
12	22,3	18,3	21,8	23,5	0,6	—	10,9	0,87	1,1	0,6	0,01	—
13	31,6	20,7	9,98	25,9	0,1	—	9,7	0,7	0,96	0,4	0,01	0,01
14	—	15,5	20,0	21,3	—	22,6	8,7	1,4	1,97	0,9	0,01	0,03
15	—	22,3	20,8	15,7	—	14,9	15,1	1,5	2,1	0,9	0,01	0,04
16	9,1	16,4	23,2	29,8	1,1	—	18,5	1,4	2,0	1,3	0,03	—
17	15,6	6,7	16,5	31,1	5,6	—	20,73	1,8	1,5	0,46	0,03	0,01
18	15,1	6,0	27,8	27,7	3,9	—	16,4	1,5	1,1	0,5	0,03	0,01
19	—	9,4	48,9	15,8	—	10,2	—	0,9	0,7	0,5	0,01	—
20	9,9	13,2	38,1	24,1	—	0,4	11,6	1,0	1,32	0,6	0,01	0,01
21	13,3	12,1	37,0	22,1	—	2,8	9,7	1,0	1,2	0,6	0,01	—
22	18,8	10,3	32,9	26,5	—	1,2	8,1	0,9	1,0	0,5	0,01	—
23	16,5	13,5	10,0	11,5	—	1,9	10,0	0,8	1,2	0,5	0,01	0,01
24	16,2	11,1	30,6	28,8	—	1,57	9,4	0,8	1,1	0,5	0,01	0,01
25	—	22,7	25,1	14,1	0,7	—	24,7	1,6	2,2	1	0,01	0,04

Примечания см. табл. 1.

малыкского рудного района, выявлена их полихронность и полиформационность. Было отмечено, что формирование месторождения Ёшлик связывается с малыми интрузиями диоритов и главным образом монцодиоритов и монцонитов, представляется возможная связь оруденения золота, серебра и платинидов с плутоническими дайковыми образованиями [Karimova, et al., 2022]. На месторождении Кальмакыр определено, что смена медного оруденения с глубиной на медно-молибденовое обусловлено сменой диоритов монцонитоидами. Золотые и серебряные руды представляются наложенным, молодыми и связанными с дайками основного и кислого состава [Karimova, et al., 2023].

Силикатные анализы 25 проб показали широкое разнообразие пород (табл. 1, 2, рис. 1). Большая часть их представлена диоритами и гранодиоритами известково-щелочного ряда. Субщелочная ассоциация пород характеризуется гомодромным рядом монцонитоидов: монцогаббро-монцодиорит (сиенодиорит) — монцонит-кварцевый монцонит. На классификационной диаграмме $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (рис. 1) в поле монцонитов и кварцевых монцонитов локализованы также силикатные анализы сиенит-порфиров и трахитов.

По петрографическим исследованиям пород месторождения Сарычеку можно отметить следующее:

– по индексу насыщенности глиноземом al' 1–3, большинство образцов относятся к высокоглиноземистым и весьма высокоглиноземистыми, и попадают в поле перенасыщенных алюминием пород;

– по индексу фемичности f' 5–12 породы являются лейкократовыми ($\text{f}' < 16$), лишь породы 18, 19 попадают в область мезократовых;

– по индексу железистости Kf умеренно железистыми являются несколько образцов (39–42 %), несколько пород обладают повышенной железистостью (53–58 %), наиболее высокая железистость у гранодиорит-порфиров (59–69 %);

– коэффициент агпантности Ka варьирует в пределах 0,4–0,7, но не превышает 1, следовательно, все количество натрия и калия заключено в полевых шпатах; также породы характеризуются средней и повышенной магнезиальностью (M 0,3–0,6);

– коэффициент окисления железа ϕ в среднем составляет 0,4 (0,3–0,5).

В гипогенных месторождениях медь представлена халькопиритом, борнитом, медным колчеданом (до 4 % Cu). Большая часть меди сосредоточена в халькопирите в глубоких горизонтах изучаемого

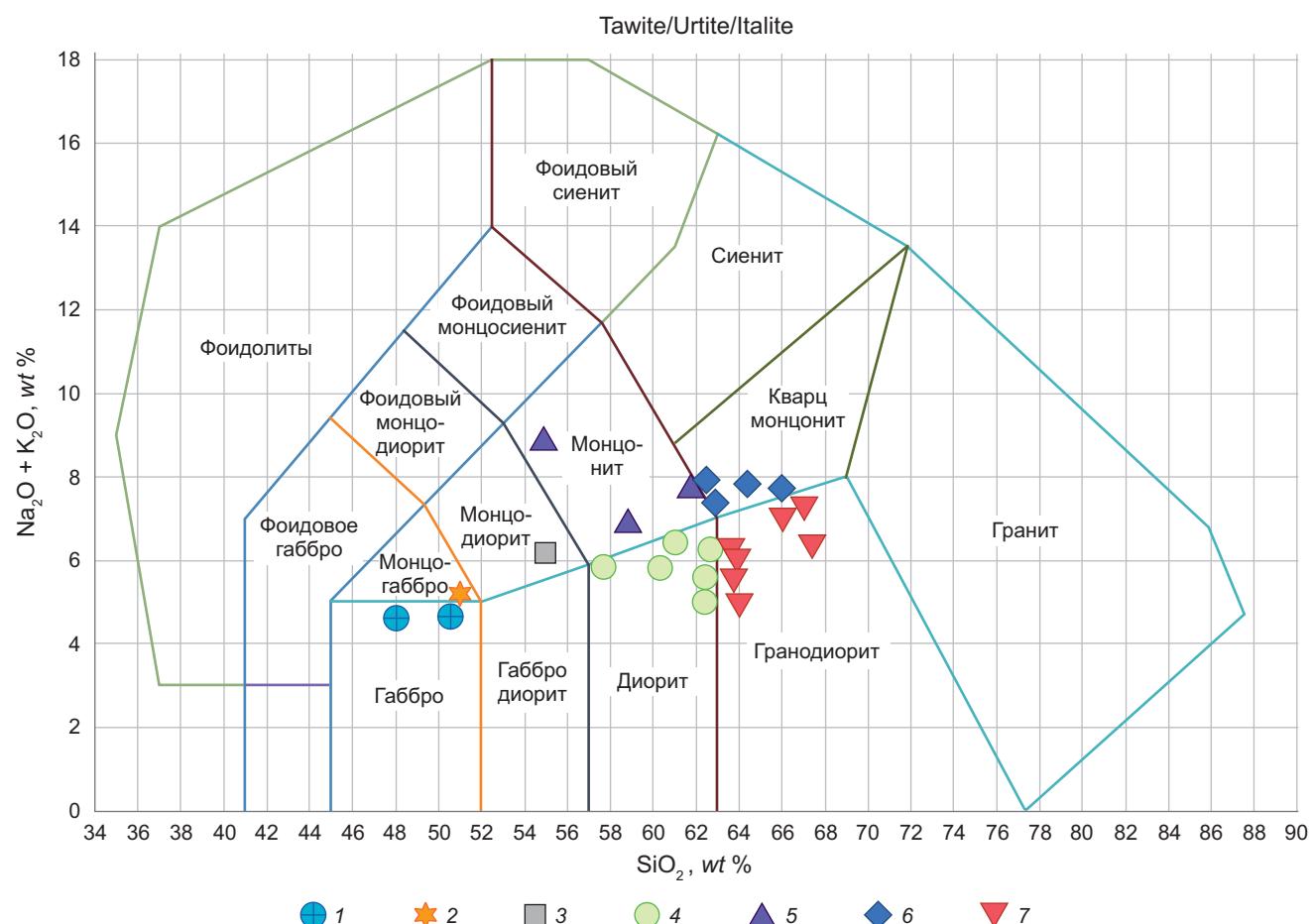


Рис. 1. Диаграмма SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ для пород месторождения Сарычеку: 1 — габбро; 2 — монцогаббро; 3 — монцодиорит; 4 — диорит; 5 — монцонит; 6 — кварцевый монцонит; 7 — гранодиорит

месторождения Сарычеку (рис. 2). В рудах, богатых вторичными сульфидами, встречаются в виде халькопиритов, халькоцитов и купритов. Вторичные медные минералы (малахит, азурит, хризоколла) образуются в зоне окисления [Каримова и др., 2023].

По результатам масс-спектрометрического определения содержания элементов-примесей в образцах горных пород месторождения Сарычеку (61 элемент, 38 проб) сделаны пересчеты на кларки-концентрации в земной коре и построены диаграммы (рис. 3). Определено, что значения следующих элементов оказались несколько выше кларковыми: B, P, Sc, V, Fe, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Sb, Te, Ba, Yb, Hf, W, Re, Au, Pb, Bi и U. Показатели металлоидных и металлических элементов выше кларка во всех образцах. Содержание теллура в 1260 раз больше, чем кларк в земной коре. Висмут в исследованных нами образцах варьирует от 20 до 1511 раз выше кларка. Мышик увеличивается до 3–44 раз по сравнению с кларком в земной коре, что указывает на обилие арсенопирита в полученных породах. Селена в породах в 10–406 раз больше, чем кларк в земной коре. Селен встречается в ассоциации с мышиком, сурьмой и теллуром.

Основными рудообразующими минералами на месторождении считаются пирит, халькопирит, молибденит (рис. 2). Кроме того, халькоzin, борнит,

самородная медь часто встречаются в зоне окисления и вторичного сульфидного обогащения.

По данным химических, пробирных и микрозондовых исследований в продуктивных сульфидах (пирите, халькопирите, молибдените, галените, сфалерите, блеклых рудах) установлены значительные концентрации Se, Te, Bi, Re, Ag, Au и др. [Туресебеков, Василевский, 2006]. Часть вышеперечисленных элементов, находящихся в сульфидах, присутствуют в ультратонкодисперсной форме (невидимые формы), а другая часть образует собственные минеральные формы. Из минералов редких элементов самыми распространенными в количественном отношении являются висмутовые минералы.

По изученным аншифрам горных пород месторождения Сарычеку представляется, что руды медно-порфировой, медно-молибден-порфироворудой ассоциации имеют различные содержания ценных минералов. Содержания рудных минералов в изученных аншифах колеблются от частых зерен до 5–10 %. Преобладают содержания рудных минералов 2–5 %. Текстура рудных минералов в основном вкрапленная, реже прожилково-вкрапленная, прожилковая, гнездовая (агрегативные скопления), редко каемчатая. Структура руд тонкозернистая, мелкозернистая, неравномернозернистая, алло-

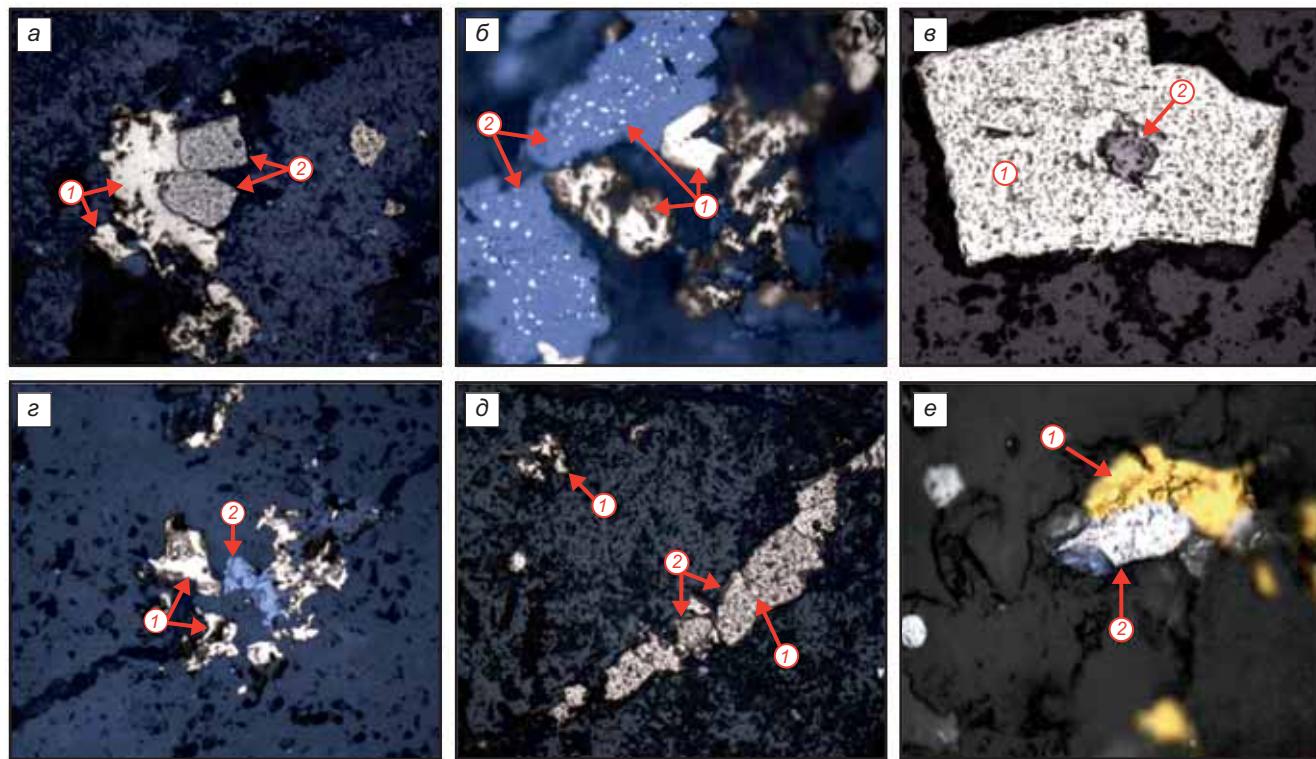


Рис. 2. Фотографии анишлифов в отраженном свете, без анализатора. *а* — увел. 100^х. 1 — халькопирит, 2 — пирит. Сросток пирита с халькопиритом; *б* — увел. 1000^х. 1 — халькопирит, 2 — сфалерит. Тонкие вкрапления в сфалерите; *в* — увел. 200^х. 1 — пирит, 2 — магнетит. Включения магнетита в пирите; *г* — увел. 200^х. 1 — халькопирит, 2 — антимонит. Сросток антимонита с халькопиритом; *д* — увел. 100^х. 1 — халькопирит, 2 — пирит. Прожилок пирита и халькопирита; *е* — увел. 1000^х. 1 — халькопирит, 2 — пирит. Пирит в сростке с халькопиритом

триоморфнозернистая и др. Рудная минерализация представлена в основном сульфидами различных металлов и оксидами железа. Основными сульфидами являются пирит и халькопирит. Оксидные минералы железа представлены магнетитом и гематитом. Изученные анишлифы руд месторождения Сарычеку по минеральному составу представлены сульфидами, в основном халькопиритом и пиритом. В единичных анишлифах установлены борнит и в незначительных количествах ковеллин.

Халькопирит является основным ценным минералом в изученных образцах. Содержание халькопирита в изученных анишлифах колеблется от единичных зерен до 5–7 %, преобладают содержания халькопирита в 1–3 %. Халькопирит присутствует в виде вкраплений, агрегативных сростков с пиритом в прожилках и часто по трещинам пород. Установлены тонкие вкрапления халькопирита в нерудных минералах и пирите. Часто халькопирит развивается в межзерновом пространстве нерудных минералов, образуя аллотроморфную структуру. Отмечается молибденит как попутный минерал, установлен в ассоциации с халькопиритом, реже пиритом в единичных, частых зернах в виде вкраплений в нерудной массе, в сростке с халькопиритом. Также, в единичных зернах отмечается молибденит, галенит, сфалерит, пирротин, антимонит, рутил, ильменит, гидроксиды железа и др.

Последними исследованиями карьера месторождения Сарычеку выявлено широкое разнообразие пород как известково-щелочного (диориты, гранодиориты), так и субщелочного рядов — монцогаббро, монцодиориты, монцониты и кварцевые монцониты. Монцонитоидами сложены штоки и дайки, в которых породы имеют порфировую структуру и основную массу от стекловатой до тонко-мелкозернистой.

Порфировые выделения представлены корродированными таблитчатыми выделениями серicitизированного плагиоклаза в стекловатой основной массе розового цвета и изометричными кристаллами гороховидного кварца. По внешнему виду и микроскопически породы представляются как монцодиориты, сиенит-порфиры и трахиты.

Помимо меди в полиморфационных медных месторождениях также содержатся молибден, золото, серебро, рений, теллур, селен, висмут, платиноиды и другие элементы. Интерес представляют также свинец и цинк, для которых характерны высокие значения средних содержаний и коэффициентов корреляции с главными компонентами (табл. 3).

По результатам анализа среднее количество минеральных элементов составляет (г/т): Cu — 355; Zn — 109; As — 35,49; Se — 3,15; Mo — 20,66; Ag — 1,1; Sn — 2,06; Sb — 1,74; Te — 0,34; W — 4,02; Re — 0,01; Au — 0,29; Pb — 44,22; Bi — 1,38.

Таблица 3

Содержание химических элементов в породах месторождения Сарычеку (г/т)

№ п/п	№ проб	Название породы	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	W	Re	Au	Pb	Bi
1	Cp-3	Диорит	101,2	85,2	34,1	0,5	194	1,1	1,22	2,63	0,3	7,52	0,01	0,01	20,3	2,14
2	Cp-4	Монцонит	2928,2	151	10	13,5	79,9	1,35	4,01	0,97	0,3	4,01	0,01	0,038	21,7	1,22
3	Cp-5	Диорит	45,7	115	9,07	0,5	10,3	0,59	1,88	2,09	0,3	3,36	0,01	0,01	30,6	1,16
4	Cp-6	Монцонит	2178,7	79,2	12,9	20,3	35,9	2,51	5,64	1,65	0,3	4,69	0,01	3,47	25,4	0,35
5	Cp-7	Гранодиорит	88,9	115	22,1	0,5	8,42	1,01	2,62	2,27	0,3	4,69	0,01	0,05	87,9	10
6	Cp-8	Диорит	19,5	91,1	54,1	8,64	6,23	0,56	1,96	3,03	0,3	3,39	0,01	3,47	25,3	0,41
7	Cp-10	Гранодиорит	31,2	96,8	33,3	0,5	4,58	0,56	1,63	1,2	0,3	3,88	0,01	0,01	98,8	0,61
8	Cp-11	Кварцевый монцонит	14,9	100	35	13,5	4,52	0,56	2,21	1,82	0,3	3	0,01	0,01	21,6	0,67
9	Cp-12		123,3	81,7	20,1	0,5	9,37	1,12	1,67	0,92	0,3	2,53	0,01	0,01	20,2	0,84
10	Cp-13	Монцонит	13,4	29,9	26,6	0,5	5	0,75	1,29	0,89	1,26	3,36	0,01	0,01	24,4	4,19
11	Cp-14	Кварцевый монцонит	14,3	57,9	29,9	2,3	2,04	0,42	1,8	1,33	0,3	2,44	0,01	0,01	17,9	0,62
12	Cp-15	Диорит	22,4	90,8	57,2	4,28	4,08	0,95	1,22	0,85	0,3	2,88	0,01	0,01	41,6	0,55
13	Cp-17	Монцодиорит	32,5	137	17,3	1,68	25,8	1,18	1,61	2,74	0,3	2,09	0,01	0,01	42,4	1,07
14	Cp-18	Кварцевый монцонит	32,8	75,1	33,4	3,46	7,96	0,64	1,99	1,67	0,3	1,77	0,01	0,01	45,5	0,62
15	Cp-20	Гранодиорит	188,8	122	16,8	0,5	15,3	0,99	2,12	1,04	0,3	2,47	0,01	0,01	149	0,69
16	Cp-23	Гранодиорит	1708,7	131	12	0,5	49,4	2,9	3,21	2,85	0,3	6,11	0,01	0,03	115	0,94
17	Cp-24	Гранодиорит	23,7	51,1	24	0,5	7,7	1,43	2,67	0,706	0,3	3,1	0,01	0,01	38	0,88
18	Cp-27	Гранодиорит	129,7	93,4	23,5	0,5	5,69	0,62	1,09	1,72	0,3	3,01	0,01	0,01	21,8	0,24
19	Cp-29	Диорит	121,8	97,5	25,3	0,5	8,84	1,22	1,62	2,14	0,3	3,49	0,01	0,01	32,4	2,44
20	Cp-31	Монцогаббро	96,1	151	66,1	3,15	5,1	0,67	1,1	1,31	0,3	7,09	0,01	0,01	24,5	0,51
21	Cp-32	Диорит	112,8	89,4	65,1	0,5	7,27	1,08	1,71	3,03	0,3	6,84	0,01	0,01	32,9	0,32
22	Cp-33	Гранодиорит	30,3	70,2	74,8	0,5	4,74	0,30	2,2	2,2	0,3	2,26	0,01	0,01	22,9	0,18
23	Cp-36	Габбро	123,8	226	50,5	0,5	3,66	0,77	0,97	1,84	0,3	5,52	0,01	0,01	23,1	0,56
24	Cp-37		670,6	331	35,8	0,5	6,49	1,76	2,2	0,62	0,3	4,83	0,01	0,01	92,8	2,83
25	Cp-38	Кварцевый монцонит	17,8	68,5	98,4	0,5	4,2	0,24	1,83	1,93	0,3	6,09	0,01	0,01	29,5	0,26
Среднее содержание			355	109	35,49	3,15	20,66	1,01	2,06	1,74	0,34	4,02	0,01	0,29	44,22	1,38
Кларк элемента (по Виноградову, 1962 г.)			47	83	1,7	0,05	1,1	0,07	2,50	0,05	0,001	1,3	0,001	0,004	16	0,01
Кларк-концентрации			7,6	1,3	20,9	63,1	18,8	14,5	0,8	34,8	338	3,1	14,3	67,7	2,8	152,78
Геохимический ряд степени на- копления			Cu-Zn-As-Se-Mo-Ag-Sn-Sb-Te-W-Re-Au-Pb-Bi													

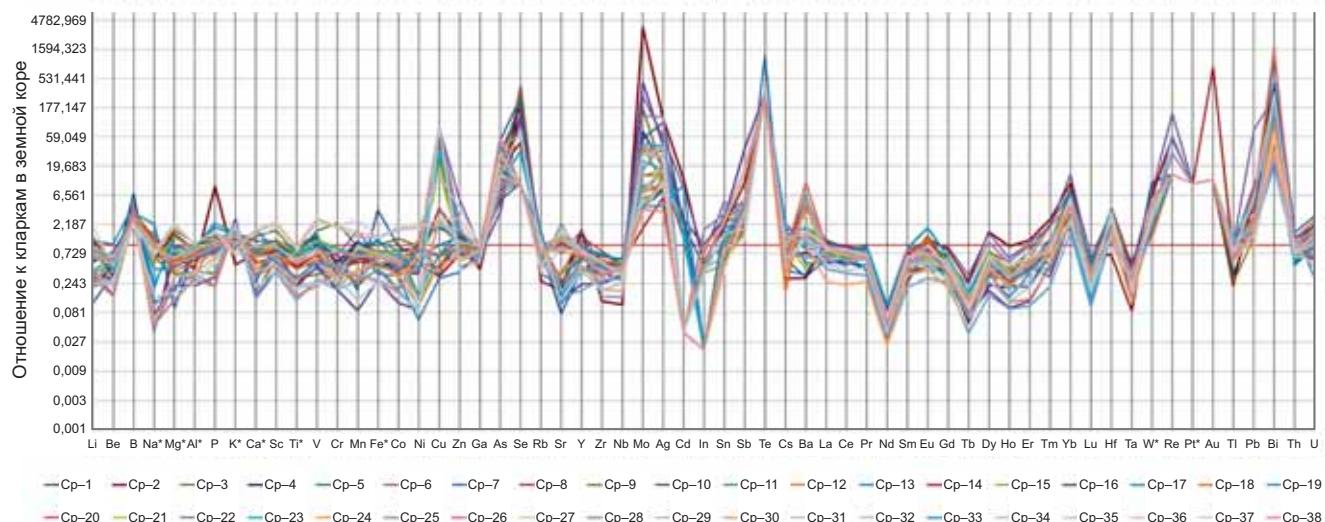


Рис. 3. Спайдерграмма распределения элементов-примесей в горных породах

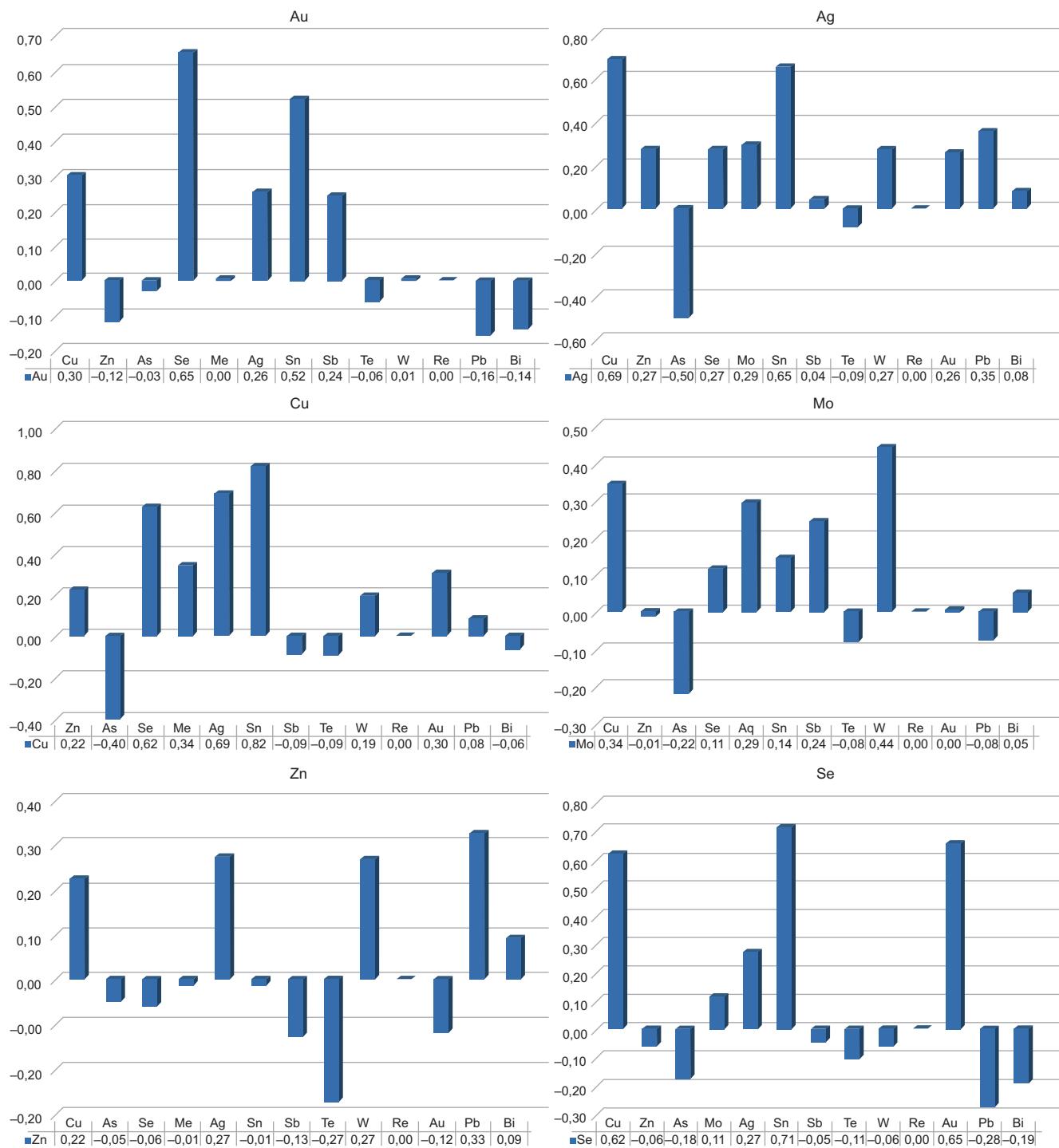


Рис. 4. Гистограмма корреляции рудных элементов месторождения Сарычеку

В породах месторождения Сарычеку рудные элементы взаимосвязано распространены между собой (рис. 4). Для следующих пар мы устанавливаем отношения для отдельных элементов (%):

для золота — медь 0,30, селен 0,65, серебро 0,26, олово 0,52;

для серебра — медь 0,69, мышьяк 0,50, молибден 0,29, олово 0,65, золото 0,26, свинец 0,35;

для меди — серебро 0,74, олово 0,82, сурьма 0,43, рений 0,43;

для молибдена — медь 0,34, серебро 0,29, вольфрам 0,44;

для цинка — серебро 0,27, вольфрам 0,27, свинец 0,33; для селена — медь 0,62, серебро 0,27, олово 0,71, золото 0,65.

Согласно полученным результатам, наряду с золотом и серебром в магматических породах месторождения Сарычеку обнаружены медь, селен, золото, мышьяк, молибден, свинец, сурьма, рений, вольфрам и цинк. Полученные результаты служат дальнейшему развитию минерально-сырьевой базы данного месторождения.

Результаты исследований показали, что в рудах глубоких горизонтов месторождения Сарычеку кро-

ме извлекаемых основных рудообразующих элементов присутствует большое количество элементов-примесей (сelen, теллур, висмут, золото, серебро, рений и др.) и они имеют практический интерес при комплексном использовании руд месторождения. Установлено значительное распространение редкоземельных и уран-ториевых минералов, и выявление минерализации их на глубоких горизонтах месторождения Сарычеку указывает на их тесную связь с вмещающими риолитами.

Выводы. Все образцы имеют вышекларковое значения серебра — от 6 до 115 раз. Сообщается, что значения золота в 11–806 раз больше, чем кларк в земной коре, при этом самые высокие значения составляют 806 раз в монцоните и диорите. Наибольшее количество золота наблюдается в монцонитах. Кроме того, гранодиорит-порфиры и дайки, обнаруженные на месторождении, также содержат небольшое количество золота.

Из результатов анализов проб месторождения Сарычеку значения молибдена доходит до 3636 раз превышающих кларк в земной коре, в форме молибденита отмечается в двух минеральных ассоциациях — в молибденитовой и пирит-халькопиритовой, которые парагенетически связаны с кварц-калишпатовыми и кварц-серицитовыми метасоматитами. Содержание молибдена в первичных рудах колеблется от 0,001 до 0,1 %, и глубина распространения молибденита достигает 300–350 м [Каримова, Джуманиязов, 2023]. С глубиной содер-

жание молибдена увеличивается, максимум развития его приурочено к интервалу 250–300 м.

В целом, можно видеть зараженность пород основания карьера Сарычеку ураном, молибденом, вольфрамом, рением, медью, цинком, свинцом, висмутом, мышьяком, селеном, сурьмой, теллуром, платиной, золотом и серебром. Из распределения редкоземельных элементов видно, что породам свойственно наличие европиевого минимума, что характеризует их как продукты явлений дифференциации, возможно, основной магмы.

Большинство этих элементов наряду с медью и молибденом являются рудными и главными на золото-серебряных месторождениях Алмалык-Ангренской металлогенической зоны. Образование руд Au, Ag, Te, Se, As, U связывается с наиболее поздними дайками лампрофиров [Каримова, 2020] широко представленными на месторождениях Кызылалма и Кочбулак.

Формирование их связывается с малыми интрузиями диоритов и главным образом монцодиоритов и монцонитов. Представляется возможная связь оруденения золота, серебра и платиноидов с плутоническими дайковыми образованиями [Каримова, 2020]. Этими проявлениями разновременных и гетерогенных рудно-магматических систем в пределах Чаткало-Кураминской горячей точки объясняется авторами пространственная совмещённость руд меди, редких, благородных металлов и формирования Большого Алмалыка [Каримова, Джуманиязов, 2022].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арапов В.А. Вулканизм и тектоника Чаткало-Кураминского региона. Ташкент: Фан, 1983. 256 с.
- Ахунджанов Р., Рафиков Я.М., Зенкова С.О., Каримова Ф.Б. Вулканические и плутонические ассоциации Узбекистана: Монография. Ташкент: ГП "ИМР", 2019. 270 с.
- Ахунджанов Р., Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И. Рудно-магматические ассоциации медно-порфировых месторождений Алмалыкского района (Республика Узбекистан) // Геология и минеральные ресурсы. 2023. № 4. С. 30–34.
- Каримова Ф.Б. Плутонические дайки золото-серебряных месторождений Алмалык-Ангренского района. Ташкент: Lesson Press, 2020. 113 с.
- Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И. Минералого-геохимические особенности пород медно-порфировых месторождений Алмалыкского горнорудного района // Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» 19–22 сентября 2023 г., Владивосток. С. 257–260.
- Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И. Полиформационность медно-порфировых месторождений Алмалыка // Материалы международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства — залог прогресса и процветания». Навои, 2022. С. 129–132.
- Каримова Ф.Б., Джуманиязов Д.И., Тевелев А.В. Probable Mineralization of Rocks of the Kalmakyr Deposit, Almalyk District, Central Tien-Shan // Moscow University Geology Bulletin. 2023. 78 (3). P. 349–354.
- Karimova F.B., Jumaniyazov D.I., Usmanova S.V., Tevelev A.V. The Mineralogical and Geochemical Features of the Yoshlik Deposit (Almalyk-Angren Mining Region, Uzbekistan) // Moscow University Geology Bulletin. 2022. 77 (6). P. 710–713.
- Статья поступила в редакцию 11.07.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 28.02.2025

УДК 553.983

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-30-40

ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Екатерина Сергеевна Казак¹✉, Наталья Евгеньевна Шиндина²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kanigu@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; shindina-98@mail.ru

Аннотация. Анализ состава поровых вод представляет собой эффективный диагностический инструмент для интерпретации физико-химических процессов взаимодействия в системе вода-порода. Достоверность результатов изучения состава поровых растворов напрямую зависит от правильности выбора лабораторного метода их извлечения. В статье рассматриваются ведущие современные методы, используемые для получения проб воды из слабопроницаемых отложений, в частности, центрифугирование, пробоотборники Rhizon, отжатие под высоким давлением, а также косвенный метод водных вытяжек и вытеснение вод вязким флюидом. Представлен ряд преимуществ и недостатков данных методов, охарактеризована эффективность их использования для слабопроницаемых пород с различным водосодержанием и свойствами.

Ключевые слова: водонасыщенность, водосодержание, поровые воды, водная вытяжка, ризон, опрессование, минерализация, сланцы, ТРИЗ, слабопроницаемые отложения

Для цитирования: Казак Е.С., Шиндина Н.Е. Лабораторные методы определения состава поровых вод слабопроницаемых отложений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 30–40.

LABORATORY METHODS OF PORE WATER EXTRACTION FROM LOW PERMEABILITY ROCKS TO STUDY ITS CHEMICAL COMPOSITION

Ekaterina S. Kazak¹✉, Natalya E. Shindina²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kanigu@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; shindina-98@mail.ru

Abstract. Pore water composition study is an effective diagnostic tool to understand and interpretate the physical and chemical processes during water-rock interaction. The correct choice of the laboratory extraction method directly defines the quality of its chemical composition results interpretation. The paper reviews the leading modern pore water extraction methods — the centrifugation, Rhizon samplers, high-pressure squeezing, indirect method of water extraction and the method by viscous fluid displacement. The paper presents a number of advantages and disadvantages of these methods, and also characterizes their effectiveness for low permeability rocks with different water saturation.

Keywords: water saturation, water content, pore water, water extraction, rhizon, compression, mineralisation, shale, hard-to-recover reserves, low-permeable sediments

For citation: Kazak E.S., Shindina N.E. Laboratory methods of pore water extraction from low permeability rocks to study its chemical composition. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 30–40. (In Russ.).

Введение. Поровые воды являются частью гидросферы и изучение их химического состава и физико-химических свойств как жидкой фазы горных пород представляет значительный интерес для целей гидрогеологии, геохимии, литологии, нефтяной геологии и пр. Для гидрогеолога знание состава и свойств порового раствора помогает при исследовании происхождения и формирования подземных минерализованных вод и рассолов. Для промысловой геофизики важно знать свойства поровых вод, так как они определяют основные промыслово-геофизические параметры (электрические, электрохимические, нейтронные) [Орлов и др., 1974]. Несмотря на то, что экспериментальное изучение поровых растворов ведется уже около века, получение надежных данных о содержании и составе поровых вод, особенно плотных пород, остается для науки до сих пор актуальной проблемой.

Для слабопроницаемых отложений, особенно для образцов пород с изначально низким водосодержанием (менее 5 масс. %), выполнить прямой отбор пробы пластовой воды из скважины, шурфа, образца и пр. для дальнейшего анализа крайне затруднительно. Поэтому достоверность результатов изучения состава поровых растворов будет преимущественно зависеть от правильности выбора лабораторного метода извлечения поровых вод. При этом выбранный метод должен быть достаточно надежен и в процессе исследования не оказывать влияние на химический состав и физические свойства отбираемой пробы воды.

На сегодняшний день минерализацию и химический состав поровых вод слабопроницаемых образцов можно определить как путем экспериментальных исследований в лаборатории (косвенный метод водных вытяжек, прямой химический анализ

Таблица 1

Примеры соотношения извлеченной при центрифугировании воды с начальной влажностью в зависимости от состава отложений

Состав отложений	Водосодержание, масс. %	% извлечения воды	Источник
Глинистые почвы (глины 43 %, ил 30 %)	25	50	
Песчанистый известняк (глины до 17 %)	25	52	[Mubarak & Olsen, 1976]
Глинистый ил	30	38–40	
Песок	48	35–40	[Batley & Giles, 1979]
Донные осадки (глины до 85 %, CaCO_3 до 10 %)	40–75	40–60	[Sacchi, et al., 2001]
Отложения мела	15–20	40–50	[Edmunds & Bath, 1976]

поровой воды, непосредственно выделенной из образца породы путем применения внешней силы, посредством отжатия, отсасывания, центрифугирования), так и с помощью термодинамических расчетов в системе вода — порода — газ — органическое вещество.

Настоящая статья посвящена рассмотрению теоретических и практических основ как прямых, так и косвенного современных лабораторных методов извлечения поровых вод (центрифугирование, отсасывание (ризоны), опрессовывание (отжатие), водные вытяжки.) из слабопроницаемых отложений с различным водосодержанием, а также сравнительной характеристике преимуществ и недостатков данных методов экстракции.

Метод центрифугирования. Физической основой метода центрифугирования является достижение больших разностей давления на границе двух фаз под действием значительного ускорения в центрифуге в образце водонасыщенной породы, превышающего капиллярное давление в самых крупных порах [Гудок, 2007; Гурский, 2003].

Изначально метод центрифугирования использовался для выделения влаги из почвы с целью характеристики ее физических свойств. Впервые он был применен в 1903 г. Бриггсом и Маклейном для определения «эквивалента влажности» почвы, то есть содержания влаги в образце после того, как избыток воды был уменьшен центрифугированием [Briggs, McLane, 1907]. В дальнейшем такой метод стал применяться для грунтов и донных осадков.

На территории СССР метод центрифугирования в достаточно простой модификации был применен С.В. Бруевичем для выделения поровых растворов из морских илов в 1935–1940 гг. на Каспийском море [Бруевич, Виноградова, 1947]. При этом ограниченные технические возможности позволяли создавать сравнительно невысокие давления при отжатии, что позволяло отделять пробу поровой воды только из очень увлажненных илов (содержание воды более 35 масс. %). Аналогичный метод использовался в 1950–1960-х годах зарубежными исследователями, например, при выделении растворов из грунтов при бурении экспериментальной скважины «Мохол» [Rittenberg, et al., 1963], определении содержания хлоридов в некоторых породах [Swarzenski, 1959] и др.

В настоящее время в мировой практике лабораторных и экспедиционных работ метод центрифугирования применяется достаточно часто для выделения поровых вод из слабопроницаемых отложений. При этом, чем больше влажность осадка (оптимально более 50–60 масс. %), тем больший объем пробы воды можно получить в короткое время.

В работе [Mower, et al., 1994] представлены данные успешного применения метода центрифугирования для извлечения воды как из раздробленных, так и полноразмерных образцов керна туфов с довольно низким содержанием воды (в среднем 11 масс. %).

По данным [Крюков, 1971] в ходе центрифугирования всегда извлекается только часть поровой воды (табл. 1) и непроизвольно возникает вопрос, достаточно ли репрезентативна извлеченная пробы для полноценной характеристики состава раствора в исследуемой системе вода–порода. При этом количество извлеченной воды определяется начальной влажностью, составом отложений, продолжительностью и скоростью центрифугирования, а также другими факторами. Но даже при скоростях более 14000 об/мин неизвлеченными остается 5–15 % порового флюида (порода меловых отложений) [Edmunds & Bath, 1976].

В результате область применения метода центрифугирования ограничивается увлажненными осадками (водосодержание более 30 масс. %), при этом для извлечения представительной пробы воды может потребоваться достаточно большой объем породы [Sacchi, et al., 2001]. Однако, для уплотненных слабопроницаемых пород низкой влажности метод центрифугирования может использоваться как косвенный для определения так называемой неснижаемой водонасыщенности [Андреева, 2016; Зубков, 2015; Кузнецов и др., 2010; Марков-Осогрин и Рубинштейн, 1952; Рубинштейн, 1950; Adams, et al., 2012].

В ходе продолжительного центрифугирования возникает опасность потери части воды за счет испарения. Для предотвращения испарения следует проводить центрифугирование в закрытых пробирках с поддержкой и контролем постоянной температуры [Sacchi, et al., 2001]. Даже при таких условиях не всегда удается предотвратить окисление элементов с переменной валентностью в ходе выделения пробы [Sholkovitz, 1973].

Таблица 2

Сравнительная характеристика основных методов извлечения поровых вод слабопроницаемых пород для дальнейшего анализа их состава

Название метода	Преимущества	Недостатки и сложности
Метод центрифугирования	Удобный, гибкий, относительно быстрый, простой, прямой метод извлечения поровой воды из хорошо увлажненных пород. Возможность контроля факторов изменения состава воды при извлечении. Позволяет определить химический и изотопный состав извлеченных вод.	Не эффективен для слабопроницаемых пород с низкой влажностью (менее 5–15 масс. %). Возможно испарение воды в ходе центрифугирования. Извлекается только часть воды, соответственно сложно оценить представительность пробы для характеристики состава всей поровой воды. Возможно изменение химического состава, Eh, pH в ходе продолжительного центрифугирования и увеличении скорости вращения за счет возникающих физико-химических процессов.
Ризоны	Просты в использовании, мобильны, не требуют пробоподготовки. Сохранение ненарушенного сложения исследуемых кернов. Не требуется фильтрация извлеченной воды для очистки от коллоидных частиц и механических примесей. Не изменяет химический состав пробы при извлечении. Возможно получить пробу с маленьким шагом по глубине колонки.	Извлечение воды из наиболее доступных каналов фильтрации, исключая маломобильные участки. Плохой контроль направлений и расстояния миграции всасываемой жидкости. Мембранный наконечник обладает водопоглощающей способностью, что может увеличить кажущуюся соленость поровой воды, если использовать его без предварительного замачивания. Не подходит для многочисленного использования, так как со временем повреждается мембрана наконечника-фильтра.
Метод отжима	Полный макро- и микрокомпонентный состав поровых вод. Возможно получить раздельно состав свободной и связанной воды. Количественные значения величие pH и Eh порового раствора. Получение изотопного состава порового раствора.	Используется с осторожностью для пород, содержащих в своем составе карбонатные и сульфатные минералы. При превышении порогового внешнего давления — 150–200 МПа поровые растворы будут иметь отличный от истинного химический и изотопный состав. Не эффективен для выделения поровых вод из уплотненных сланцевых отложений с изначально низкой влажностью (менее 5 масс. %). Маленькое количество пробы воды. Потеря водорастворенных газов.
Косвенный метод водных вытяжек	Не требует сложного оборудования. Позволяет точно и быстро определить минерализацию поровых вод преимущественно хлоридно-натриевого состава. Позволяет точно и быстро определить содержание хлора и брома в поровом растворе. Применим на породах после прогрева или экстракции углеводородов.	Не дает представление о реальном pH и Eh, макро-, микрокомпонентом и изотопном составе поровых вод. Протекание процессов растворения и окисления минералов в ходе приготовления водной вытяжки. Дает условное представление о минерализации порового раствора, в составе которого не доминируют хлор и натрий. Невозможно получить раздельно состав свободной и связанной воды.

По мере обезвоживания осадка при центрифугировании может наблюдаться изменение концентрации компонентов выделяемого раствора за счет физико-химических процессов. Так в породах, содержащих глинистые минералы, со временем может наблюдаться снижение минерализации порового раствора за счет его разбавления слабоминерализованной связанной водой, подтянутой в ходе продолжительного центрифугирования [Крюков, 1971]. В работе [Edmunds, 1976] было зафиксировано, что для пород, не содержащих глинистых минералов, при продолжительном центрифугировании также наблюдалось снижение содержания натрия, калия и кальция, в то время как концентрации магния и стронция оставались постоянными. Данное поведение катионов авторы объяснили их различным гидравлическим сопротивлением [Edmunds, 1976]:

согласно уравнению Стокса гидравлическое сопротивление будет намного больше для двухвалентных катионов, чем для одновалентных. Позже, в работе [Steiner, et al., 2018] и др. были экспериментально зафиксированы изменения химического состава, pH и ионной силы порового раствора почв за счет потери CO₂, обогащенного ¹²C, в процессе центрифугирования. Более того, в отложениях, содержащих легкорастворимые минералы (хлориды, гипсы и пр.) возможно их частичное растворение и загрязнение пробы воды продуктами реакции [Крюков, 1971].

Для минимизации вышеуказанных факторов и увеличения эффективности извлечения поровой воды из отложений низкой влажности до (10 масс. %) ряд исследователей [Duncan Moss, Edmunds, 1992] пробовали усовершенствовать метод центрифугирования путем добавления перед процедурой

несмешивающихся жидкостей-вытеснителей с плотностью выше, чем у вытесняемого раствора (например, тетрахлорэтилен, трихлор-трифторметан, фторуглерод и др.). Очевидно, использование техногенной жидкости требует еще большего контроля параметров эксперимента, проверки результатов и в целом такое усовершенствование переводит метод центрифугирования из прямых в косвенные, приближая его к методу увлажненных паст. Поэтому в данной модернизации метод не получил широкого использования.

В целом метод центрифугирования представляет собой удобный, гибкий, относительно быстрый, простой, а главное, прямой метод извлечения поровой воды, при котором изменением ее состава возможно управлять. Метод может быть эффективен для слабопроницаемых отложений с начальной влажностью не менее 30 масс. %, не содержащих в своем составе легкорастворимых минералов. При использовании данного метода следует учитывать литологический и минеральный состав отложений, их физические свойства (влажность, плотность и др.), а также необходимо фиксировать параметры метода (температуру, скорость вращения, время извлечения, количество выделенной воды относительно начальной важности и пр.) для контроля получаемых данных (табл. 2).

Ризоны. Пробоотборники «Rhizon» (ризоны) являются относительно новым способом извлечения поровых вод, впервые разработанным компанией Rhizosphere Research Products в начале 1990-х годов для сельскохозяйственных целей. Ризоны подходят для отбора проб поровой воды как в емкостях или колоннах, заполненных керном, так и в ненарушенном образце. В последние годы пробоотборники «Rhizon» становятся все более популярными для отбора проб поровой воды из почв, а также морских и озерных отложений [Dickens, et al., 2007; Steiner, et al., 2018; Miller, et al., 2017].

Пробоотборники состоят из стандартного шприца с капиллярной ПВХ трубкой и специального наконечника диаметром 2,5 мм и длиной 5–15 см, представляющего собой гидрофильтрный мембранный полимерный фильтр с минимальным размером пор от 0,1 мкм (рис. 1). Вытягивание поршня шприца создает отрицательный градиент давления ($-48,1 \pm 0,5$ кПа, при использовании шприца на 10 мл по данным [Di Bonito, et al., 2008]), за счет которого через фильтр подтягиваются поровые воды. Вода всасывается внутрь через поры пробоотборника до тех пор, пока капиллярное давление в осадке и давление в пробоотборнике не сравняются. Микробные, коллоидные и другие загрязнения не проходят в пробу благодаря достаточно малому размеру пор наконечника [Dickens, et al., 2007], что исключает необходимость дальнейшей фильтрации образцов вод перед последующими анализами.

Скорость извлечения воды зависит от водопроницаемости пород, которая определяется в том

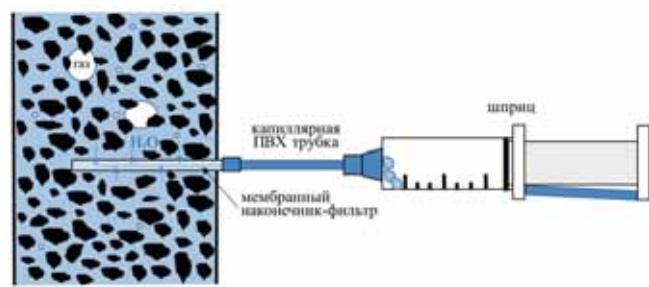


Рис. 1. Схема извлечения поровых вод при помощи пробоотборников Rhizon

числе формой и размерами твердых частиц, а также степенью их уплотнения [Di Bonito, et al., 2008; Falcon-Suarez, et al., 2014]. Время, необходимое для отбора проб, напрямую зависит от коэффициента фильтрации (k) пород. Поровая вода будет извлекаться при $k > 10^{-3}$ м/сут (т. е. и из слабопроницаемых и весьма слабопроницаемых пород) при наличии хорошего гидравлического контакта между грунтом и пробоотборником [Di Bonito, et al., 2008].

Данные пробоотборники просты в использовании, не требуют приложения значительной силы, а также довольно мобильны и не нуждаются в балансировке и прочей сложной настройке. Важным преимуществом пробоотборников Rhizon перед другими методами извлечения подземных вод также является возможность сохранения ненарушенного сложения и текстурно-структурных особенностей исследуемых кернов.

Кроме того, многие исследователи [Dickens, et al., 2007; Miller, et al., 2017] отмечают «плавные» профили распределения концентраций по глубине исследуемых колонок керна (в отличие от метода опрессовывания). То есть концентрации последовательных проб по глубине не имеют высокой степени разброса.

По данным Ди Бонито [Di Bonito, et al., 2008] радиус воздействия больше для более мелкодисперсных (глинистых) почв и меньше для более грубозернистых почв. Также Стайнер с соавторами [Steiner, et al., 2018] отмечают плохой контроль направлений и расстояния миграции всасываемой жидкости. В частности, при помещении наконечника в горизонтальном положении через боковую стенку колонки осадка ненарушенного сложения отмечается больший подток жидкости сверху (выше глубины расположения Rhizon), если в керне есть какая-либо вышележащая вода, что может привести к некорректной оценке химического состава поровых вод на конкретной глубине. Таким образом, для более корректных результатов, стоит вести отбор образцов последовательно сверху вниз, слив вышележащую над керном поверхность воду, если такая есть.

Кроме того, ризоны извлекают воду только из наиболее доступных каналов фильтрации, в меньшей степени воздействуя воды маломобильных участков [Steiner, et al., 2018; Di Bonito, et al., 2008].

Следовательно, пробоотборники могут неадекватно учитывать пространственную изменчивость состава и представлять «точечные выборки» с качественными, а не количественными атрибутами.

Производители, а также некоторые исследователи [Di Bonito, et al., 2008] отмечают, что Rhizon следует использовать предпочтительно в качестве одноразового устройства, чтобы избежать уменьшения пористости со временем в связи с износом материала и накоплением органических веществ, что значительно увеличивает затраты на пробоотбор. Хотя другие ученые доказывают на основании своих исследований, что пока мембрана остается неповрежденной, тщательно промытые Rhizon сразу после использования, дают удовлетворительные, а во многих случаях и лучшие результаты, чем новые Rhizon, при исследовании основных компонентов состава поровых вод [Steiner, et al., 2018].

Миллер и др. [Miller, et al., 2014] обращают внимание на еще одну особенность пробоотборников: мембранный наконечник обладает водопоглощающей способностью, что может увеличить кажущуюся соленость поровой воды. Однако [Steiner, et al., 2018] приходят к выводу, что эта ошибка исчезает, если перед использованием пробоотборников замочить наконечники в дистиллированной воде (в таком случае важно промыть пробоотборник пробой не менее двух раз — слить первые 600 мкл выделившейся пробы).

Таким образом, использование пробоотборников Rhizon является наиболее мобильным, а также простым и удобным прямым методом извлечения поровой воды, не требующим дополнительной фильтрации пробы. Метод может быть эффективен для слабопроницаемых отложений при $k > 10^{-3}$ м/сут и наличии хорошего гидравлического контакта между грунтом и пробоотборником. Однако, для получения более корректных результатов, следует заранее замачивать и промывать наконечник-фильтр с неповрежденной мембраной, а также вести отбор образцов сверху вниз последовательно (табл. 2).

Сравнение результатов химического анализа поровых вод, полученных с помощью Rhizon и центрифугирования, дает схожие результаты для многих компонентов химического состава [Di Bonito, et al., 2008; Steiner, et al., 2018; Dickens, et al., 2007], хотя авторы и описывают некоторые незначительные различия, связанные с тем, что методы извлекают разные составляющие поровой жидкости.

Метод опрессовывания (отжатия поровых вод). Метод опрессовывания основан на извлечении поровых флюидов путем сжатия образца и является наиболее широко используемым методом отбора проб поровой воды из донных отложений, особенно тех, которые хорошо уплотнены и отобраны с глубины водоемов более 1000 м. Данный метод также используется для извлечения поровых флюидов из глин и аргиллитов с низкой проницаемостью. Отжатие поровых вод прессами по сути аналогично

естественному процессу уплотнения пород с течением геологического времени, но только вызвано искусственно и протекает с большей скоростью.

Метод отжатия вод впервые стал применяться при исследованиях почв и лечебных грязей, для чего использовались винтовые и гидравлические ручные прессы с небольшим давлением. В 1940-х годах П.А. Крюков разработал устройство, позволяющее путем сжатия образца под высокой нагрузкой легко извлекать поровые жидкости из отложений горных пород. В дальнейшем П.А. Крюков [Крюков, 1971] предложил несколько специальных приборов для опрессовывания (прессформы) горных пород, подробно и достоверно обосновал методику выделения поровых вод, проанализировав возникающие погрешности и недостатки данного метода. Разработанные им приборы и методики нашли широкое применение для отжатия почвенных, иловых, горных растворов как в России, так и за рубежом [Шишкина, 1972; Гурский, 2003; Mudroch, MacKnight, 1994 и др.].

Данный метод был успешно использован для горных пород, например, для слабо консолидированных глинистых отложений с содержанием воды 15–25 масс. % (давление отжима 10–70 МПа) [Fernández & Villar, 2010], или плотных глин и сланцев при содержании воды 6–8 масс. % (давление отжима 70–200 МПа) [Fernández, 2014; Masurek, 2015].

Некоторые исследователи экспериментально фиксировали увеличение концентрации некоторых компонентов в отжимаемой поровой воде [Kharaka & Berry, 1973], а другие (например, [Крюков, 1971; Шишкина, 1972; Masurek, 2015 и др.]) наоборот наблюдали обратный эффект — заметное уменьшение концентрации растворенных веществ с увеличением экстракции поровой жидкости.

Шишкина О.В. [1972] экспериментально установила, что при давлениях 0–200 и 0–400 кг/см² как общая концентрация, так и концентрация отдельных ионов не меняется. Изменение концентрации ионов растворов начинается при давлениях примерно 600–700 кг/см² и становится значительным при более высоких давлениях (более 1500–2000 кг/см²). Изменение концентраций отдельных ионов зависит главным образом от характера пород, исходной влажности и их соотношений в растворе. При этом при давлении до 202 кг/см² выделяется до 80–87 % всей содержащейся в осадке воды, а остаточная влажность составляет 16–23 масс %. Махнейм [Mahnheim, 1974] не обнаружил изменения концентрации хлора донных осадков Атлантического океана до 600 кг/см² (59 МПа). П.А. Крюков привел более широкий диапазон давлений (от 1 до 1260 кг/см² или 0,98–1236 · 10⁵ Па) для горных пород, при котором не наблюдалось практически изменений состава отжимаемого порового раствора [Крюков, 1971]. Кроме того, опытным путем было показано [Богашова и др., 1981], что при отжимании вод под высоким давлением имеет значение время нагрузки: в случае

быстрого опрессовывания ($1569 \cdot 10^5$ Па, менее 2 сут) не происходит изменение минерализации и макросостава раствора, при медленном опрессовывании (до 2-х недель) незначительные изменения в составе появляются уже при $941 \cdot 10^5$ Па, а при $1569 \cdot 10^5$ Па наблюдается снижение минерализации на 10 % от первоначального значения. В работе [Гурский, 2003] для морских осадков показано, что в интервале давления 50–150 бар (10^5 Па) экспериментально наблюдается постоянство состава биогенных элементов и макрокомпонентов в выделяемых поровых водах. При этом равномерный и не слишком длительный во времени режим опрессовывания позволяет получить более однородный состав отжимаемой воды. Таким образом, для хорошо увлажненных донных осадков (в идеале влажностью более 50 масс. %) получение кондиционной пробы методом опрессовывания может быть достигнуто при равномерных, не слишком продолжительных по времени (менее 2 сут) давлениях до 150–200 10^5 Па.

В случае использования метода отжима для получения представительной пробы поровой воды из низкопроницаемых глинистых отложений с изначально низкой влажностью необходимо применять более длительные и высокие нагрузки, что неизбежно приведет к изменению химического состава выделяемого раствора. При этом данные изменения могут быть связаны не только с процессами разбавления отжимами слабоминерализованными связанными водой и процессами мембранный фильтрации (избирательная задержка солей уплотняющейся породой), но и с процессами окисления и восстановления в ходе проникновения кислорода при длительном извлечении, или растворением минералов под воздействием роста давления и температуры в эксперименте. Для снижения данных негативных факторов используются отжимные устройства с контролем температуры в анаэробных условиях [Sacchi, et al., 2001].

Практическая оценка предельных возможностей применения метода опрессовывания для выделения растворов из слабопроницаемых пород с изначально низкой влажностью приведена в работах [Fernández, et al., 2014; Mazurek, et al., 2015]. Fernández и соавторы [Fernández, et al., 2014] проводили эксперименты по извлечению поровых вод из слабопроницаемых плотных аргиллитов формации Opalinus Clay (Монт-Терри, Швейцария) (изначальная влажность 6,2–7,8 масс. %). В результате была установлена хорошая воспроизводимость метода, а минерализация и изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) поровых вод, извлекаемых в диапазоне давлений от 70 до 175 МПа были постоянны и соответствовали составу подземных вод, приток которых был получен в скважины. Однако [Fernández, et al., 2014] не исключили, что величина порогового давления для получения кондиционного состава поровых вод может измениться для других отложений и рекомендовали перед началом проведения потоковых

экспериментов определять это значение. Мазурик и соавторы [Mazurek, et al., 2015] извлекали поровую воду из плотных глинистых образцов (содержание глинистых минералов 28–71 масс. %) с начальным водосодержанием 3,5–5,6 масс. % при давлениях отжима 200, 300, 400 и 500 МПа и установили изменение химического и изотопного состава отжатых вод по мере увеличения давления. Снижение содержания Cl^- , Br^- , Na^+ и K^+ связано по мнению [Mazurek, et al., 2015] с процессами ионной фильтрации в процессе схлопывания порового пространства во время сжатия. Причина повышения концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} — растворение карбонатных минералов при увеличении давления. Результаты сравнения химического и изотопного состава отжатых поровых вод с данными водных вытяжек и прямого анализа подземных вод показали, что только состав воды, полученный при 200 МПа, наиболее близко соответствует реальному.

Таким образом, использовать метод отжима для получения пробы поровой воды необходимо с осторожностью для пород, содержащих в своем составе карбонатные и сульфатные минералы, обязательно не превышая установленное пороговое значение внешнего давления — 150–200 МПа. В противном случае отжимные растворы будут иметь отличный от истинного химический и изотопный состав. Следует отметить, что данный метод может быть не эффективен для выделения поровых вод из уплотненных сланцевых отложений с изначально низкой влажностью (менее 5 масс. %), так как порогового давления в 150–200 МПа может быть недостаточно для извлечения представительной пробы раствора (табл. 2).

Рядом исследователей метод отжима был усложнен путем добавления функции вытеснения вязким флюидом. При этом боковая поверхность образца керна герметизируется и производится фильтрация сверху вытесняющей жидкости (вязкое масло, керосин и пр.) под давлением 5–50 МПа [Орлов и др., 1974; 1981]. Остаточная вода пород из продуктивной части обычно находится в порах с радиусом менее 0,2–0,3 мкм и удерживается там капиллярным давлением, величина которого лежит в пределах 5–50 МПа. Фильтрация производится на специально разработанной установке, позволяющей создавать и поддерживать высокие давления нагнетания вязкого вытесняющего флюида (до 90 МПа). При изменении нагрузки возможно получить представительную пробу как свободной, так и связанной воды и напрямую измерить их химический и изотопный состав (табл. 2). Однако проведение испытания требует достаточно сложного оборудования, а время эксперимента может достигать до 1 месяца и более. Метод не нашел широкого применения и используется для решения нишевых задач.

Метод водных вытяжек. В лабораторной практике определение состава и минерализации поровой воды горных пород стараются выполнять путем

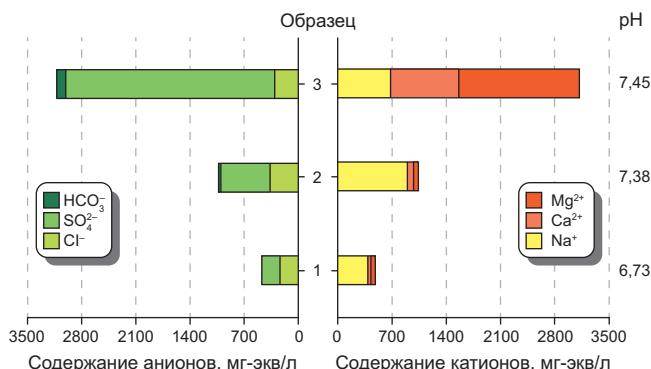


Рис. 2. Сопоставление pH и состава порового раствора, полученного из майкопской аргиллитоподобной глины (Гаша, скв. №1, глубина 1771 м): 1 — опрессовыванием при естественной влажности 6,4 масс.%; 2 — опрессовыванием с предварительным увлажнением до 14,2 масс.%; 3 — методом водной вытяжки при соотношении вода:порода как 2,5:1 (по [Крюков, 1971])

прямого анализа непосредственно выделенного порового раствора. Однако при работе с низкопроницаемыми отложениями с изначально низким водосодержанием (менее 5 масс.%) не всегда возможно выделить неизмененную поровую воды для ее дальнейшего анализа, поэтому прибегают к более простому альтернативному косвенному методу водных вытяжек [Di Bonito, et al., 2008; Sacchi, et al., 2001].

Метод заключается в том, что в одной пробе определяют количество поровой воды, а в параллельной или в той же пробе — количество водорастворимых солей поровой воды путем анализа состава водной вытяжки. Из концентрации компонента в водной вытяжке вычисляется его концентрация в поровом растворе с учетом коэффициента разбавления порового раствора объемом водной вытяжки.

Впервые метод водных вытяжек был применен для изучения состава почвенных поровых растворов в России в конце XIX века И.М. Комовым и А.Н. Радищевым [Гедройц, 1906], а зарубежом в начале XX века Камероном [Cameron, 1920]. Позже появились первые экспериментальные наблюдения, связанные с неоднозначностями использования метода водных вытяжек для получения состава порового раствора. В работе [Parker, 1921] впервые отмечено, что содержание кальция увеличивается более чем в 2 раза в растворах водных вытяжек из почв, чем в спиртовых. В работе [Mattson, et al., 1949] впервые показано, что иммобилизация фосфатов и снижение их содержания в процессе разбавления поровых растворов почв подчиняется законам мембранныго равновесия Доннана.

Условность результатов состава водных вытяжек для характеристики поровых вод была также отмечена А.Д. Архангельским и Э.С. Залманзоном [Архангельский и др., 1931] в связи с растворением углекислого кальция и окислением сульфидов в процессе водной экстракции.

В работе П.А. Крюкова [1971] установлено, что состав водных вытяжек при пересчете на естественную влажность не соответствует составу исходного по-

рового раствора: в разы увеличивается содержания кальция, магния, натрия, гидрокарбонат и сульфат ионов (рис. 2). При этом максимальное искажение минерализации поровой воды, рассчитанной по водной вытяжке, происходит в карбонатных и сульфатных породах за счет повышенной растворимости порообразующих минералов. Для песчаных пород, по экспериментальным данным П.А. Крюкова [1971], концентрация хлора, оцененная по данным водных вытяжек, оказывается очень близка к его реальному содержанию в поровой воде.

Следует отметить, что параллельно с этими исследованиями появился ряд работ, который безусловно использовал результаты состава водных вытяжек для получения состава поровых вод горных пород. Поводом к этому послужила работа [Mangelsdorf, et al., 1969], в которой экспериментально показано, что содержания K^+ в экстрактах водных вытяжек при различном соотношении воды и глинистого осадка изменяется линейно и сделано смелое утверждение, что такое же поведение должно быть и для других катионов в растворе. Девайн и соавторы [Devine, et al., 1973] также поддержали данную концепцию в своей статье.

Шмидт [Schmidt, 1975] одним из первых использовал метод водных вытяжек для определения состава поровых вод однородных «чистых» сланцев из месторождения Manchester (штат Луизиана), бассейн Gulf Coast (США). В результате было обнаружено, что состав поровых вод сланцевых отложений $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$ сильно отличается от состава пластовых вод перекрывающих песчаников ($Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$). Г.В. Шмидт, опираясь на выводы [Mangelsdorf, et al., 1969] и [Devine, et al., 1973], полностью перенес состав водных вытяжек на состав поровых вод сланцевых отложений, не учитывая минеральный состав пород и, по нашему мнению, ошибочно связал полученное различие с процессами селективной мембранный фильтрации. Хотя, как уже отмечалось выше, к началу исследований Шмидта было опубликовано достаточно работ (например, [Архангельский и Залманзон, 1931; Бунеев, 1956; Крюков, 1971; Шишкина, 1972; Parker, 1921; Mattson, et al., 1949; Manheim, 1974]), отражающих трудности правильной оценки состава порового раствора методами водных вытяжек как для почв так и для горных пород без учета минерального состава.

Принципиальная важность использования минерального состава отложений для анализа результатов водных вытяжек была показана в работе [Von Damm & Johnson, 1987] для 12 образцов сланцевых пород. Ученые обнаружили, что состав водных вытяжек кардинально отличается от составов подземных вод данных отложений преимущественно за счет возрастания концентраций SO_4^{2-} , Na^+ или Ca^{2+} . Был сделан вывод, что сульфаты являются экспериментальным артефактом, возникающим в результате окисления пирита, для сланцев без пирита было установлено низкое содержание SO_4^{2-} в растворах во-

дных вытяжек. Изменение содержания Ca^{2+} связали с растворением кальцита. Последующее проведение термодинамического моделирования подтвердило, что наличие пирита в составе отложений является наиболее важным параметром при формировании кислых pH растворов водных вытяжек, в то время как наличие карбонатов имеет решающее значение для буферизации растворов.

Позже Фонтеин [Fontanine, et al., 1993] для образцов итальянской плио-плейстоценовой формации сравнил состав поровых вод полученных методами водной вытяжки и прямого отжатия. В результате, он не нашел подтверждения предположениям [Mangelsdorf, et al., 1969] и [Devine, et al., 1973] и не получил линейных зависимостей для Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ и HCO_3^- , также прияя к выводу о необходимости использования данных минерального состава отложений для интерпретации результатов водной вытяжки.

В работе [Aquilina, et al., 1994] для обогащенных глиной горных пород Южного бассейна Франции была проведена серия постановочных экспериментов по изучению влияния на состав водной вытяжки таких параметров, как соотношение вода:порода, время взаимодействия, метод встряхивания (вращение или ультразвук) и степень влажности образца. Им удалось установить, что метод встряхивания не влияет на результат эксперимента, а оптимальное соотношение воды к породе составляет 2:1 при времени взаимодействия 4 ч (увеличении времени или соотношения приводит к возрастают концентрации всех макрокомпонентов; также при данном соотношении вода:порода сушка образца не играет роли). Важно отметить, что [Aquilina, et al., 1994] также не обнаружили линейного изменения концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} при различном соотношении вода:порода.

В работах [Arrhenius, 1953; Edmunds, et al., 1976; Fernández, et al., 2014; Kullenberg, 1952; Manheim, 1974; Reinik, et al., 2015; Swarzenski, 1959; Казак и др., 2018] показано, что источником хлора в растворах водных вытяжек являются преимущественно водорастворимые хлорсодержащие соли порового раствора, что позволяет достаточно точно получить его содержание в поровой воде. В работе [Mazurek, et al., 2015] метод водных вытяжек уверенно используется для оценки оставшейся после опрессовывания (200–500 мПа) концентрации хлора в образцах слабопроницаемых сланцевых пород.

В работе [Fernández, et al., 2014] представлены результаты экспериментального изучения состава поровых растворов плотных глинистых пород из Монт-Терри (Швейцария) с водосодержанием от 6,2 до 7,8 %, полученные методом опрессовывания и водных вытяжек. Показано, что помимо концентрации хлора, содержание брома в водных вытяжках при пересчете с учетом естественной влажности хорошо согласуется с их содержанием в отжатом поровом растворе. Для других макрокомпонентов совпадения результатов не получено.

Аналогично в работе [Казак и др., 2018] для слабоуплотненных донных осадков Баренцева моря установлено, что концентрацию Cl^- , Na^+ и Br^- в поровом растворе донных осадков Баренцева моря можно довольно достоверно вычислять по результатам анализов растворов водных вытяжек с учетом естественной влажности (рис. 3, a, в), в то время как превышения pH, концентраций SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , B^+ и Ba^{2+} связаны не только с ошибкой разбавления порового раствора дистиллированной водой в ходе приготовления водной вытяжки, но и с дополнительным растворением измельченных минералов, а также с процессами ионного обмена, и не могут быть достоверно вычислены (рис. 3).

Следует отметить, что некоторые исследователи полагают, что в ряде случаев источником хлора также могут являться не только соли порового раствора, но и обменный комплекс, который поставляет хлор в ходе анионного обмена. В работе [Walters, 1967] показано, что полностью удалить Cl^- из образца глины удается только после 5–8 горячих водных вытяжек и ультразвуковой обработки, и сделано предположение, что некоторый анионный обмен может удерживать ионы Cl^- в глинах. Сложность полного извлечения хлора водной вытяжкой также поднимается в работах [Bischoff, et al., 1970; Porewater, 2000]. Однако, как отмечено в работах [Kriukov, et al., 1982; Крюков, 1971] такого эффекта не установлено для осадков с высоким содержанием хлоридов в поровой воде при нейтральном pH, при котором проводится водная вытяжка, выше точки нулевого заряда (TH3), что исключает анионный обмен.

В работах [Казак и др., 2017; Казак и др., 2018] показано, что для плотных образцов георгиевской, баженовской и ачимовской свит как до так и после экстракции составы поровых вод по методу водных вытяжек кардинально отличаются от измеренного напрямую химического состава подземной воды: появляется SO_4^{2-} , резко возрастает доля HCO_3^- и Ca^{2+} .

Получается, что как для почв, так и для горных пород различного состава и степени литификации наблюдается принципиальное отличие химического состава реального порового раствора и условного, полученного по данным водных вытяжек (табл. 2). Приготовление водных вытяжек вызывает не только разбавление порового раствора, которое легко можно было бы учесть, а ряд сложных изменений состояния равновесия между раствором и твердой фазой: дополнительное растворение солей, сдвиг равновесий гидролиза, изменение условий адсорбционных равновесий между поглощающим комплексом и раствором, особенно сильно проявляющихся для глинистых минералов. В результате возможности достоверной оценки состава порового раствора с помощью косвенного метода водных вытяжек сокращаются до определения только хлора, брома, натрия и, возможно, йода, как представителя галогенидов. Следует отметить, что исследования относительно поведения йода при приготовлении

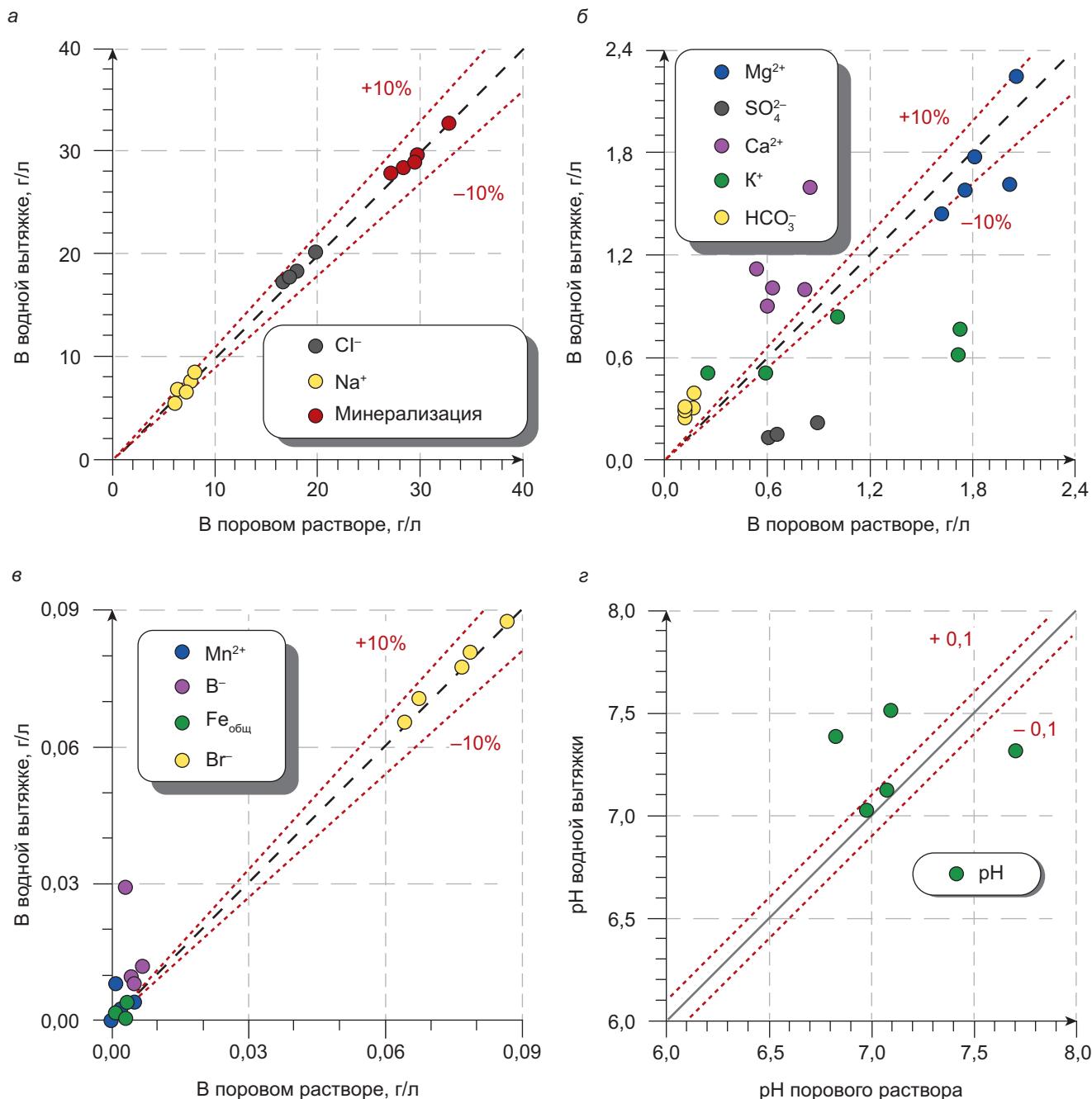


Рис. 3. Сопоставление минерализации (а), содержания основных компонентов состава (а, б, в) и pH (г) поровых вод образцов донных отложений Баренцева моря, непосредственно измеренных в выделенном поровом растворе и рассчитанных по данным анализа водных вытяжек с учетом естественной влажности отложений [Казак и др., 2018].

водной вытяжки до сих пор не проводились. Возможность оценки содержания микроэлементов и редкоземельных элементов в составе поровых вод слабопроницаемых пород с помощью метода водных вытяжек также полностью не оценивались.

Заключение. Изучение химического и изотопного состава поровых вод слабопроницаемых пород до сих пор представляет собой сложную и неоднозначно решенную задачу. Основная трудность связана с процессом извлечения представительной для анализа пробы воды из образца слабопроницаемой породы, а особенно из образца с изначально низким водосодержанием (менее 5 масс. %). Согласно проведенным исследованиям наиболее эффективно

использовать следующие методы извлечения поровой воды: центрифугирование, опрессовывание (отжатия под высоким давлением), извлечение с помощью пробоотборников низкого давления — Rhizon, вытеснение вязким флюидом, а также косвенный метод водных вытяжек. Каждый из этих методов имеет свои положительные и отрицательные стороны, а также существенные ограничения при исследовании поровых вод слабопроницаемых пород с низким водосодержанием (табл. 2). Однако, главным критерием при выборе способа выделения пробы поровой воды должно являться минимальное изменение ее химического и изотопного состава в ходе извлечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Р.Ю. Сопоставление значений капиллярного давления, полученных методами центрифугирования и капиллярометрии // Научный журнал. Геология. 2016. Т. 10–15.
- Архангельский А.Д., Залманзон Э.С. Сравнительное литологическое исследование по вопросу о происхождении подземных вод Грозненских нефтяных месторождений // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1931. Т. IX. С. 3–4.
- Богашиова Л.Г., Валяшико М.Г., Родионова И.П. и др. Экспериментальное изучение закономерностей формирования поровых растворов // Закономерности формирования химического состава природных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С. 99–107.
- Бруевич С.В., Виноградова Е.Г. Химический состав грунтовых растворов Каспийского моря // Гидро-хим. мат-лы. 1947. Т. 13. С. 129–186.
- Бунеев А.Н. Основы гидрогеохимии минеральных вод осадочных отложений. М.: Медгиз, 1956. 288 с.
- Гедройц К.К. К вопросу об изменяемости концентрации почвенного раствора и содержания в очве легкорасторимых соединений в зависимости от внешних условий // Журнал опытного агронома. 1906. Т. VII. С. 521–545.
- Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 592 с.
- Гурский Ю.Н. Геохимия литогидросферы внутренних морей. Т. 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 247–265.
- Зубков М.Ю. Понятие «остаточная водонасыщенность» и возможность ее определения в лабораторных условиях // Каротажник. 2015. Т. 7. С. 63–78.
- Казак Е.С., Богданович Н.Н., Казак А.В. и др. Оценка содержания остаточной поровой воды и анализ состава водных вытяжек пород баженовской свиты Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2017. Т. 4. С. 48–52.
- Казак Е.С., Сорокоумова Я.В., Ахманов Г.Г. и др. Изучение состава поровых растворов косвенным методом водных вытяжек // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 4. С. 54–71.
- Казак Е.С., Харитонова Н.А., Казак А.В. Минерализация и макрокомпонентный состав поровых вод пород баженовской, ачимовской и георгиевской свит (по данным водных вытяжек) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 5. С. 100–110.
- Крюков П.А. Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1971. С. 219.
- Кузнецов А.М., Башнев А.Б., Кузнецов В.В. Определение начальной водонасыщенности и капиллярной кривой методом центрифугирования // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. 2010. С. 49–51.
- Марков-Осоргин А., Рубинштейн Л.И. Определение содержания погребенной воды методом центрифугирования. Новости нефтяной техники // Нефтепромысловое дело. 1952. С. 31–33.
- Орлов Л.И., Лавров А.П., Манжалей Н.Т. Комплексное изучение поровых растворов и пластовых вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. 1974. С. 147–171.
- Орлов Л.И., Топорков В.Г. Способ извлечения поровых вод вытеснением маслом // Авторское свидетельство СССР, БИ. 1981. Т. N894485. С. 2.
- Рубинштейн Л.И. Об определении содержания погребенной воды // Башкирская нефть. 1950. Т. 2. С. 27–32.
- Шишкина О.В. Геохимия морских и океанических иловых вод. М.: Наука, 1972. 228 с.
- Adams J.W., Stocker C.D., La N.R. Emerging centrifugal technology in shale hydraulic fracturing waste management. 2012. C. 561–562.
- Aquilina L., Boulegue J., Sureau J.F., Bariac T. EVution of Interstitial Waters along the Passive Margin of the South-east Basin of France: WELCOM (Well Chemical On-line Monitoring) Applied to Balazuc-1 well (Ardèche) // Applied Geochemistry. 1994. Vol. 9. P. 657–675.
- Arrhenius G.O.S. Sediment Cores from the East Pacific. Reports of the Swedish Deep-Sea Expedition, 1947–48 // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. 1953. Vol. 75. P. 115–118.
- Batley G.E., Giles M.S. Solvent displacement of sediment interstitial waters before trace metal analysis // Water Research. 1979. Vol. 13. № 9. P. 879–886.
- Bischoff J.L., Greer R.E., Luistro A.O. Composition of Interstitial Waters of Marine Sediments: Temperature of Squeezing Effect // Science. 1970. Vol. 167. P. 1245–1246.
- Briggs L.J., McLane J.W. The moisture equivalent of soils // U.S. Dept. Agriculture, Bureau of Soils Bull. 1907. Vol. 45. P. 1–23.
- Cameron F.K. The soil solution, the nutrient medium for plant growth, Easton, Pa, The Chemical publishing co.; [etc., etc.]. 1920. 150 p.
- Devine S.B., Ferrel R.E., Billings G.K. The significance of ion exchange to interstitial solutions in clayey sediments, Chemical Geology. 1973. Vol. 12. P. 219–228.
- Di Bonito M., Breward N., Crout N., et al. Overview of Selected Soil Pore Water Extraction Methods for the Determination of Potentially Toxic Elements in Contaminated Soils // Operational and Technical Aspects. 2008. P. 213–249.
- Dickens G.R., Koelling M., Smith D.C., Schnieders L. Rhizon Sampling of Pore Waters on Scientific Drilling Expeditions: An Example from the IODP Expedition 302, Arctic Coring Expedition (ACEX) // Scientific Drilling. 2007. № 4. P. 22–25.
- Duncan Moss P., Edmunds W.M. Processes controlling acid attenuation in the unsaturated zone of a Triassic sandstone aquifer (U.K.), in the absence of carbonate minerals // Applied Geochemistry. 1992. Т. 7. № 6. С. 573–583.
- Edmunds W.M., Bath A.H. Centrifuge extraction and chemical analysis of interstitial waters // Environmental Science & Technology. 1976. Vol. 10. P. 467–472.
- Falcon-Suarez I., Rammlmair D., Juncosa-Rivera R., Delgado-Martin J. Application of Rhizon SMS for the assessment of the hydrodynamic properties of unconsolidated fine-grained materials // Engineering Geology. 2014. Vol. 172. P. 69–76.
- Fernández A.M., Sánchez-Ledesma D.M., Tournassat C., et al. Applying the squeezing technique to highly consolidated clayrocks for pore water characterisation: Lessons learned from experiments at the Mont Terri Rock Laboratory // Applied Geochemistry. 2014. Vol. 49. P. 2–21.
- Fernández A.M., Villar M. V. Geochemical behaviour of a bentonite barrier in the laboratory after up to 8 years of heating and hydration // Applied Geochemistry. 2010. Vol. 25. № 6. P. 809–824.
- Fontanive A., Gragnani R., Mignuzzi C., et al. Chemical Composition of Porewaters in Italian Plio-Pleistocene Clayey Formations // Geochemistry of Clay-Pore fluid interactions, Springer. 1993. Vol. 84. P. 389–411.
- Kharaka Y.K., Berry F.A.P. Simultaneous flow of water and solutes through geological membranes—I. Experimental

investigation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. Vol. 37. № 12. P. 2577–2603.

Kullenberg B. On the Salinity of the Water Contained in Marine Sediments. *Oceanografiska institutet*. Göteborg, Sweden, Elanders boktr, 1952. P. 38.

Mangelsdorf P.C., Wilson T.R.S., Daniell E. Potassium Enrichments in Interstitial Waters of Recent Marine Sediments // *Science*. 1969. Vol. 165. P. 171–174.

Manheim F.T. Comparative Studies on Extraction of Sediment Interstitial Waters: Discussion and Comment on the Current State of Interstitial Water Studies // *Clays and Clay Minerals*. 1974. Vol. 2. P. 337–343.

Mattson S., Eriksson Y., Vahtras K., Willia E.G. Phosphate Relationships of Soil and Plant: I. Membrane Equilibria and Phosphate Uptake // *Ann. Royal Agric. College*, Sweden. 1949. Vol. 16. P. 457–484.

Mazurek M., Oyama T., Wersin P., Alt-Epping P. Pore-water squeezing from indurated shales // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 400. P. 106–121.

Miller C.M., Dickens G.R., Jakobsson M., et al. Pore water geochemistry along continental slopes north of the East Siberian Sea: inference of low methane concentrations // *Biogeosciences*. 2017. № 14. P. 2929–2953.

Miller M.D., Adkins J.F., Hodell D.A. Rhizon sampler alteration of deep ocean sediment interstitial water samples, as indicated by chloride concentration and oxygen and hydrogen isotopes // *Geochem. Geophys. Geosy.* 2014. № 15. P. 2401–2413.

Mower T.E., Higgins J.D., Yang I.C., et al. Pore-water extraction from unsaturated tuff by triaxial and one-dimensional compression methods. Nevada: Nevada Test Site, 1994. 86 p.

Mubarak A., Olsen R.A. Immiscible displacement of the soil solution by centrifugation // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1976. Vol. 40. P. 329–331.

Mudroch A., MacKnight S.D. Handbook of Techniques for Aquatic Sediments Sampling. Boca Raton: CRC Press, 1994. 256 p.

Parker F.W. Methods of Studying the Concentration and Composition of the Soil Solution // *Soil Science*. 1921. Vol. 12. P. 209–232.

Porewater Extraction from Argillaceous Rocks for Geochemical Characterisation. Paris, France, Nuc. En. Ag. Org. for Econ. Co-Operation and Develop, 2000. 187 p.

Reinik J., Irha N., Steinnes E., Piirisalu E., et al. Characterization of water extracts of oil shale retorting residues form gaseous and solid heat carrier processes. 2015. P. 443–451.

Rittenberg S.C., et al. Biogeochemistry of sediments in experimental Mochole // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1963. Vol. 33, № 1. P. 140–172.

Sacchi E., Michelot J.-L., Pitsch H., et al. Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterisation: Methods, processes and current understanding // *Hydrogeology Journal*. 2001. Vol. 9. P. 17–33.

Schmidt G.W. Interstitial Water Composition and Geochemistry of Deep Gulf Coast Shales and Sandstones: REPLY TO MILES F. OSMASTON1 // *AAPG Bulletin*. 1975. Vol. 59. P. 721–721.

Sholkovitz E. Interstitial water chemistry of the Santa Barbara Basin sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. Vol. 37. № 9. P. 2043–2073.

Steiner Z., Lazar B., Erez J., Turchyn A.V. Comparing Rhizon samplers and centrifugation for pore-water separation in studies of the marine carbonate system in sediments // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2018. Vol. 16. P. 828–839.

Swarzenski W.V. Determination of Chloride in Water from Core Samples: *GEOLOGICAL NOTES1* // *AAPG Bulletin*. 1959. Vol. 43. P. 1995–1998.

Von Damm K.L., Johnson K.O. Geochemistry of Shale Groundwaters: Results of Preliminary Laboratory Leaching Experiments United States. 1987. P. 34.

Walters L.J.J. Bound halogens in sediments. Doctoral Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1967.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК 553.3/.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-41-46

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СИЛИКАТНОГО НИКЕЛЯ

Александр Александрович Борисов¹✉, Михаил Александрович Богуславский²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; borisov@vims-geo.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mikhail@geol.msu.ru

Аннотация. В работе рассмотрены основные факторы формирования Буруктальского месторождения, включающие палеогеографические, палеоклиматические, морфологические, петрологические и эндогенные. Составлена поэтапная схема развития коры выветривания, предусматривающая полигенный генезис месторождения. В результате сравнительного анализа выделены основные черты, сходства и различия условий образования никеленосных кор выветривания Южного Урала и Новой Каледонии.

Ключевые слова: Буруктальское месторождение, коры выветривания, силикатный никель, кобальт, серпентиниты, условия корообразования, генезис

Для цитирования: Борисов А.А., Богуславский М.А. Факторы формирования Буруктальского месторождения силикатного никеля // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 41–46.

FACTORS IN THE FORMATION OF THE BURUKTAL NICKEL SILICATE DEPOSIT

Alexander A. Borisov¹✉, Mikhail A. Boguslavsky²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; borisov@vims-geo.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mikhail@geol.msu.ru

Annotation. The paper examines the main factors of the formation of the Buruktal deposit, including paleogeographic, paleoclimatic, morphological, petrological and endogenous. A step-by-step scheme for the development of the weathering crust has been drawn up, providing for the polygenic genesis of the deposit. As a result of a comparative analysis, the main features, similarities and differences in the conditions for the formation of nickel-bearing weathering crusts in the Southern Urals and New Caledonia were identified.

Key words: Buruktal deposit, weathering crusts, nickel silicate, cobalt, serpentinites, crust formation conditions, genesis

For citation: Borisov A.A., Boguslavsky M.A. Factors in the formation of the Buruktal nickel silicate deposit. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 41–46. (In Russ.).

Введение. Месторождения никеля в мире представлены тремя основными геолого-промышленными типами: сульфидные медно-никелевые, силикатные никелевые и гидротермальные арсенидные. Наибольшее количество мировых запасов никеля (63 %) связано с силикатно-никелевым типом [Методические..., 2007], представляющим из себя коры выветривания ультраосновных пород. В России ведущими в запасах и добыче являются месторождения медно-никелевого типа.

Одним из крупнейших месторождений силикатного никеля в РФ является Буруктальское месторождение, расположенное в Оренбургской области (рис. 1).

В данной статье рассмотрены основные факторы, обуславливающие формирование месторождения, а также предложена модель его образования.

Геологическое строение Буруктальского месторождения. Буруктальское месторождение приурочено к коре выветривания одноименного массива ультраосновных пород. Буруктальский массив ультрамафитов верхнедевонского возраста в плане имеет подковообразную форму, прорван более поздней

серийой жильных образований различного состава мелового возраста. Месторождение разделяется на семь участков, образующих отдельные промышленные скопления никеля и кобальта (рис. 2).

Рудные залежи представлены линейно-площадной корой выветривания ультрамафитов с пологим субгоризонтальным залеганием. Мощность коры выветривания изменяется от первых до 70 м, в среднем составляя 15 м. Содержания никеля изменяются от 0,2 % до 2 %, в среднем составляя 0,89 %. Содержания кобальта — от 0,01 % до 0,5 %, в среднем составляя 0,08 %.

Кровля коры пологая и ровная, соответствует подошве неоген-четвертичных отложений, подошва — извилистая, часто с карманами и впадинами. Разрез коры характеризуется ярко выраженной зональностью, типичной для латеритных кор выветривания (рис. 3).

В разрезе коры выделяются следующие зоны: зона охр в верхней части разреза, зона нонtronитов в средней части, и зона выщелоченных и карбонизированных серпентинитов в нижней. Корнями коры



Рис. 1. Обзорная карта района Буруктальского месторождения

выветривания является зона карбонатизированных серпентинитов, для которых характерно присутствие магнезита. Магнезит образовался за счет выноса магния при выветривании вышележащего серпентинита [Гинзбург и др., 1947]. Таким образом, горизонт карбонатизированных серпентинитов имеет инфильтрационный генезис.

Над зоной карбонатизированных серпентинитов расположен горизонт выщелоченных серпентинитов. Выщелоченные серпентиниты представлены слабо разложенными породами, сохранившими исходные структуры. Для этой зоны характерны минералы группы серпентина и незначительное количество нонtronита, количество которого увеличивается в верхней части горизонта.

Над горизонтом выщелоченных серпентинитов расположен горизонт нонtronитов, сложенный преимущественно нонtronитами, реже вермикулитом, клинохлором, тальком или гетитом [Таловина, 2012]. В пределах Буруктальского месторождения зона нонtronитов пользуется наиболее широким распространением, именно с ней связана большая часть промышленного кобальт-никелевого оруденения.

На верхних горизонтах коры выветривания выделяется зона охр. Они представлены двумя структурными разновидностями: в нижней части залежи структурными охрами, сохранившими структуру серпентинитового субстрата, а в верхней — бесструктурными охрами, являющимися конечным продуктом выветривания. Руды обоих разновидностей состоят преимущественно из гетита, гидрогетита и клинохлора [Рыжкова, 2010].

Наиболее богатыми по содержанию никеля и кобальта являются горизонты охр, нонtronитов, а также верхняя часть зоны выщелоченных серпентинитов. Основные рудные минералы — нонtronит, гетит и клинохлор.

Среди факторов, обуславливающих формирование Буруктальского месторождения, выделяются палеогеографические, палеоклиматические, петрологические, морфологические и эндогенные.

Палеогеографические факторы. Расположение древних морей оказывало прямое влияние на формирование кор выветривания, так как процессы,

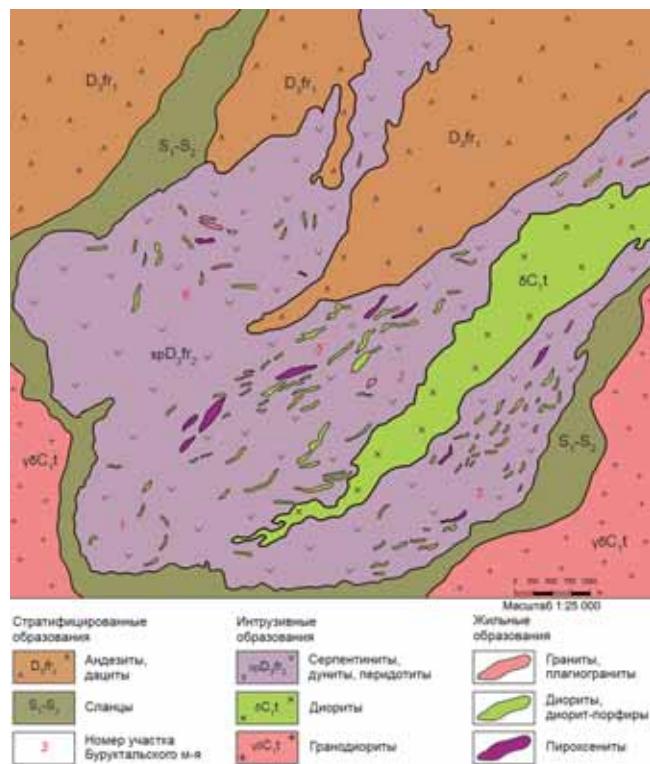


Рис. 2. Геологическая карта района Буруктальского месторождения [Устинов, Лосев, 1968] с изменениями и дополнениями

приводящие к образованию кор, происходили только в периоды регрессий. В эпохи трансгрессии эти процессы приостанавливались, а коры подвергались частичному или полному размыву.

Буруктальское месторождение расположено в Урало-Казахстанском районе. После того, как эта область стала эпигерцинской платформой, смена суши и моря происходила неоднократно.

К концу Пермского периода Урал представлял собой высокогорье, резко расчлененный рельеф которого не был благоприятен для формирования кор выветривания. В начале триасового периода на Урале происходили складчатые движения, но, в основном, этот период характеризовался разрушением горных цепей и сносом материала в предгорные впадины с постепенным выплаживанием рельефа [Никитин, 1970].

Вероятно, в среднем и верхнем триасе, в районе Буруктальского синклиниория создавались условия, благоприятные для формирования кор выветривания. В юрском периоде Урал продолжал оставаться сушей, но местами водные бассейны занимали большие пространства. В конце юры и начале мелового периода происходила трансгрессия, достигавшая максимума в конце верхнего мела, в то время как суши сохранялась только вдоль осевой части хребта. Начало олигоцена характеризовалось регрессией и в верхнем палеогене распределение суши и моря снова, как и в раннем мезозое, благоприятствовало формированию кор выветривания ультраосновных пород.

Палеоклиматические условия. Значение фактора климата в образовании и сохранении кор выветривания также весьма велико. Выветривание горных пород на сушу происходит при любых климатических условиях, однако наиболее интенсивно эти процессы развиваются в тропическом климате, для которого характерны высокие температуры и большое количество осадков. Роль климатических факторов заключается не только в активном непосредственном воздействии атмосферы на горные породы, но и в создании условий для разветвленной гидрографической сети и усилении агрессивной деятельности грунтовых вод.

Развитие Уральского поднятия в мезозое происходило в платформенных условиях жаркого и влажного климата, что создало благоприятную физико-химическую обстановку для интенсивного развития эпигенетических процессов. Специфическая геолого-климатическая обстановка в сочетании с непрерывным подъемом территории и дифференциальными подвижками отдельных блоков способствовали накоплению мощного чехла коры выветривания. Поэтому по климатическим условиям конец палеозоя и начало мезозоя были эпохой наиболее интенсивного и широкого корообразования. После меловой трансгрессии и последовавшей затем в начале палеогена регрессии, пространства этой огромной складчатой области длительное время находились в климатических условиях, хотя и изменившихся в худшую сторону (уменьшение тепла и влаги), но все же достаточно благоприятных для возобновления корообразования [Никитин, Глазовский, 1970]. Таким образом, верхний палеоген является для Урала второй эпохой корообразования.

Петрологические факторы (состав субстрата). В остаточных корах выветривания, к которым относится Буруктальское месторождение, полезные

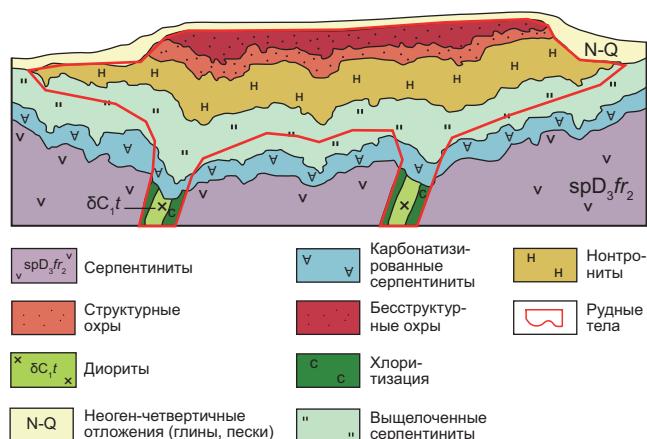


Рис. 3. Геологический разрез Буруктальского месторождения

компоненты не привносились извне, а присутствовали в исходном субстрате. Поэтому ключевое значение для концентрации никеля и кобальта в силикатных корах имеет содержание этих металлов в исходных материнских породах.

В таблице, приведенной по материалам [Никитин, Глазовский, 1970], отражены содержания никеля и кобальта в различных ультраосновных массивах России.

Можно отметить, что наиболее высокие концентрации никеля и кобальта характерны для ультраосновных пород дунитовой и перидотитовой формации, а также их разновидностей, подвергнутым серпентинизации. При этом в породах основного состава, входящих в состав массивов, в первую очередь габброидах и пироксенитах, содержание металлов меньше в 2–3 раза.

При прочих благоприятных для выветривания факторах на субстрате основного состава формируются мощные коры, но промышленные скопления

Таблица

Содержание никеля и кобальта в породах ультраосновных массивов России и СНГ

Порода	Содержание NiO, %	Содержание CoO, %	Автор
Кемпирсайский массив			
ультрабазиты в целом	0,37	0,003	Бакиров, 1961
дунитовые серпентиниты	0,39	–	
перидотитовые серпентиниты	0,39	–	
пироксениты, горнблендиты	0,12	0,01	
габброиды	0,09	0,001	
Шевченковский массив			
серпентинизированные ультрабазиты	0,25	0,009	Пономарев, 1934
пироксениты	0,11	0,003	
габброиды	0,12	0	
Буруктальский массив			
серпентиниты	0,24	0,01	Никитин, 1970
Западная Тува			
ультраосновные породы	0,2	–	Еремеев, 1968 Сибилев, 1980

никеля при этом не образуются, поскольку содержания этого металла в коренных породах более низкое.

Буруктальский массив сложен серпентинизированными дунитами и перидотитами с повышенными содержаниями никеля. Ультраосновной состав субстрата способствовал дальнейшему формированию гипергенного месторождения при образовании кор выветривания на всей приповерхностной части массива ультрамафитов.

Морфологические условия. Для формирования мощных остаточных рудоносных кор выветривания необходимо определенное положение базиса эрозии, которое обеспечивает глубокое и эффективное пропускание грунтовых вод через верхнюю зону коренных пород. Существенное значение для корообразования имеет степень дренирования подстилающей ее морфоструктуры. Для последующей сохранности коры важно насколько эта морфоструктура выполнена. С другой стороны, процессы образования кор выветривания, в свою очередь, влияют на формирование рельефа. Чем более интенсивно они протекают, тем более выполненными и стяженными становятся морфологические структуры рельефа. Таким образом, между приподнятыми пенепленизованными участками и развитыми на них корах выветривания существует причинно-следственная связь [Витовская, Бугельский, 1982].

Район Уральского поднятия, к которому приурочено Буруктальское месторождение, является областью завершенной палеозойской складчатости. Развитие процессов выравнивания в этом районе привело к образованию пенеплена в раннем мезозое, занимающего большие пространства и сохранившегося до современности. В районе самого Буруктального месторождения рельеф несколько приподнят, что способствовало более глубокому проникновению грунтовых вод в коренные породы и развитию мощной коры с характерной зональностью.

Эндогенные факторы. Экзогенная природа формирования Буруктального месторождения не поддается сомнению: коры выветривания связаны, в первую очередь, с гипергенными процессами. Однако, накопление никеля и кобальта связано также с эндогенными процессами.

Развитие герцинской складчатости в карбоне сопровождалось внедрением интрузий диоритов и гранитоидов. Процессы метасоматоза в субстрате ультрамафитов, протекавшие под влиянием «границы», оказывали воздействие на перераспределение никеля и других когерентных элементов, вызывая вынос их из одних участков субстрата и привнос в другие, повышая их рудоносность. В результате образовавшиеся контактовые метасоматиты аккумулировали металлы, как выщелоченные при метасоматозе, так и элементы, привнесенные гидротермальными растворами [Сагдиева и др., 2016; Таловина, 2012]. В результате метасоматической переработки субстрата вдоль контакта даек

с ультрамафитами сформировались хлоритовые руды с повышенными содержаниями никеля.

Этапы формирования Буруктального месторождения. Основные этапы развития коры выветривания Буруктального массива ультрабазитов приведены на рис. 4.

В девонском периоде, во время активизации герцинского тектономагматического цикла, был сформирован Буруктальский ультраосновной массив.

В каменноугольном периоде герцинская складчатость сопровождалась магматизмом среднего и основного состава. В результате метасоматической переработки субстрата формировались хлоритовые руды с повышенным содержанием никеля и кобальта в зоне контакта интрузий и ультрамафитов.

С наступлением мезозоя заканчивается эпоха герцинской складчатости и Урал переходит на платформенную стадию развития. Первый этап корообразования приурочен к триасу: в это время сочетание всех необходимых условий (пенеплен, регрессия и жаркий климат) приводит к развитию процессов дезинтеграции и выщелачивания серпентинитов.

На протяжении юрского периода благоприятные для выветривания условия сохранялись, при этом происходило развитие кор с формированием характерной зональности: наиболее интенсивно проработанные охры в верхней части разреза, зоны нонtronитизации в средней части и более слабо измененные участки выщелоченных серпентинитов в нижней части разреза. После юры суши начинает постепенно опускаться, верхнемеловое море практически целиком покрывает Южный Урал и процессы корообразования приостанавливаются.

Регрессия в начале кайнозоя знаменует второй период корообразования — палеогеновый. В этот период морские отложения полностью денудируются, а мезозойская кора повторно подвергается процессам выветривания, при этом увеличивается ее мощность и сложность строения.

Сравнение с месторождениями силикатного никеля Новой Каледонии. Большая часть мировых запасов силикатного никеля связана с современными корами выветривания, расположенными тропическом поясом. Одна из крупнейших рудных провинций — Новая Каледония [Elias, 2002; Tamehe, et al., 2024]. Условия формирования группы месторождений на этом архипелаге во многом схожи с Буруктальным месторождением.

Исходным субстратом для образования никеленосных кор выветривания в Новой Каледонии послужили гарцбургиты и серпентиниты: ультраосновные породы семейства перидотитов [Wells, et al., 2009], аналогичные по составу Буруктальному массиву ультрамафитов. Морфологические и климатические условия также похожи: приподнятая пенепленизованная поверхность, жаркий и влажный климат с высокими средними температурами и большим количеством осадков.

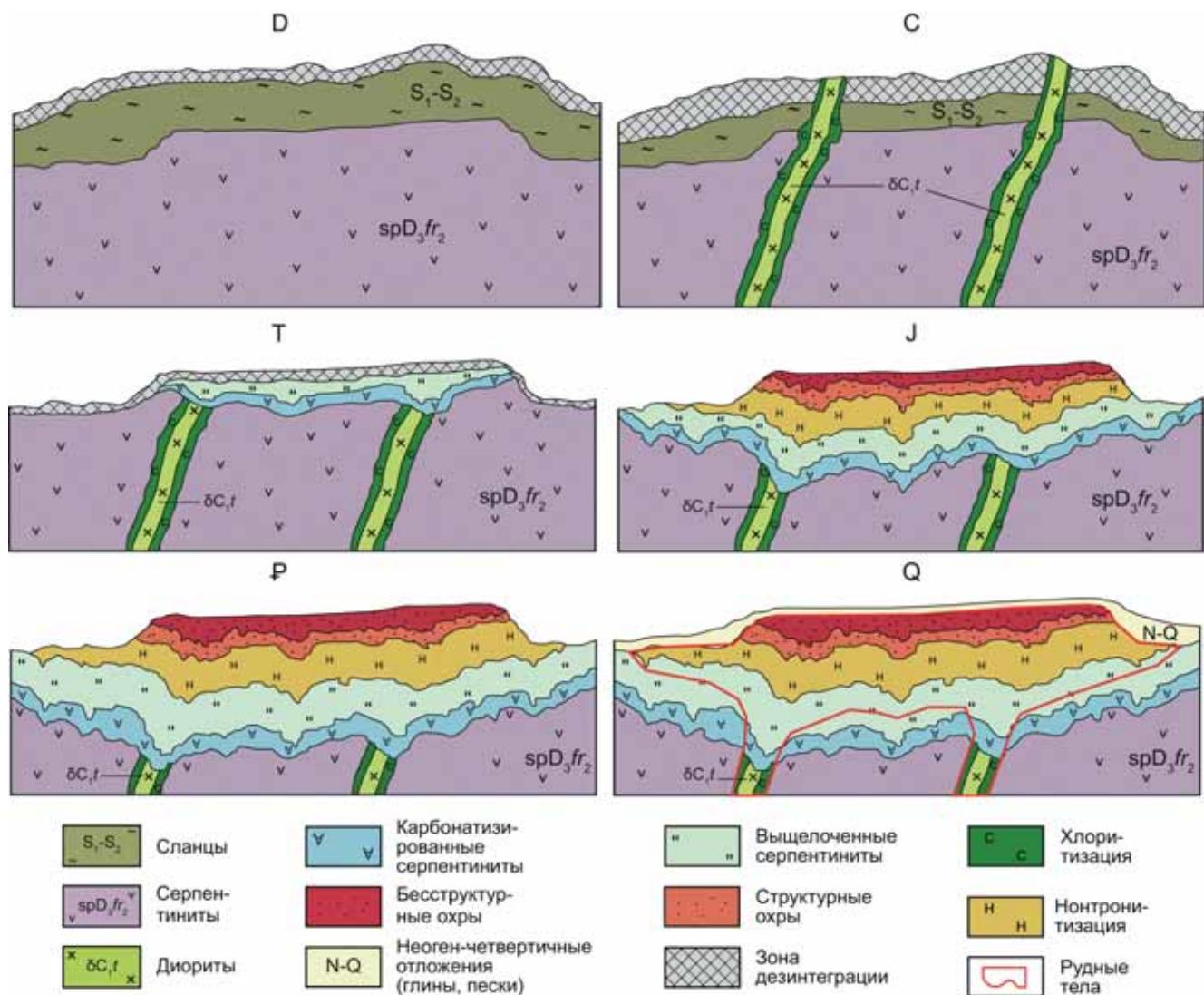


Рис. 4. Основные этапы формирования Буруктальского месторождения. Периоды и обозначение окон: D — Девон, C — Карбон, T — Триас, J — Юра, P — Палеоген, Q — Четвертичный

Схожи и зональности кор: в месторождениях Новой Каледонии в верхней части разреза расположена зона окисления, представленная охрами и гидрогематитами, в средней — зона сапролитов (аналогичная зоне нонtronитов Буруктальского месторождения) и зона выщелоченных серпентинитов в нижней части разреза (рис. 5). Поскольку на Буруктальском месторождении протекали аналогичные процессы выветривания по породам схожего состава, общий вид разрезов Уральских и Каледонских кор совпадают.

Однако, при сравнении этих месторождений можно выделить и отличия. Первое связано со временем формирования коры: если месторождения Новой Каледонии начали образовываться в миоцене и эоцене, то Буруктальское месторождение связано с более древними процессами выветривания, протекающими в мезозое и раннем кайнозое.

Также эти месторождения различаются влиянием эндогенных процессов на накопление никеля: для Буруктальского месторождения характерно дополнительное обогащение никелем за счет метасо-

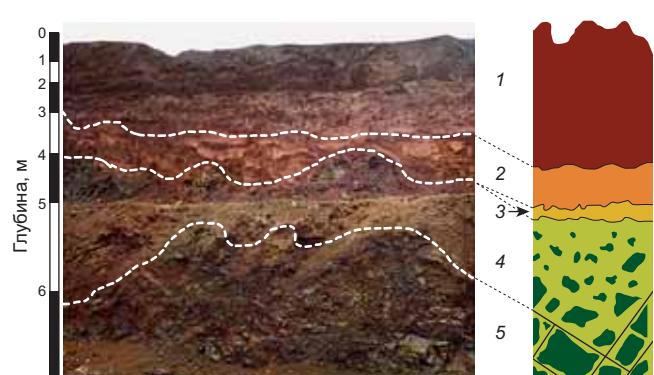


Рис. 5. Разрез месторождения Рио Туба в Новой Каледонии: 1 — бесструктурные охры, 2 — структурные охры, 3 — переходная зона, 4 — сапролиты, 5 — серпентиниты [Delina, et al., 2020]

матической переработки ультраосновного массива интрузиями среднего и основного состава, то для месторождений Новой Каледонии, расположенных в условиях океанической коры, характерно отсутствие подобного магматизма. Таким образом, генезис коры выветривания Новой Каледонии является

сугубо экзогенным, в то время как Буруктальское месторождение сформировано под влиянием и экзогенных, и эндогенных факторов.

Заключение и выводы. Среди факторов, обуславливающих формирование коры выветривания на Буруктальском ультраосновном массиве, можно выделить следующие: наличие приподнятой пенепленизированной поверхности в условиях суши, жаркий и влажный тропический климат. Повышенные содержания никеля и кобальта в ультрамафитах массива (серпентинитах, перidotитах и дунитах), способствовали образованию промышленных скоплений этих металлов в зоне гипергенеза. Дополнительное обогащение никелем и кобальтом может быть связано с метасоматической переработкой ультрамафитов интрузиями каменноугольного периода.

Сочетание всех благоприятных для корообразования условий на Буруктальском месторождении отмечается во время двух периодов: в мезозое (триасовый и юрский периоды) и раннем кайнозое

(палеогеновый период). В мезозое и кайнозое платформенные условия развития Уральского поднятия вместе с высокими среднесуточными температурами и большим количеством осадков способствовали развитию мощных кор выветривания и формированию промышленных скоплений никеля и кобальта в зоне гипергенеза.

При сравнении Буруктальского месторождения и кор выветривания Новой Каледонии можно отметить много общих признаков: состав субстрата, морфология рельефа и климатические условия при корообразовании. Различия этих месторождений заключаются в возрасте и генезисе: месторождения Новой Каледонии являются более молодыми и имеют сугубо гипергенное происхождение, а Буруктальское месторождение связано с древними мезозойскими корами, и его генезис полигенный, за счет дополнительного обогащения никелем при метасоматической переработке ультрамафитов интрузиями среднего и основного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакиров А.Г. К геохимии гипербазитов. Геохимия. М.: Наука, 1961. 47 с.
- Витовская И.В., Бугельский Ю.Ю. Никеленосные коры выветривания. М.: Наука, 1982. 191 с.
- Гинзбург И.И. и др. Древняя кора выветривания на ультраосновных породах Урала. М.: Академия наук СССР, 1947. 282 с.
- Еремеев В.П., Павлов Н.В., Сибилев А.К. Хромитовая минерализация гипербазитовых поясов Тувы // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1968. № 6. С. 45–56.
- Никитин К.К., Глазовский А.А. Никеленосные коры выветривания ультрабазитов и методы их изучения. М.: Недра, 1970. 216 с.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Никелевые и кобальтовые руды. М.: ФБУ «ГКЗ», 2007.
- Пономарев Д.В. Кора выветривания Шевченковского массива ультраосновных пород // Кора выветривания: Сборник. Вып. 5. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1934. 12 с.
- Рыжкова С.О. Типы руд и особенности формирования Буруктальского никелевого месторождения (Южный Урал): Диссертация на соискание степени кандидата геол.-мин. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова, 2010. 168 с.
- Сагдиева Р.К., Таловина И.В., Воронцова Н.И. Современные взгляды на формирование никеленосных кор выветривания ультраосновных массивов на Урале. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 6. С. 278–288.
- Сибилев А.К. Петрология и асбестоносность офиолитов (на примере Иджимского массива в Западном Саяне). Новосибирск: Наука, Сибирское. отделение, 1980. 216 с.
- Таловина И.В. Геохимия гипергенных никелевых месторождений Урала: Дисс. ... д. геол.-мин. наук. СПб.: Национальный минерально-сырьевая университет «Горный», 2012. 255 с.
- Устинов И.П., Лосев Е.И. Отчет о результатах геологоразведочных работ, проведенных на Буруктальском никель-кобальтовом месторождении в Светлинском районе Оренбургской области в 1950–1968 гг. Оренбург, 1968. 257 с.
- Elias M. Nickel laterite deposits — geological overview, resources and exploitation // Giant Ore Deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication 4, Centre for Ore Deposit Research. University of Tasmania, 2002. P. 205–220.
- Wells M., Ramanaidou E., Verrall M., Tessarolo C. Mineralogy and crystal chemistry of «garnierites» in the Goro lateritic nickel deposit // New Caledonia. European Journal of Mineralogy. 2009. Vol. 21 (2). P. 467–483.
- Ruth E., Arcilla C., Tsubasa O., et al. to Chromium occurrence in a nickel laterite profile and its implications to surrounding surface waters // Chemical Geology. 2020. Vol. 558.
- Tamehe S., Zhao Y., Xu W., Gao J. Ni(Co) Laterite Deposits of Southeast Asia: A Review and Perspective // Minerals. 2024. Vol. 14(2). P. 134. <https://doi.org/10.3390/min14020134>

Статья поступила в редакцию 11.07.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 28.02.2025

УДК 551.72; 553.9

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-47-59

НЕФТЕГАЗОМАТЕРИНСКИЕ ПОРОДЫ В РАЗРЕЗАХ ВЕРХНЕГО РИФЕЯ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ

Дмитрий Дмитриевич Кожанов¹✉, Мария Александровна Большаякова²,
Ксения Александровна Ситар³, Андрей Николаевич Боталов⁴,
Юлия Владимировна Широбокова⁵, Динара Ильгизовна Габдрахманова⁶,
Виктор Васильевич Мальцев⁷, Семен Шамилевич Заиченко⁸

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dmitriikozhanov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2641-918X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; k.sitar@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1386-8442>

⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; botalov97@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4291-7362>

⁵ Ижевский нефтяной научный центр, Ижевск, Россия; iuliia.shirobokova.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4534-4352>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gabdrakhmanova51125@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4493-5572>

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; 1950vvma@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-2880-1235>

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; semyon.zaichenko@student.msu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1842-412X>

Аннотация. В статье рассмотрены отложения позднерифейского возраста, которые могут потенциально рассматриваться как нефтегазоматеринские на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) и прилегающих складчатых областях. Обобщены и систематизированы данные по прослойям пород верхнего рифея, обогащенным органическим веществом. Систематизированы имеющиеся данные о характеристиках органического вещества этих пород. Приведено сопоставление разрезов верхнего рифея данной территории.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, докембрий, нефтегазоматеринские породы, органическое вещество

Для цитирования: Кожанов Д.Д., Большаякова М.А., Ситар К.А., Боталов А.Н., Широбокова Ю.В., Габдрахманова Д.И., Мальцев В.В., Заиченко С.Ш. Нефтегазоматеринские породы в разрезах верхнего рифея российской части Восточно-Европейской платформы и сопредельных складчатых областей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 47–59.

UPPER RIPHEAN SOURCE ROCKS OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM RUSSIAN PART AND ADJACENT FOLDED AREAS

Dmitriy D. Kozhanov¹✉, Mariya A. Bolshakova², Kseniya A. Sitar³,
Andrey N. Botalov⁴, Juliya V. Shirobokova⁵, Dinara I. Gabdrakhmanova⁶,
Viktor V. Maltsev⁷, Semyon S. Zaichenko⁸

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dmitriikozhanov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2641-918X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; k.sitar@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1386-8442>

⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; botalov97@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4291-7362>

⁵ Izhevsk Petroleum Research Center, Izhevsk, Russia; iuliia.shirobokova.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4534-4352>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gabdrakhmanova51125@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4493-5572>

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; 1950vvma@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-2880-1235>

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; semyon.zaichenko@student.msu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1842-412X>

Abstract. The article considers the deposits of the Late Riphean age, which can potentially be considered as oil and gas source deposits on the East European platform and adjacent folded areas. The data on the interlayers of rocks of the Upper Riphean enriched with organic matter are generalized and systematized. The available data on the characteristics of the organic matter of these rocks are systematized. A comparison of the Upper Riphean sections of this territory is given.

Keywords: East European platform, Precambrian, source rocks, organic matter

For citation: Kozhanov D.D., Bolshakova M.A., Sitar K.A., Botalov A.N., Shirobokova I.V., Gabdrakhmanova D.I., Maltsev V.V., Zaichenko S.S. Upper Riphean Source Rocks of the East European Platform Russian Part and Adjacent Folded Areas. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 47–59. (In Russ.)

Введение. Выявление потенциальных нефтегазоматеринских пород (НГМП) в разрезах осадочных отложений является важной задачей при проведении геологоразведочных работ на нефть и газ. Основные характеристики этих отложений (литологический состав, содержание органического углерода C_{org} , генерационный потенциал и тип органического вещества) широко используются при проведении бассейнового анализа и оценке объемов генерации углеводородных (УВ) флюидов. Помимо этого, анализ нефтегазоматеринских свойств отложений может быть также использован при решении задач событийной стратиграфии.

Периоды, когда накапливались осадочные горные породы, богатые органическим веществом, в геохронологической летописи Земли принято называть эпохами углеродонакопления [Сидоренко, 1991]. Известно несколько таких крупных стратиграфических интервалов — нижнекембрийский, верхнедевонский и верхнеюрский, все они относятся к фанерозойскому эону [Баженова и др., 2000]. В составе докембрийских комплексов особенно в отложениях мезопротерозоя (рифей и венд) также выделяются интервалы с высокими (выше кларковых) концентрациями органического углерода [Craig, et al., 2013].

Причины появления высокоуглеродистых толщ в осадочных разрезах обусловлены разноуровневыми геологическими факторами: глубиной и скоростью осадконакопления, наличием большого количества сапропелевого органического вещества и благоприятными условиями диагенеза. Среди потенциальных НГМП наибольшее распространение имеют отложения, образованные в эпохи высокого стояния уровня моря, при которых скорость накопления органического вещества была выше скорости осадконакопления.

Геологические факторы обычно находят свое отражение в геохимическом облике органического вещества — в основных биомаркерных характеристиках растворимой части органического вещества (OB) (Pr/Ph ; $n\text{-C}_{17}/\text{Pr}$; $n\text{-C}_{18}/\text{Ph}$; $\text{StC}_{27}/\text{StC}_{29}$ и т. д.), типе керогена и содержании C_{org} . Благодаря этим параметрам мы можем охарактеризовать потенциальную нефтегазоматеринскую породу и выявить ее связь с нефтью и газом.

При анализе конкретного геологического объекта, например, бассейна, часто возникают трудности с определением типа OB, связанные с высокой степенью зрелости органического вещества некоторых отложений. Наиболее часто данная проблема возникает при изучении докембрийских комплексов, в которых потенциальные НГМП сильно катагенетически преобразованы или метаморфизованы. В таком случае остаточное содержание органического

углерода низкое, а анализ биомаркерного состава невозможен.

Таким образом, могут возникнуть ситуации, когда вклад отдельной НГМП недооценен из-за отсутствия возможности полноценно охарактеризовать нефтегазоматеринскую породу. Для решения данной проблемы может быть использован метод сравнительных аналогий между различными частями осадочного бассейна или другими геологическими объектами.

В данной работе проведен анализ верхнерифейских отложений российской части Восточно-Европейской платформы и сопредельных складчатых областей. Цель проводимых исследований — выделить и охарактеризовать потенциальные нефтегазоматеринские породы, а также определить их генезис.

Объектами исследования были выбраны верхнерифейские отложения различных частей Восточно-Европейской платформы: Камско-Бельский прогиб, Серноводско-Абдуллинский авлакоген, Рязано-Саратовский (Пачелмский) авлакоген, Московская синеклиза (Среднерусский и Подмосковный авлакогены), Мезенская синеклиза и Вычегодский прогиб, а также сопредельных складчатых областей Южного, Среднего и Северного Урала, Тиманского и Полюдова кряжа (рис. 1).

Выбор объектов обусловлен возрастающим интересом к потенциальной нефтегазоносности этих отложений, а также необходимостью проведения стратиграфической корреляции отложений позднего рифея различных частей Восточно-Европейской платформы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования: выделение интервалов развития глинистых отложений в осадочных разрезах верхнего рифея; сбор и обобщение геохимической информации по выделенным интервалам потенциальных НГМП; определение стратиграфических уровней развития пород, обогащенных органическим веществом; выявление причин накопления выделенных интервалов пород и их связи с основными событиями позднего рифея.

Методы исследований и фактический материал. Согласно определению Н.П. Фадеевой, представленному в Большой российской энциклопедии (2013), нефтегазоматеринскими породами называются тонкозернистые осадочные породы, содержащие органическое вещество, способные генерировать и выделять жидкие и газообразные углеводороды в количествах, достаточных для формирования промышленных скоплений. В связи с этим, для изучения нефтегазоматеринских пород необходимо проводить анализ и осадочной толщи (литологический состав), и органического вещества (содержание органического углерода, тип OB, степень зрелости).

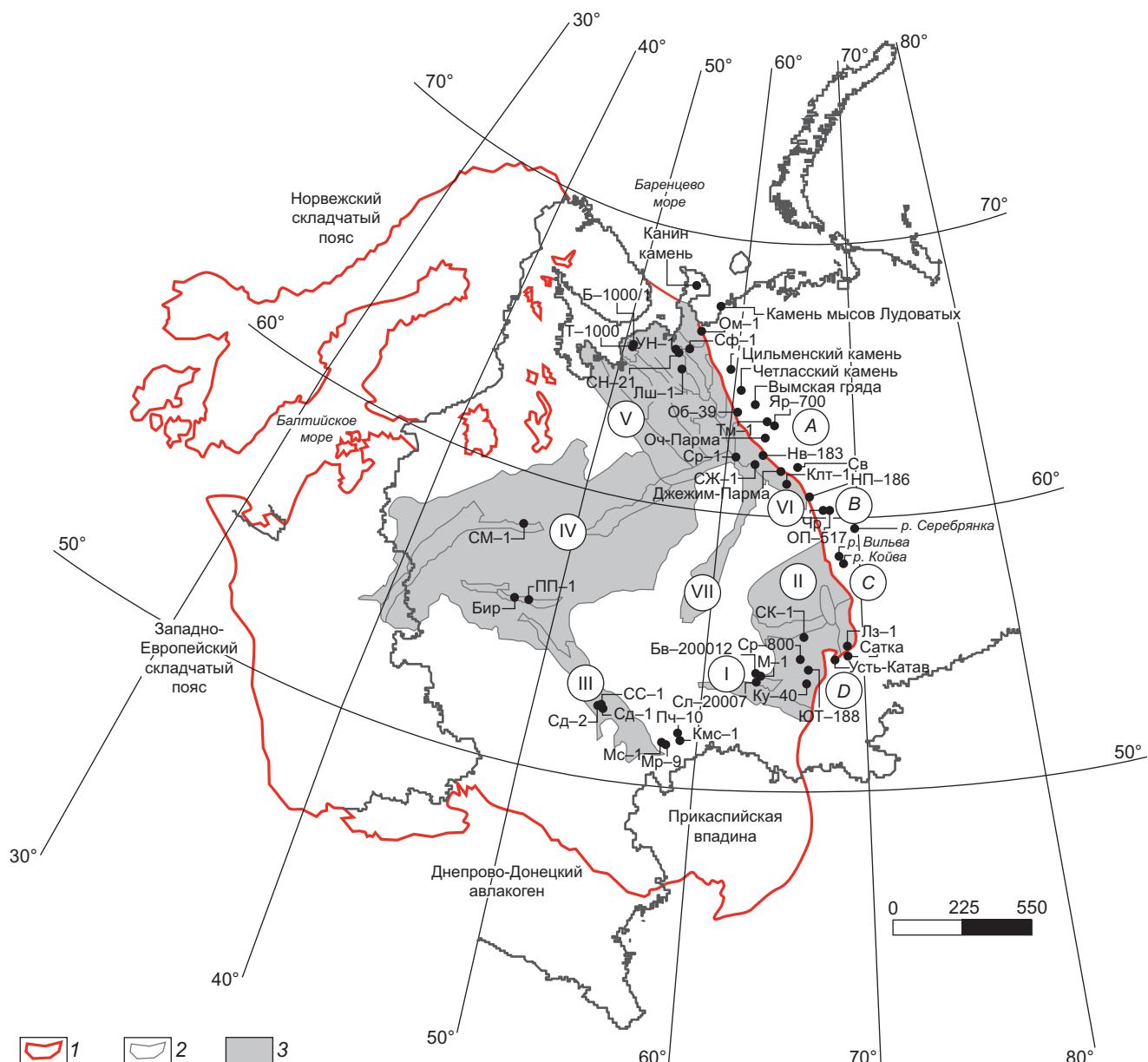


Рис. 1. Карта фактического материала: 1 — граница Восточно-Европейской платформы, 2 — граница Российской Федерации, 3 — зоны развития верхнерифейских отложений. Структуры: I — Серноводско-Абдулинский авлакоген; II — Камско-Бельский прогиб; III — Рязано-Саратовский (Пачелмский) авлакоген; IV — Московская синеклиза; V — Мезенская синеклиза; VI — Вычегодский прогиб; VII — Казанско-Кажимский авлакоген; А — Тиманский кряж; В — Полюдов кряж; С — Средний Урал; Д — Южный Урал. Скважины: Б-1000/1 — Белая-1000/1; Бв-200012 — Бавлинская-200012; Бир — Бирюлевская; Клт-1 — Кельтменская-1; Кмс-1 — Комсомольская-1; КУ-40 — Красноусольская-40; Лз-1 — Леузинская-1; Лш-1 — Лешуконская-1; М-1 — Морозовская-1; Mp-9 — Марьевская-9; Mc-1 — Миусская-1; Нв-183 — Нившерская-183; Нп-186 — Ныробский профиль-186; Об-39 — Обдырская-39; ОМ-1 — Оменская-1; ОП-517 — Остяцкий профиль-517; ПП-1 — Павлово-Посадская-1; ПЧ-10 — Пугачевская-10; Св — Савелькуджская; Сд-1 — Сердобская-1; Сд-2 — Сердобская-2; Сж-1 — Сторожевская-1; СК-1 — Северо-Кушкульская-1; Сл-20007 — Сулинская-20007; СМ-1 — Северо-Молоковская-1; СН-21 — Средненяфтинская-21; Ср-1 — Сереговская-1; Ср-800 — Сергеевская-800; СС-1 — Северо-Секретарская-1; Сф-1 — Сафоновская-1; Т-1000 — Тучкино-1000; Тм-1 — Тиманская (Яргская)-1; УН-1 — Усть-Няфтинская-1; Чр — Чурочная; ЮТ-188 — Южно-Тавтимановская-188; Яр-700 — Яргская-700

При написании данной статьи выделение интервалов развития потенциальных нефтегазоматеринских пород в отложениях верхнего рифея начиналось с рассмотрения литологического состава толщи — выделялись интервалы развития аргиллитов, глинистых алевролитов и глинистых известняков, а также мергелей. После чего производился анализ данных содержания C_{opr} и/или TOC ($\geq 0,4\%$ [Баженова и др.,

2000; Craig, et al., 2013]). Тип и зрелость органического вещества определялись на основании данных пиролиза (T_{max} , Hydrogen Index — HI).

В работе использованы материалы по 36 скважинам и 16 обнажениям (рис. 1). Геохимические данные были получены из открытых источников [Гецен, 1981; Аминов и др., 1984; Ермолкин и др., 1993; Анохина, 1996; Баженова и др., 1997; Конюхова,

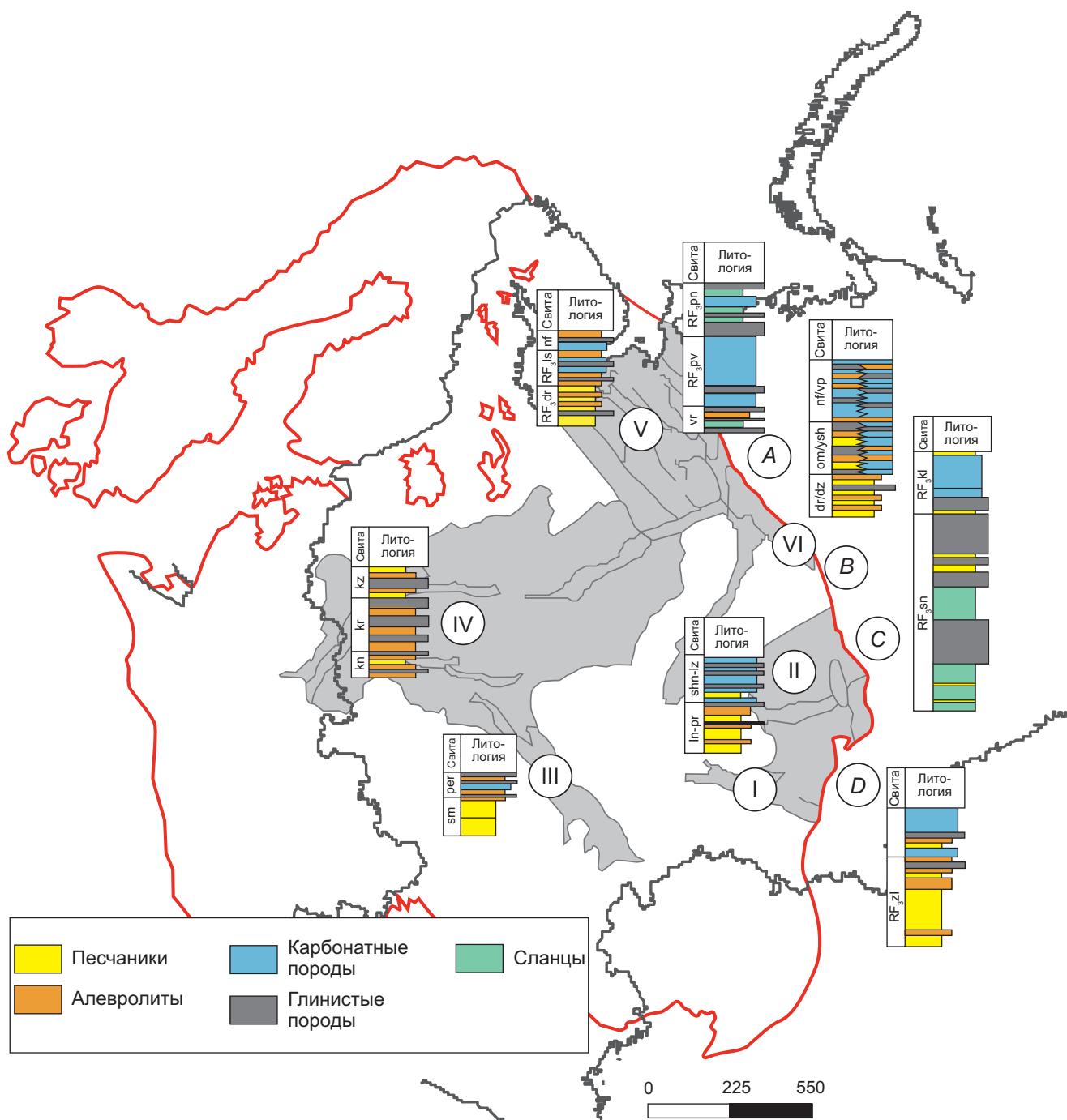


Рис. 2. Карта распространения отложений верхнего рифея с имеющимися в литературе литолого-стратиграфическими колонками. Буквы и римские цифры см. рис. 1

1998; Постникова и др., 1998; Кузьмин, 2006; Иванов, 2008; Прищепа и др., 2021], фондовых отчетов [Обобщение..., 1991(ф); Прогноз..., 1992(ф); Отчет..., 2004(ф); Разработать..., 2006(ф); Оценка..., 2015(ф)], а также по результатам собственных аналитических исследований авторов.

Литологическое описание потенциальных нефтегазоматеринских пород. К нефтегазоматеринским породам обычно относятся следующие литологические группы отложений: аргиллиты, глинистые известняки и мергели. При этом они должны иметь темную окраску — от серой до черной [Баженова и др., 2000]. В связи с этим для дальнейшего анализа из эталонных стратиграфических разрезов изуча-

мых объектов были выделены интервалы развития подобных пород.

Камско-Бельский прогиб. За эталонный разрез докембрийских отложений Камско-Бельского прогиба была принята литолого-стратиграфическая колонка, опубликованная в монографии Н.Д. Сергеевой с соавторами [Сергеева и др., 2021]. В состав верхнерифейского комплекса входят отложения леонидовской, приютовской, шиханской и леузинской свит. Согласно литологическому описанию, потенциальные нефтегазоматеринские породы могут быть обнаружены в толщах приютовской, шиханской и леузинской свит [Солодова, 2021; Кожанов, 2024] (рис. 2).

Приютовская свита (RF_3pr) сложена аргиллитами, алевролитами, доломитовыми мергелями и полевошпат-кварцевыми песчаниками, мощность свиты в пределах Камско-Бельского прогиба варьирует от 400 до 600 м [Сергеева и др., 2021].

Породы *шиханской свиты* (RF_3shn) литологически представлены глинистыми строматолитовыми слабо доломитизированными известняками с подчиненными прослойями доломитов, мергелей, аргиллитов, редко полевошпат-кварцевых алевролитов с примесью глауконита. Мощность шиханской свиты изменяется от 170 до 360 м [Сергеева и др., 2021].

Леузинская свита (RF_3lz) литологически представлена доломитами с наличием подчиненных темно-серых углеродисто-глинистых слойков (до 1–3 мм), в базальной части толщи имеются прослои известняков. Интересным является также то, что в разрезе присутствуют глинистые прослои, пропитанные органическим веществом и с включениями мелких зерен пирита [Козлов и др., 2011]. Остаточная мощность отложений леузинской свиты — до 235 м [Сергеева и др., 2021].

Серноводско-Абдуллинский авлакоген. Наименование стратиграфических комплексов отложений верхнего рифея, распространенных в пределах этой структуры, схоже с подразделениями Камско-Бельского прогиба, однако, состав их разный. В Серноводско-Абдуллинском авлакогене развитие получили только толщи леонидовской и приютовской свит, представленные терригенными (песчаниками, алевролитами, редко аргиллитами) и карбонатными (известняками и доломитами) породами. Потенциальные нефтегазоматеринские породы в составе верхнерифейского комплекса не выделяются [Изучение..., 2004(ф)].

Московская синеклиза. Отложения верхнерифейского комплекса развиты не на всей территории Московской синеклизы, а только в пределах авлакогенов: Среднерусского и Подмосковного.

Среднерусский авлакоген. Разбит разломами на серию грабенов. В пределах авлакогена выделяют четыре участка, состоящих из одного или нескольких грабенов, которые отличаются друг от друга по характеру строения доплитного комплекса: Валдайско-Молоковский, Даниловско-Любимский, Солигаличский и Рослятинский [Чамов, 2017]. Отложения верхнерифейского комплекса встречаются на территории всех сегментов авлакогена.

В пределах Валдайско-Молоковского участка отложения верхнерифейского комплекса представлены *молоковской серией* (RF_3ml), в которой вверх по разрезу наблюдается смена сероцветных аргиллитов на красноцветные псефитовые отложения. Аргиллиты нижней части серии, предположительно, можно рассматривать в качестве нефтегазоматеринских.

В пределах Рослятинского участка отложения верхнерифейского комплекса имеют наибольшую мощность (2699 м) относительно других сегментов, однако быстро выклиниваются в северо-западном

направлении. Они включают кожуховскую (RF_3kz), *каревскую* (RF_3kv) и *княжевскую* свиты (RF_3kn). Согласно литологическому описанию, потенциальные нефтегазоматеринские породы могут присутствовать в толщах княжевской свиты.

Княжевская свита (RF_3kn) подразделяется на 3 подсвиты — нижнюю, среднюю и верхнюю [Стратиграфическая..., 2003]. Базальная часть представлена переслаивающимися алевролитами и аргиллитами с прослойями песчаников. Средняя часть сложена в основном аргиллитами темно-серыми и зеленовато-серыми с прослойями песчаников и пачками алевролитов. Верхняя также представлена в основном аргиллитами, редко алевролитами. Песчаники имеют подчиненное значение.

В составе верхнерифейского комплекса Даниловско-Любимского и Солигаличского сегментов потенциальные НГМП обнаружены не были.

Подмосковный авлакоген. Верхнерифейский комплекс в пределах Подмосковного авлакогена состоит из отложений *кудиновской* и *ореховской* свит [Анохина, 1996]. Существует также стратиграфическое расчленение по А.А. Клевцовой [Клевцова, 2000], согласно которому верхнерифейский комплекс на данной территории сложен *бологаевской* (RF_3bl) и *чухломской* (RF_3chl) свитами. Если придерживаться первого разделения, то согласно литологическому описанию, потенциальные нефтегазоматеринские породы могут быть обнаружены в отдельных прослоях пород в толщах обеих свит.

Кудиновская свита (RF_3kd) в нижней части представлена средне- и крупнозернистыми песчаниками и подчиненными прослойями буро-красных аргиллитов, в верхней — чередованием алевролитов, песчаников и буро-красных аргиллитов, в этой части также встречаются темноокрашенные прослои аргиллитов мощностью 3,6 м [Анохина, 1996; Цветков, Цветкова, 2012].

Ореховская свита (RF_3or) в нижней части представлена чередованием серых песчаников с пачками тонкого переслаивания алевролитов и аргиллитов в верхней части — чередованием зеленовато-серых алевролитов, песчаников, аргиллитов [Анохина, 1996; Цветков, Цветкова, 2012].

Рязано-Саратовский (Пачемский) авлакоген. Верхнерифейский комплекс Рязано-Саратовского авлакогена сложен отложениями *цининской* (RF_3zn), *иргизской* (RF_3ir), *бельянской* (RF_3bl) и *секретаринской* (RF_3sek) свит [Постнова и др., 2012]. Ртищевскую свиту, входящую вместе с цининской свитой в состав соломской серии, изначально целиком относили к среднему рифею. Позже Уфимским совещанием Межведомственной стратиграфической комиссии [Стратиграфическая..., 2000; Сухоруков и др., 2015] принято решение о проведении условной границы между средним и верхним рифеем в подшве верхней пачки (до 480 м) ртищевской свиты, на основании того, что эти отложения можно сопоставить с леонидовской свитой верхнего рифея Камско-

Бельского прогиба и Серноводско-Абдулинского авлакогена. По литологическому описанию белынская (средняя и верхняя пачки) и секретаркинская (первая-третья пачки) свиты могут содержать потенциальные нефтегазоматеринские породы.

Бельнская (RF_3bl) и *секретаркинская* (RF_3sek) свиты, развитые в южной и центральной части авлакогена, представлены известняками и доломитами пестроокрашенными, ожелезненными, брекчированными с подчиненными прослоями филлитоподобных аргиллитов и мергелей.

Вычегодский прогиб. Отложения верхнего рифея широко развиты в Вычегодском прогибе, их подробная характеристика приводится в работах [Бабушкин, 2001; Богацкий, Довжикова, 2008; Богданов и др., 2024]. Верхний рифей подразделяется на *дорогорскую* свиту (RF_3dr) и *сафоновскую* серию (RF_3sf), состоящую из *оменской* (RF_3om) и *няфтинской* (RF_3nf) свит. В разрезах восточной и северо-восточной части Вычегодского прогиба с отложениями *дорогорской* свиты сопоставляется *джежимская* свита (RF_3dz), а с *сафоновской* серией — *ышкемесская* (RF_3ysh) и *вапольская* (RF_3vp) свиты. В работе [Баженова и др., 2013] отмечено, что потенциальные нефтегазоматеринские свиты могут быть связаны с толщами темноцветных пород *сафоновской* серии.

Оменская свита (RF_3om) *сафоновской* серии сложена серыми и светло-серыми, реже — темно-коричневыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами темными, почти черными с легким коричневатым оттенком. Мощность толщи составляет 92–223 м [Бабушкин, 2001; Богданов и др., 2024]. Восточный разрез, который представлен отложениями *ышкемесской свиты* (RF_3ysh), состоит из светло-серых тонкокристаллических и микроритмично-слоистых строматолитовых доломитов, иногда глинистых, с маломощными прослоями темноцветных алевролитов и аргиллитов. Мощность свиты равна 959–1000 м [Богацкий, Довжикова, 2008].

Няфтинскую свиту (RF_3nf) *сафоновской* серии слагают коричневые, серые и темно-серые кристаллические известняки, с прослоями мергелей, а также доломиты и алевролиты с прослоями доломитизированных известняков и песчаников. Мощность свиты колеблется от 218 до 270 м [Бабушкин, 2001; Богданов и др., 2024]. К востоку и северо-востоку мощность разреза значительно возрастает до 1000–1033 м. Толща сложена породами *вапольской свиты* (RF_3vp): пестроцветные строматолитовые и мелкокристаллические доломиты с прослоями песчаников и темно-серых аргиллитов [Богацкий, Довжикова, 2008].

Мезенская синеклиза. Верхнерифейские отложения в пределах протерозойских систем грабенов Мезенского бассейна включают в себя *дорогорскую* (RF_3dr), *лещуконскую* (RF_3ls), *няфтинскую* (RF_3nf) и *уфтуюгскую* (RF_3uf) свиты. В качестве опорного разреза территории используется параметрическая

скважина Средне-Няфтинская-21 [Аплонов и др., 2006; Чаймов, 2016]. Согласно литологическому описанию [Кузьмин, 2006] потенциальные НГМП выделяются в отложениях лещуконской и няфтинской свит.

Лещуконская свита (RF_3ls) представлена переслаиванием темно-серых аргиллитов и серых алевролитов, с прослоями светло-серых песчаников, реже серых известняков. В средней части доминируют известковистые аргиллиты. Мощность потенциальной толщи до 170 м [Кузьмин, 2006].

Отложения *няфтинской свиты* (RF_3nf) установлены только на Мезенском мегавале (скв. Усть-Няфтинская-1 и Средненяфтинская-21). Вверху разрез сложен переслаивающимися аргиллитами и алевролитами темно-серыми, внизу — аргиллитами темно-серыми и мергелями коричневыми с прослоями песчаников, доломитов и известняков [Кузьмин, 2006]. Мощность толщи 170–197 м.

Тиманский кряж. Рифейские отложения слагают складчатый фундамент Тимано-Печорского бассейна и обнажаются в ядрах складок западного и восточного Тимана [Оловянишников, 2007]. В пределах этой зоны верхнерифейский разрез представлен быстринской серией, которая включает глинисто-карбонатные *ворыквинскую* (RF_3vr) и *павьюгскую* (RF_3pv) свиты, а также существенно сланцевую *паунскую* свиту (RF_3pn) [Богданов и др., 2024; Оловянишников, 1997; Оловянишников, 1998]. Стратотипы этих толщ установлены на Четласском камне, Цильменском камне и других поднятиях. Породы быстринской серии зачастую содержат аномально высокие остаточные концентрации органического углерода [Гецен, 1981], что позволяет отнести их к потенциальному нефтепроизводящим толщам.

Ворыквинская свита (RF_3vr) представлена перекристаллизованными темно-серыми, черными, реже серыми доломитами, доломитизированными и строматолитовыми светло-серыми известняками, расслоенными тонкими глинистыми осадками. Мощность ориентированно оценивается в 400 м и более [Богданов и др., 2024; Оловянишников, 1997; Оловянишников, 1998].

Основная часть разреза *павьюгской* свиты (RF_3pv) соответствует рифогенно-мелководным фациям и сложена тонкослоистыми строматолитовыми известняками, доломитами с прослоями метамергелей, известковистых и углисто-глинистых сланцев. Породы имеют серую, темно-серую, почти черную окраску. Общая мощность свиты может доходить до 1000–1300 м [Богданов и др., 2024; Оловянишников, 1997; Оловянишников, 1998].

Паунская свита (RF_3pn) образована зеленовато-серыми, темно-серыми и черными углеродистыми и глинистыми сланцами, с подчиненными прослоями черных и темно-серых известняков. Мощность отложений паунской свиты может достигать 960 м [Богданов и др., 2024; Оловянишников, 1997; Оловянишников, 1998].

Полюдов кряж. В составе верхнего рифея Полюдова кряжа и Колчимской антиклинали выделяются отложения рассольниковой, деминской и низъянской свит. Тем не менее согласно литологическому описанию пород [Богданов и др., 2024] среди них к потенциальным НГМП стоит отнести только отдельные пачки рассольниковой свиты, которые имеют преимущественно глинистый состав — породы свиты сложены известково-глинистыми алевролитами, среди которых прослеживаются прослои кирпично-малиновых и черных чешуйчатых аргиллитов. Видимая мощность свиты 200–800 м.

Южный Урал. Наиболее полный и подробный эталонный стратиграфический разрез отложений Южного Урала представлен в работе Н.Д. Сергеевой с соавторами [2018]. В нем обобщены результаты многолетней работы по изучению Башкирского мегантиклинария, проводимые В.И. Козловым, Н.Д. Сергеевой и другими авторами. Согласно данным А.В. Маслова [1988], углеродистые отложения в составе верхнерифейского комплекса распространены слабо. По литологическому описанию, потенциальные нефтегазоматеринские породы могут быть обнаружены в толщах инзерской свиты [Кузнецова, 2005; Козлов и др., 2011; Сергеева, Дьяконова, 2022] и в верхней части миньярской свиты [Дуб, 2023].

Инзерская свита (RF_{3in}) в основном представлена полевошпат-кварцевыми и кварцевыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами, в западных разрезах широко распространены известняки и доломиты [Козлов и др., 2011]. Особый интерес представляют отложения базальной части свиты (подинзерские (симские) слои) — карбонатные породы (темно-серые и черные известняки, нередко битуминозные).

Миньярская свита (RF_{3mp}) сложена доломитами и доломитизированными известняками. В качестве потенциальных НГМП могут рассматриваться обнаруженные к северу от д. Мурадыево на левом берегу р. Белой редкие линзовидные прослои темно-серых (до черных) аргиллитов [Дуб, 2023].

Средний Урал. Стратиграфические особенности отложений верхнего рифея западного склона Среднего Урала наиболее полно отражены в монографии [Пучков, 2010]. В состав комплекса входят: синегорская и клыктанская свиты кедровской серии. Осянская, федотовская и усьвинская свиты басегской серии, как стратиграфические аналоги криволукской свиты [Пучков, 2010], согласно предлагаемым изменениям [Сергеева, Пучков, 2022], относятся к терминальному рифею (аршинию). Выделение потенциальных нефтегазоматеринских пород не представляется возможным в связи с высокой преобразованностью пород (до метаморфизма).

Содержание и характеристика типа органического вещества в потенциальных докембрийских нефтегазоматеринских породах. После выделения в изучаемых разрезах интервалов развития предполагаемых нефтегазоматеринских пород был произведен анализ содержания органического углерода

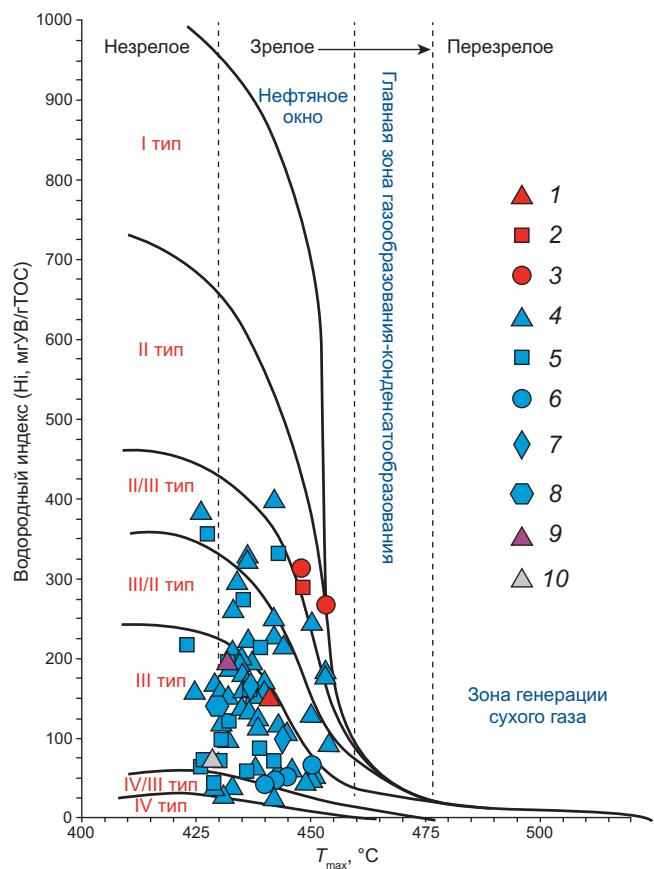


Рис. 3. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена для образцов верхнего рифея: 1–3 — образцы из Вычегодского прогиба (1 — RF3uf; 2 — RF3nf; 3 — RF3vp); 4–8 — образцы из Мезенской синеклизы (4 — RF3ls; 5 — RF3nf; 6 — RF3dr; 7 — RF3om; 8 — RF3uf); 9 — образец из Московской синеклизы (RF3kd); 10 — образец из Пачелмского (Рязано-Саратовского) авлакогена (RF3rt).

(C_{орг} и/или ТОС, %). В обобщенную базу данных включены материалы [Гецен, 1981; Аминов и др., 1984; Обобщение..., 1991(ф); Прогноз..., 1992(ф); Ермолкин и др., 1993; Отчет..., 2004(ф); Анохина, 1996; Баженова и др., 1997; Конюхова, 1998; Постникова и др., 1998; Кузьмин, 2006; Разработать..., 2006(ф); Иванов, 2008; Оценка..., 2015(ф); Прищепа и др., 2021], а также результаты собственных аналитических исследований. При анализе пиролитических характеристик проводилась их первичная отбраковка по значениям показателей S₂ (<0,09 мг УВ/г породы [Сивкова и др., 2021]) и T_{max} (≤ 420 °C [Филиппов, 2015]). Учитывая высокую степень катагенетической преобразованности отложений [Башкова, 2009; Кожанов, 2024], а также сапропелевый тип исходного органического вещества [Конторович и др., 1996], выделение предполагаемых НГМП производилось при значениях содержания органического углерода (C_{орг} и/или ТОС) ≥ 0,4 % [Баженова и др., 2000; Craig, et al., 2013].

Полученные данные отображены на модифицированной диаграмме Ван-Кревелена (рис. 3), что позволило, по возможности, с учетом катагенетической зрелости определить тип исходного органического вещества. Обстановки осадконакопления опреде-

лялись на основе характеристики и классификации потенциальных нефтегазоматеринских пород (литология, тип ОВ, содержание $C_{\text{опр}}$ и значения водородного индекса (НІ) [Ступакова и др., 2023]).

Камско-Бельский прогиб. В пределах древнего Камско-Бельского прогиба потенциальные нефтегазоматеринские породы выделяются в разрезах нижнего (калтасинская свита RF₁kl), среднего (ольховская свита RF₂ol) и верхнего (*приютовская* RF₃pr, *шиханская* и *леузинская* свиты RF₃shn-lz) рифея [Кожанов, 2024]. При этом широкое распространение получили только нижне- и среднерифейские толщи, тогда как отложения верхнего рифея развиты фрагментарно и ограниченно (в пределах Бельской впадины). Более того, во время предвенского эрозионного события [Соборнов, 2023] именно эти отложения подверглись наиболее сильной денудации, что осложняет изучение нефтегазоматеринских пород данного возраста.

Для проведения геолого-геохимического анализа была сформирована база данных со значениями $C_{\text{опр}}$ и пиролитическими показателями (S_1 , S_2 , T_{max} , ТОС, НІ, ОІ и др.) по 5 скважинам: Леузинская-1, Сергеевская-800, Северо-Кушкульская-1, Южно-Тавтимановская-188 и Красноусольская-40. После верификации имеющихся данных было выбрано 37 значений $C_{\text{опр}}$, полученных по трем разным свитам верхнего рифея: RF₃pr — 20 шт.; RF₃shn — 13 шт.; RF₃lz — 4 шт.

Анализ значений содержания органического углерода в отложениях свит (таблица) свидетельствуют о том, что потенциальные нефтегазоматеринские породы могут быть развиты только в составе *шиханской* свиты верхнего рифея (RF₃shn), в то время как остальные толщи имели слишком слабый генерационный потенциал (рис. 4). Определение типа исходного органического вещества по пиролитическим характеристикам не представлялось возможным, ввиду низкого содержания в породе керогена. По совокупности признаков (литология и содержание $C_{\text{опр}}$) среда осадконакопления может быть определена как морская, шельфовая (с терригенной седиментацией).

Серноводско-Абдуллинский авлакоген. В имеющейся базе данных присутствуют три значения содержания $C_{\text{опр}}$, полученные на образцах песчаника из отложений *леонидовской* свиты верхнего рифея (RF₃ln). В связи с тем, что данный литологический тип не может быть идентифицирован как НГМП, имеющиеся значения не были использованы при дальнейшем анализе.

Среднерусский авлакоген Московской синеклизы. В пределах Среднерусского авлакогена потенциальные нефтегазоматеринские породы могут быть обнаружены в породах низа молоковской серии (RF₃ml) Валдайско-Молоковского участка, в *княжевской* свите (RF₃kn) Рослятинского участка авлакогена. При этом данных о геохимических исследованиях княжевской (RF₃kn) свиты обнаружено

не было. Значения пиролитических параметров (ТОС, НІ, T_{max}) образцов пород молоковской серии (RF₃ml) приведены в таблице. Отложения накапливались в озерных и аллювиально-пролювиальных обстановках.

Подмосковный авлакоген Московской синеклизы. Отложения *кудиновской* и *ореховской* свит Подмосковного авлакогена по литологическому признаку можно отнести к потенциальным НГМП. Геохимические параметры ОВ (таблица) также свидетельствуют о наличии в этих отложениях потенциальных НГМП, накопление которых происходило в мелководно-морских шельфовых обстановках с терригенной седиментацией.

Рязано-Саратовский (Пачелмский) авлакоген. Согласно литологическому признаку в пределах Рязано-Саратовского авлакогена *бельянская* (RF₃bl) и *секретаркинская* (RF₃sek) свиты могут содержать потенциальные нефтегазоматеринские породы. Накопление осадков бельянской свиты происходило в мелководном бассейне, с повышенной соленостью и господством восстановительных обстановок в юго-восточной части, опресненностью и окислительным режимом — в северо-западной. Отложения секретаркинской свиты формировались преимущественно в окислительных условиях, которые, однако, периодически сменялись слабовосстановительными [Постникова и др., 1998]. Согласно проведенному анализу геохимических данных (таблица) обе толщи в настоящее время относятся к очень бедным НГМП.

Вычегодский прогиб. В связи со слабой геолого-геофизической изученностью Вычегодского прогиба, геолого-геохимическая характеристика верхнерифейского комплекса проведена по 4 скважинам: Кельтменская-1, Сторожевская-1, Сереговская-1, Нившерская-183. Результаты верификации выборки данных показали крайне низкие геохимические показатели пород, что не позволило дать характеристику ОВ по пиролитическим параметрам. Однако в выборке были отмечены 5 обр. сафоновской серии (RF₃sf) с относительно высокими замерами $C_{\text{опр}}$ (0,4–1,4 %) в скважинах Кельтменская-1 и Нившерская-183. Образцы представлены аргиллитами, глинистыми известняками и доломитами, а также мергелями [Разработать..., 2006(ф); Аминов и др., 1984], накопившиеся преимущественно в мелководно-морских обстановках седиментации [Krivoshchekov, et al., 2024].

Значения содержания органического углерода в отложениях *оменской* (*ышкемесской*) и *няфтинской* (*вапольской*) свит приведены в таблице. Генерационный потенциал пород значительно исчерпан в связи с длительной и сложной историей формирования бассейна [Krivoshchekov, et al., 2024]. Тем не менее, по мнению Т.К. Баженовой и соавторов [Баженова и др., 2013] отдельные темноцветные пачки глинисто-карбонатных пород *няфтинской* свиты могут являться потенциальными нефтегазоматеринскими породами.

Таблица
Основные геохимические показатели потенциальных НГМП

Свита	Количество образцов	$C_{\text{опр}} / \text{TOC, \%}$	HI, мг УВ/г ТОС	T_{max} , °C (катагенез)
Камско-Бельский прогиб				
RF ₃ pr	20 обр.	0,04–0,45 (вср. 0,18)	–	–
RF ₃ shn	13 обр.	0,06–0,85 (вср. 0,4)	–	–
RF ₃ lz	4 обр.	0,01–0,29 (вср. 0,13)	–	–
Московская синеклиза				
RF ₃ ml	обзор	0,08–0,77 (вср. 0,39)	197–585 (вср. 345)	435 (МК ₁)
RF ₃ or	13 обр.	0,1–3,94 (вср. 0,84)	–	–
RF ₃ kd	17 обр.	0,02–1,08 (вср. 0,34)	188–250	432 (МК ₁)
Рязано-Саратовский (Пачелмский) авлакоген				
RF ₃ bl	21 обр.	0,15–0,54 (вср. 0,35)	–	–
RF ₃ sek	обзор	до 1,52 (вср. 0,23)	–	–
Вычегодский прогиб				
RF ₃ sf	обзор	0,4–1,4 (вср. 0,38)	–	–
RF ₃ om(ysh)	46 обр.	0,2–0,65 (вср. 0,13)	–	–
RF ₃ nf(vp)	41 обр.	0,01–1,4 (вср. 0,18)	–	–
Мезенская синеклиза				
RF ₃ ls	85 обр.	0,01–0,42 (вср. 0,24)	24–398 (вср. 158)	425–453 (ПК ₃ –МК ₃)
RF ₃ nf	52 обр.	0,01–0,7 (вср. 0,17)	25–355 (вср. 112)	422–449 (ПК ₃ –МК ₃)
Тиманский кряж				
RF ₃ pv	обзор	0,01–4,69 (вср. 0,72)	–	–
RF ₃ pn	обзор	0,01–7,4 (вср. 2,1)	–	–
RF ₃ pk	24 обр.	0,08–3,3 (вср. 1,45)	–	–
Южный Урал				
RF ₃ uk	15 обр.	0,01–0,18 (вср. 0,04)	–	–
Средний Урал				
RF ₃ kl	1 обр.	0,38	–	–

Мезенская синеклиза. В Мезенском бассейне было выделено две потенциальные нефтегазоматеринские толщи: лешуконская (RF₃ls) и няфтинская (RF₃nf). По литологическим признакам выделяемые толщи могли быть сформированы в прибрежной морской среде с терригенным осадконакоплением. Исходный тип органического вещества преимущественно сапропелевый, источником которого являются акритархи, микрофитолиты, кильдинеллы и синезеленые водоросли [Кузьмин, 2006]. В настящее время рассматриваемые отложения следует с осторожностью относить к потенциальным НГМП в связи с низкими значениями показателя ТОС (таблица).

Тиманский кряж. Геохимическая характеристика разреза верхнего рифея района Тиманского кряжа в основном выполнена по показателю $C_{\text{опр}}$, который замерялся в местах выхода на земную поверхность метаморфизованных и слабо метаморфизованных

пород складчатого байкальского фундамента. Ранее тщательными поисками потенциальных нефтегазоматеринских пород позднего рифея Тимана занимались такие известные ученые как В.Г. Гецен [1981] и В.Г. Оловянишников [1998].

Верхнерифейские отложения обнажений Тимана в большинстве случаев представлены черными, темно-серыми глинистыми, серицит-хлоритовыми сланцами и черными глинистыми карбонатными породами, в которых (по сравнению с замерами $C_{\text{опр}}$ в скважинах северо-востока Восточно-Европейской платформы) наблюдаются аномально высокие остаточные концентрации $C_{\text{опр}}$ (таблица). Несомненно, верхнерифейские пачки пород Тимана могли в прошлом являться нефтепроизводящими толщами, генерационный потенциал которых был существенно уничтожен воздействием метаморфизма в венд-кембрийское время [Гецен, 1987]. Тем более что на различных площадях Тимана

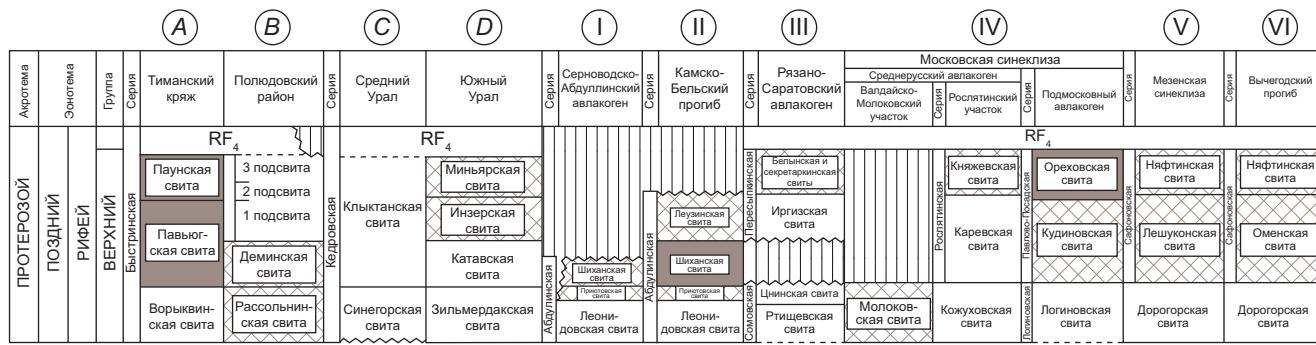


Рис. 4. Схема сопоставления верхнерифейских отложений Восточно-Европейской платформы и сопредельных складчатых областей. Буквы и римские цифры см. рис. 1

(Нижнечутинская, Водный Промысел, Яргская, Зеленецкая, Лачельская, Чибюсская и др.) были зафиксированы многочисленные нефтегазопроявления в докембрийском комплексе [Заборовская и др., 2023; Шилов и др., 2007], и даже установлены промышленные притоки газообразных УВ флюидов [Дертев и др., 1996].

Южный Урал. В пределах Южного Урала были проведены немногочисленные геохимические исследования отложений верхнего рифея. В открытых и фондовых источниках опубликованы материалы с результатами анализа образцов зильмердакской [Разработать..., 2006(ф)], миньярской [Горожанин, 2023] и уксской свит [Маслов и др., 2019]. Представленные значения не позволяют сделать однозначные выводы о наличии в разрезе потенциальных нефтегазоматеринских пород ($C_{\text{опр}} = 0,01\text{--}0,18$ (в ср. 0,04 %), что, однако, может быть обусловлено высокой степенью метаморфизма этих отложений. Помимо этого, углеродистые толщи могут быть обнаружены в других (по стратиграфии и литологии) отложениях инзерской ($RF_3\text{in}$) и миньярской ($RF_3\text{mn}$) свит.

Средний Урал. Несмотря на то, что в верхнерифейских отложениях западного склона Среднего Урала по литологическим признакам потенциальные НГМП выявлены не были, геохимические данные [Разработать..., 2006(ф)] указывают на наличие отдельных углеродистых прослоев в составе этого комплекса, в одном образце клыктанской свиты ($RF_3\text{kl}$) было получено значение содержания $C_{\text{опр}} = 0,38\%$.

Также многочисленными исследованиями [Маслов и др., 1996; Бадьянова и др., 2016; Осовецкий и др., 2019] отмечалось наличие углеродистых филлитовых сланцев в составе федотовской свиты ($RF_4\text{fd}$) терминального рифея, где, по результатам проведенного пиролиза [Разработать..., 2006(ф)], были выявлены следовые концентрации $C_{\text{опр}}$ (до 0,4 % при среднем 0,15 %).

Исходя из этого, можно сделать промежуточный (требующий дальнейшего подтверждения) вывод о том, что данные отложения в геологическом прошлом могли быть нефтегазоматеринскими породами, генерационный потенциал которых был полностью уничтожен процессами метаморфизма.

Таким образом, широкое распространение на территории Восточно-Европейской платформы верхнерифейских осадочных отложений, которые могут рассматриваться в качестве нефтегазоматеринских пород, согласуется, в целом, с исследованиями и в других регионах как на Евразийском, так и на других континентах. В последние десятилетия были проведены работы по анализу верхнерифейских осадочных отложений на всех континентах Земли с точки зрения оценки их возможного нефтегазогенерационного потенциала [Конторович и др., 1996; Craig, et al., 2013; Баженова, 2016; Ситар и др., 2022]. Широкое распространение в мире обогащенных органическим веществом пород позднерифейского возраста свидетельствует о наличии благоприятных условий в то время не только для накопления $C_{\text{опр}}$ но и для его консервации. Обращает на себя внимание наличие этих обогащенных ОВ прослоев на разных стратиграфических уровнях внутри неопротерозойской части осадочного разреза в различных осадочных бассейнах, а также наличие определенной цикличности в прослоях с повышенным содержанием органического вещества.

Вопрос о факторах, которые оказали влияние на создание благоприятных условий для формирования потенциальных нефтегазоматеринских пород, продолжает быть актуальным. Чаще всего исследователи обращаются к более детальному изучению сочетания структурно-тектонической позиции бассейнов осадконакопления и климатических условий, способствующих увеличению биопродуктивности в рассматриваемом временном интервале истории Земли.

Одна из гипотез, рассматривающих возможные причины благоприятных условий для увеличения биопродуктивности, изложенная Э.М. Галимовым [2016], предполагает существенную роль активизации вулканической активности, вызвавшей изменения в биосфере, и приведшей как к похолоданию на планете, так и к отложению органических веществ бактериального происхождения. Согласно данной версии, вулканическая активность обеспечивала дополнительный источник нутриентов, способствующих увеличению биомассы среды. В условиях дефицита кислорода возникла аноксидный режим

в бассейне седиментации, что приводило к улучшению условий для консервации ОВ в осадках. С другой стороны, увеличение биопродуктивности истощало ресурс CO_2 не только в океане, но и в конечном счете в атмосфере. При падении содержания CO_2 в атмосфере происходило охлаждение климата, а при падении его концентраций ниже порогового предела наступало оледенение. Охлаждение, в свою очередь, вызывало обратный процесс: биопродуктивность уменьшалась. Со временем прекращалось падение концентрации CO_2 в атмосфере. Отступал режим оледенения.

Подтверждает это предположение работа [Wang, 2022]. Согласно полученным результатам детального стратиграфического и изотопного анализа неопротерозойских образцов пород комплексов окраинных осадочных бассейнов кратона Янцзы (Yangtze), который является структурным аналогом

Восточно-Европейской платформы и близким по возрасту формирования осадочных неопротерозойских комплексов, удалось выделить несколько фаз оледенений, между которыми происходило накопление обогащенных органическим веществом пород.

Заключение. Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы: потенциал нефтегазоматеринских отложений верхнего рифея российской части Восточно-Европейской платформы изучен неравномерно и недостаточно. Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что нефтегазоматеринские верхнерифейские прослои распространены на ВЕП и требуют более детального изучения, чтобы улучшить качество оценок перспектив нефтегазоносности. Уровни развития обогащенных ОВ пород ВЕП в целом сопоставимы с уровнями нефтегазоматеринских отложений верхнего рифея других регионов мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аминов Л.З., Дедеев В.А., Зытнер Ю.И. и др. Прогноз нефтегазоносности Мезенского седиментационного бассейна. Сыктывкар: ИГ КНЦ УрО РАН, 1984. 60 с.
- Анохина Т.В. Геохимические предпосылки нефтегазоносности отложений верхнего докембрия Московского авлакогена: Дисс. ...канд. геол.-мин. наук / Т.В. Анохина. М., 1996. 182 с.
- Айлонов С.В., Бурзин М.Б., Вейс А.Ф. и др. Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна. СПб.: Наука, 2006. 319 с.
- Бабушкин Т.А. Верхний докембрий Вычегодского прогиба // Вестник института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2001. № 6 (78). С. 16–17.
- Байдянова И.В., Суслов С.Б., Осовецкий Б.М. Типы минерализаций кор выветривания черносланцевых толщ Горнозаводского района Пермского края // Уникальные литологические объекты через призму их разнообразия. 2016. С. 88–90.
- Баженова Т.К. Нефтегазоматеринские формации древних платформ России и нефтегазоносность // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11, № 4. С. 1–29.
- Баженова О.К., Анохина Т.В., Постникова И.Е. и др. Литолого-geoхимические предпосылки нефтеносности верхнего протерозоя Московского авлакогена и сопредельных территорий // Геология нефти и газа. 1997. № 4. С. 17–25.
- Баженова Т.К., Богословский С.А., Шапиро А.И. и др. Органическая geoхимия осадочного выполнения Вычегодского прогиба (Русская плита) и его геотермическая история // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8, № 3. С. 1–31.
- Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А. и др. Геология и geoхимия нефти и газа: учебник для вузов. М.: Изд-во МГУ, 2000. 384 с.
- Башкова С.Е. Комплексный анализ критериев и показателей прогноза нефтегазоносности рифей-вендинских отложений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук / С.Е. Башкова. Пермь, 2009. 198 с.
- Богацкий В.И., Довжикова Е.Г. Строение Вычегодского прогиба, уточненное по результатам бурения Восточно-Европейской платформы и близким по возрасту формирования осадочных неопротерозойских комплексов, удалось выделить несколько фаз оледенений, между которыми происходило накопление обогащенных органическим веществом пород.
- Заключение.** Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы: потенциал нефтегазоматеринских отложений верхнего рифея российской части Восточно-Европейской платформы изучен неравномерно и недостаточно. Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что нефтегазоматеринские верхнерифейские прослои распространены на ВЕП и требуют более детального изучения, чтобы улучшить качество оценок перспектив нефтегазоносности. Уровни развития обогащенных ОВ пород ВЕП в целом сопоставимы с уровнями нефтегазоматеринских отложений верхнего рифея других регионов мира.
- параметрической скважины 1-Кельтменская // Геология и нефтегазоносность Тимано-Печорского бассейна. 2008. С. 67–76.
- Богданов Б.П., Громыко А.В., Горобец С.А. Волго-Тиманский и Восточно-Европейский рифейские барьерные рифы как индикаторы формационно-тектонической модели верхнего докембрия Восточно-Европейской платформы (в связи с перспективами поисков углеводородов, алмазов и других полезных ископаемых) // Уральский геологический журнал. 2024. № 1 (157). С. 3–162.
- Галимов Э.М. Периоды оледенений и нефтеобразования в ранней истории Земли: общая причина // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2016. Т. 8, № 2. С. 134–142.
- Гецен В.Г. Рифейский комплекс Тимано-Печорской провинции — возможная нефтепроизводящая толща // Нефтегазоносные комплексы Печорской синеклизы: Труды Института геологии Коми филиала АН СССР. 1981. Вып. 35. С. 27–38.
- Гецен В.Г. Тектоника Тимана. Л.: Наука, 1987. 172 с.
- Горожанин В.М. Геохимические особенности УВ-проявления в карбонатах миньярской свиты верхнего рифея, Башкирский мегантиклиниорий, Южный Урал // Геологический вестник. 2023. № 1. С. 13–23.
- Дертев А.К., Аргегов В.Б., Буданов Г.Ф. и др. Нефтегазоносность протерозойских отложений древних платформ. Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья. М.: Геоинформмарк, 1996. 50 с.
- Дуб С.А. Верхняя часть миньярской свиты каратауской серии (верхний рифей) Южного Урала: состояние изученности и перспективы исследований // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения. 2023. С. 60–62.
- Ермолкин В.И., Голованова С.И., Филин А.С. Аспекты прогноза нефтегазоносности верхнепротерозойских — нижнепалеозойских отложений Московской синеклизы // Геология нефти и газа. 1993. № 6. С. 12–17.
- Зaborовская В.В., Богданов Б.П., Горобец С.А. Минеральные ресурсы рифейских отложений Среднего и Южного Тимана: стратиграфия, фации, материнские породы и ловушки // Инженер-нефтяник. 2023. № 4. С. 31–39.

Иванов Д.И. Перспективы нефтегазоносности рифейских отложений платформенного Башкортостана на основе изучения нафтогенерационного потенциала: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Д.И. Иванов. Уфа, 2008. 158 с.

Клевцова А.А. Авлакогены Русской платформы — очаги генерации углеводородов // Разведка и охрана недр. 2000. № 6. С. 19–26.

Кожанов Д.Д. Роль органического вещества докембрая в формировании нефтегазоносности осадочного чехла восточной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Д.Д. Кожанов. М., 2024. 186 с.

Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д. Новая схема расчленения разреза параметрической скважины 1 Кулгунинская (Южный Урал). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. 60 с.

Конторович А.Э., Трофимук А.А., Башарин А.К. и др. Глобальные закономерности нефтегазоносности докембрая // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 8. С. 6–42.

Конюхова В.А. Геолого-геохимическая оценка перспектив нефтегазоносности рифейских отложений северо-запада Мезенской синеклизы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1998. № 2. С. 37–41.

Кузнецов В.Г. Molar Tooth Structure — своеобразная текстура рифейских карбонатных пород // Литосфера. 2005. № 4. С. 136–150.

Кузьмин Д.А. Геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности верхнепротерозойских отложений Мезенского бассейна: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Д.А. Кузьмин. М., 2006. 180 с.

Маслов А.В. Рифейские углеродистые отложения Башкирского мегантиклинонория // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 3. С. 101–109.

Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Дуб С.А. и др. Укская свита верхнего рифея Южного Урала: седиментология и геохимия (первые результаты исследований) // Литосфера. 2019. № 5. С. 659–686.

Маслов А.В., Иванов К.С., Чумаков Н.М. и др. Разрезы верхнего рифея, венда и нижнего палеозоя Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 1996. 117 с.

Оловянишинников В.Г. Атлас геологических и геодинамических карт Канино-Тиманского кряжа и фундамента Печорской плиты. Сыктывкар: Геопринт, 2007. 28 с.

Оловянишинников В.Г. Верхний докембрый Тимана и полуострова Канин. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 194 с.

Оловянишинников В.Г. Модель строения верхнерифейской рифогенной формации Тимана. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 1997. Вып. 394. 40 с.

Осовецкий Б.М., Суслов С.Б., Бадьянова И.В. Танталониобаты в породах федотовской свиты верхнего рифея (Средний Урал) // Вестник Пермского университета. Серия Геология. 2019. Т. 18, № 4. С. 332–346.

Постникова И.Е., Баженова О.К., Коцарева Т.А. Литолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности докембрийских отложений Пачелмского авлакогена // Геология нефти и газа. 1998. № 1. С. 26–33.

Постникова Е.В., Яцкевич С.В., Лопатин Н.В. и др. Катагенез и нефтегазоматеринский потенциал рифея Пачелмского авлакогена // Недра Поволжья и Прикаспия. 2012. № 69. С. 3–12.

Прищепа О.М., Жарков А.М., Грохотов Е.И. и др. Перспективы нефтегазоносности Мезенской синеклизы

по результатам объемно-генетического моделирования // Геомодель-2021. 2021. С. 92.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогенеза). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Сергеева Н.Д., Дьякова С.А. Стратотипические и опорные разрезы катаевской и инзерской свит каратауской серии верхнего рифея в инзерском синклинонории (Южный Урал) // Геологический вестник. 2022. № 1. С. 94–110.

Сергеева Н.Д., Пучков В.Н. Региональная стратиграфическая схема отложений верхнего и завершающего рифея и венда Южного Урала (проект 2022) // Геологический вестник. 2022. № 2. С. 3–14.

Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Карасева Т.В. Верхний протерозой (рифей и венд) Волго-Уральской области в параметрических и глубоких скважинах. Уфа, 2021. 196 с.

Сивкова Е.Д., Ступакова А.В., Калмыков А.Г. и др. Верификация пиролитических данных при оценке потенциала и катагенетической преобразованности протерозойских низкоуглеродистых формаций Восточной Сибири // Георесурсы. 2021. № 23(2). С. 56–66.

Сидоренко С.А. Органическое вещество и биогенетические процессы в докембрии. М.: Наука, 1991. 102 с.

Ситар К.А., Георгиевский Б.В., Большакова М.А. и др. Комплексная оценка условий формирования нефтегазоматеринского потенциала отложений неопротерозоя // Георесурсы. 2022. Т. 24, № 2. С. 47–59.

Соборнов К.О. Геодинамический контроль нефтегазоносности Предуралья // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 2. С. 187–202.

Солодова С.А. Карбонатные уровни верхнего рифея Волго-Уральской области (шиханская и леузинская свиты) и перспективы их нефтегазоносности // Геологический вестник. 2021. № 2. С. 17–30.

Стратиграфическая схема рифейских и вендских отложений Волго-Уральской области. Объяснительная записка / Под ред. М.А. Мемихатова, С.М. Шика. Уфа, 2000. 81 стр., и схема на 2-х листах.

Стратиграфическая схема рифейских отложений восточной части Оршанской впадины, Крестцового и Солигаличского авлакогенов. Объяснительная записка / Под ред. Ю.Т. Кузьменко. М., 2003. 65 с.

Ступакова А.В., Поляков А.А., Малышев Н.А. и др. Критерии нефтегазоносности осадочного бассейна // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 2. С. 5–21.

Сухоруков В.И., Яцкевич С.В., Писаренко Ю.А. Актуализированная стратиграфическая схема рифейских отложений Пачелмско-Саратовского авлакогена // Недра Поволжья и Прикаспия. 2015. № 83. С. 3–29.

Фадеева Н.П. Нефтегазоматеринские породы // Большая российская энциклопедия. Т. 22. М., 2013. С. 543–544.

Филиппов Ю.А. Нефтегазоносность верхнего протерозоя западной части Сибирской платформы: Дисс. ... докт. геол.-мин. наук / Ю.А. Филиппов. Красноярск, 2015. 449 с.

Цветков Л.Д., Цветкова Н.Л. Сланцевые углеводороды: Библиогр. обзор. Ярославль: НПЦ «Недра», 2012. 239 с.

Чамов Н.П. Тектоно-седиментационная история Среднерусского авлакогена и Московской синеклизы // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 6. С. 78–98.

Шилов Л.П., Краснова Ю.Л. Нефтегазоносность рифея Ухтинской складки Тимана // Отечественная геология. 2007. № 4. С. 7–11.

Craig J., Biffi U., Galimberti R.F., et al. The paleobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks // Marine and Petroleum Geology. 2013. № 40. P. 1–47.

Krivoshchekov S., Botalov A. Assessment of Oil and Gas Potential in Vychegeida Trough in Connection with the Identification of Potential Petroleum Systems // Geosciences. 2024. Vol. 14(3). P. 1–42.

Wang T. Meso-Neoproterozoic Geology and Petroleum Resources in China. Singapore: Springer Geology, 2022. 575 p.

ФОНДОВАЯ ЛИТЕРАТУРА

Изучение строения Серноводско-Абдулинского авлакогена и докембрийских осадочных толщ с целью выявления нефтегазоносных зон на территории Самарской и Оренбургской областей: отчет по государственному контракту № ПС-02-06/1664 / ЗАО «НПЦ «Геонефтегаз»; отв. исп. В.К. Киревич. М., 2004. 226 с.

Обобщение материалов геолого-геофизических исследований параметрической скважины 700-Ярега: окончательный отчет по теме 138/89 / ПечорАНИПИнефть; отв. исп. Э.Н. Овчинников. Ухта, 1991. 132 с.

Отчет о результатах параметрического бурения на Леузинской площади / ООО «ИК БАШНИПИНЕФТЬ»; отв. исп. Т.В. Иванова, Р.Х. Масагутов. Уфа, 2004. 189 с.

Оценка перспектив нефтегазоносности западных и северных районов Волго-Уральской и сопредельных территорий Тимано-Печорской НГП на основе комплексного обобщения геолого-геофизических данных и реализации технологии бассейнового моделирования: геологический отчет / АО «НВНИИГГ»; отв. исп. О.И. Меркулов. Саратов, 2015. 1106 с.

Прогноз нефтегазоносности в рифейских и нижнепалеозойских отложениях Русской плиты: отчет о работах Прогнозной партии НИЧ геологического факультета МГУ за 1992 г. / Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; отв. исп. В.А. Егоров. М., 1992. 187 с.

Разработать комплекс критериев количественной оценки прогнозных ресурсов и осуществить прогноз нефтегазоносности рифей-вендского комплекса европейской части России: отчет по государственному контракту № АТ-03-28/829 / Недра; отв. исп. Т.В. Карасева. Ярославль, 2006. 821 с.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК 553.98(470.53/.57)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-60-68

ХАРАКТЕРИСТИКА НИЖНЕПЕРМСКИХ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕФТЕГАЗОМАТЕРИНСКИХ ТОЛЩ ПРЕДУРАЛЬСКОГО КРАЕВОГО ПРОГИБА НА ПРИМЕРЕ ДИВИНСКОЙ СВИТЫ

Павел Петрович Попов¹✉, Мария Александровна Большаякова²,
Галина Юрьевна Пономарева³, Иван Сергеевич Хопта⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pashatamada@gmail.com✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия; galinapon0mareva@yandex.ru

⁴ ЗАО «Моделирование и мониторинг геологических объектов им. В.А. Двуреченского», Москва, Россия; KhoptaIS@yandex.ru

Аннотация: Современные оценки потенциала нефтегазоматеринских толщ Предуральского прогиба базируются на геологических моделях его строения и нефтегазоносности, созданных по результатам региональных и поисковых работ, выполненных в конце прошлого столетия, и нуждаются в пересмотре и обновлении на основании новых геохимических данных и современных технологий. Вклад нижнепермских материнских толщ и их генерационный потенциал до конца не ясен. Цель данной статьи — рассмотреть литологию и геохимию органического вещества нижнепермских потенциально нефтегазоматеринских толщ на примере дивинской свиты, оценить возможность генерации ими нефти и газа в Предуральском краевом прогибе.

Ключевые слова: Предуральский краевой прогиб, пермская система, дивинская свита, нефтегазоматеринские породы, органическое вещество, пиролиз, кинетические исследования, углеводороды

Для цитирования: Попов П.П., Большаякова М.А., Пономарева Г.Ю., Хопта И.С. Характеристика нижнепермских потенциально нефтегазоматеринских толщ Предуральского краевого прогиба на примере дивинской свиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 60–68.

CHARACTERISTICS OF THE LOWER PERMIAN POTENTIAL OIL AND GAS SOURCE STORIES OF THE PRE-URAL FOREDEEP ON THE EXAMPLE OF THE DIVINSKAYA FORMATION

Pavel P. Popov¹✉, Mariya A. Bolshakova², Galina Yu. Ponomareva³, Ivan S. Khopta⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pashatamada@gmail.com✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru

³ Perm State National Research University, Perm, Russia; galinapon0mareva@yandex.ru

⁴ Dvurechensky Closed Joint-Stock Company Modeling and monitoring of geological objects, Moscow, Russia; KhoptaIS@yandex.ru

Abstract: Current estimates of the potential of the oil and gas source strata of the Pre-Ural foredeep are based on geological models of its structure and oil and gas potential created based on the results of regional and exploration work carried out mainly at the end of the last century, and need to be revised and updated based on new geochemical data and modern technologies. The contribution of the Lower Permian source rock formation and their generation potential have also not been clarified. The purpose of this article is to assess the Lower Permian source rock formation from the point of view of lithology, geochemistry, and to evaluate the possibility of their generation in the Pre-Ural foredeep using the example of the Divinskaya Formation.

Keywords: Pre-Ural foredeep, Divinskaya Formation, Permian system, organic matter, oil-and-gas source rocks, pyrolysis, kinetic studies, hydrocarbons

For citation: Popov P.P., Bolshakova M.A., Ponomareva G.Yu., Khopta I.S. Characteristics of the lower permian potential oil and gas source stories of the Pre-Ural foredeep on the example of the Divinskaya formation. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 60–68. (In Russ.).

Введение. На основе мирового опыта изучения нижнепермских нефтегазоматеринских пород можно сделать вывод о том, что в различных осадочных бассейнах по всему миру в этих породах происходила генерация жидких и газовых углеводородов (УВ). Известные примеры таких бассейнов включают Пермский бассейн (Permian Basin) и бассейн Тукумкари (Tucumcari basin) в США, бассейн Пхетчабун

(Phetchabun Basin) в Индонезии и Сычуаньский бассейн (Sichuan basin) в Китае. Нижнепермские нефтегазоматеринские породы в этих бассейнах накапливались преимущественно в условиях морской седиментации. Углеводородные флюиды, образовавшиеся в этих породах, мигрировали в резервуары как по латерали, так и вертикально через разломы. Вклад в общий объем генерации углеводородов (УВ)

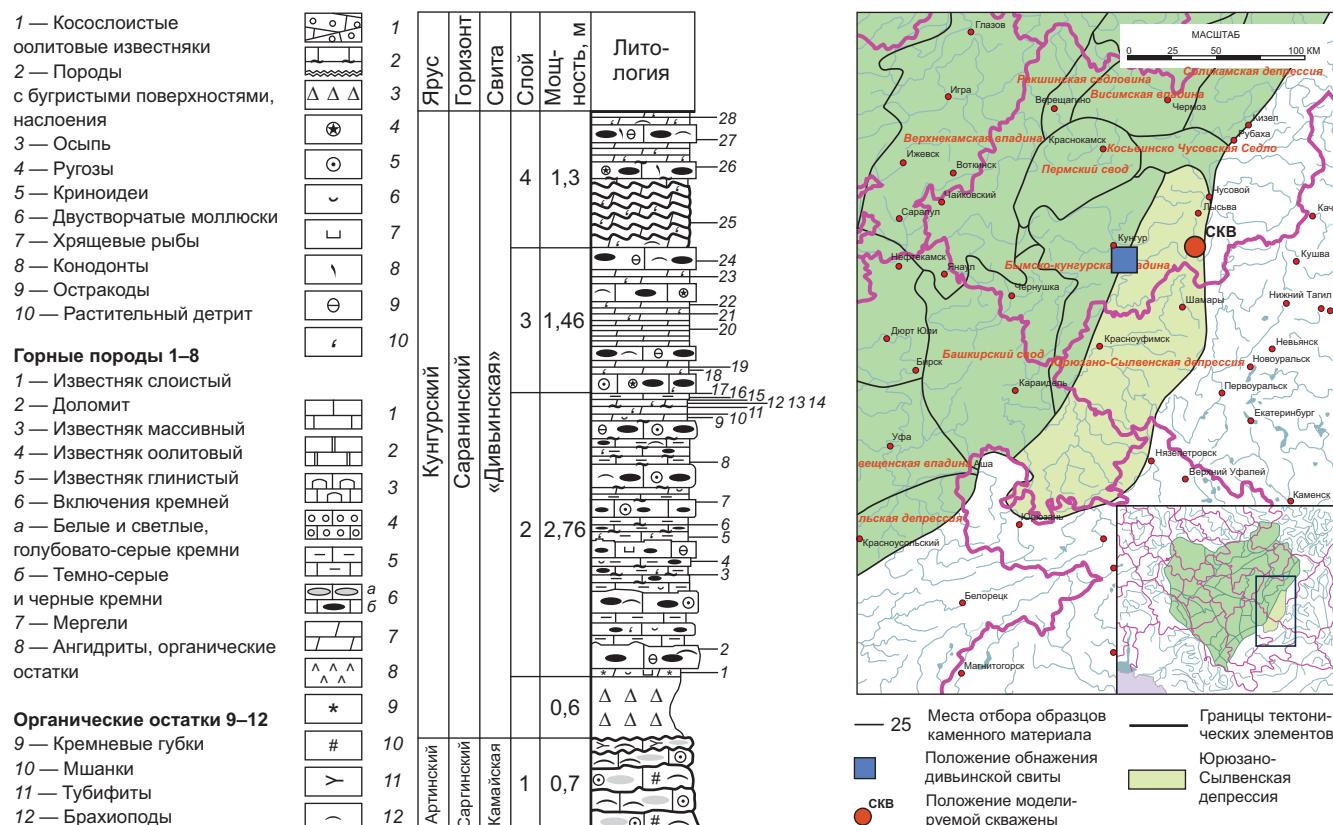


Рис. 1. Схема отбора образцов и положение района исследований на тектонической схеме ВУ НГБ

бассейнов варьируется от незначительного, не превышающего 20 %, до основного.

В Предуральском краевом прогибе основными нефтегазоматеринскими породами считаются отложения рифея, венда, девона (доманиковые отложения) и каменноугольного возраста (бухаровская свита и другие) [Кожанов, Большакова, 2024; Орлова, Полудеткина, 2023; Галкин, 2005]. В пределах платформенной части Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (ВУ НГБ) пермские отложения залегают на небольших глубинах (от 0 до 700 м), однако в краевом прогибе они могут достигать глубин, на которых может происходить генерация углеводородов [Мизенс, 1997]. В данной статье подробно рассмотрена дивыинская свита, которая представляет собой одну из потенциальных материнских свит пермского возраста в Предуральском краевом прогибе. Дивыинская свита распространена в Юрюзано-Сылвенской и Соликамской депрессии (на юге) Предуральского краевого прогиба, а также имеются ее естественные выходы на платформенной части ВУ НГБ (Былско-Кунгурская впадина).

По результатам проведенных исследований определены геохимические и литологические характеристики разреза дивыинской свиты (типы органического вещества (ОВ), и их зависимость от литологического состава; степень преобразованности ОВ, спектры преобразованности ОВ). Полученные данные использовались для построения бассейновой модели в пределах Юрюзано-Сылвенской депрессии.

Главной целью исследований было определение геологических и геохимических характеристик, возможность генерации нижнепермских нефтегазоматеринских толщ, и оценка возможности их вклада в формирование нефтегазоносности Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского краевого прогиба. В работе использовался комплекс геохимических и литолого-стратиграфических методов для определения среды осадконакопления, что позволило установить взаимосвязь между составом ОВ и палеогеографическими условиями. Полученные характеристики разреза дивыинской свиты дали возможность предположить свойства нефтегазоматеринских пород (НГМП), и использовать данные для создания бассейновой модели (1D моделирование) в пределах Юрюзано-Сылвенской депрессии.

Материалы и методы. Основой для проведения исследований послужили образцы каменного материала из естественного обнажения дивыинской свиты в пределах зоны сочленения Юрюзано-Сылвенской депрессии и Былско-Кунгурской впадины (рис. 1). Также проведены литологические (расчленение и корреляция по визуальным признакам, минералого-петрографические методы) и палеонтологические (микропалеонтологический метод) исследования. Изучена коллекция из 28 образцов мергелей и известковых аргиллитов дивыинской свиты (пиролиз — 28 обр., пиролиз с моделированием кинетики преобразования ОВ — 2 обр.) (рис. 1).

Образцы были отобраны авторами статьи в ходе полевых выездов 2017 и 2024 гг.

Основными объектами исследования в настоящей работе были мергели и известковистые аргиллиты обнажения дивыинской свиты. Пиролитические исследования выполнялись на приборах Rock-Eval 6 и Hawk. Исследования на приборе Rock-Eval 6 (1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 20, 22, 24–28) (рис. 1) проводились в 2017 г., в лаборатории геохимии АО «КамНИИКИГС», образцы для исследования на приборе Hawk (остальные образцы) были отобраны из тех же слоев обнажения в 2024 г.

Кинетические спектры деструкции ОВ. С помощью пиролитического оборудования на основе рабочей станции HAWK осуществлялось определение кинетических параметров преобразования ОВ потенциальных НГМП посредством программируемого нагрева исследуемого образца. Суть кинетического метода заключается в нагреве серии от 3 до 5 навесок одного и того же образца с разными скоростями повышения температуры пиролиза в инертной среде. Для калибровки и тестирования оборудования используются длительные временные схемы нагрева в 1 °С/мин, 2 °С/мин, а также 5 °С/мин, 10 °С/мин и 30 °С/мин от 300 до 650 °С. Полученные результаты открытого пиролиза обрабатывались с помощью специального ПО «Kinetics2015». Конечным результатом обработки являются кинетические спектры образования углеводородов из керогена. Для определения кинетических параметров нефтеобразования ОВ пород выбирались образцы с высоким содержанием ОВ (TOC — Total Organic Carbon) и высоким нефтегенерационным потенциалом на самой начальной стадии нефтегазообразования (T_{\max} менее 430–440 °С или R° менее 0,5–0,6 %).

Определение содержания битумоида в породе выполнялось для образцов 1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 20, 22, 24–28 методом горячей экстракции хлороформом в аппаратах Сокслета [Руководство..., 1966]. Исследования выполнены в лаборатории геохимии АО «КамНИИКИГС» в 2017 г.

Определение концентрации хлороформенных битумоидов количественно проводилось с помощью экстракции раздробленной породы в аппаратах Сокслета с последующей отгонкой растворителей и определением содержания битумоидов весовым методом [Руководство..., 1966]. Фракционирование битумоидов пород осуществлялось методом тонкослойной хроматографии. Метод состоит в разделении битумоида на фракции — легкие и тяжелые смолы, ароматические и парафино-нафтеновые УВ, за счет их перераспределения между слоем адсорбента и подвижными растворителями. Асфальтены осаждаются из битумоида петролейным эфиром и определяются гравиметрически после высушивания [Белоконь, 1985].

Бассейновое 1D моделирование проводилось при помощи специализированного ПО «PetroMOD» на

основе данных скважины, пробуренной в северо-восточной части Юрзано-Сылвенской депрессии.

Результаты и обсуждение. Обстановки осадконакопления пермских отложений на территории естественного выхода пород дивыинской свиты (заказник «Предуралье»). Заказник Предуралье относится к зоне сочленения платформенной части и краевого прогиба ВУ НГБ (зона сочленения Бымско-Кунгурской впадины и Юрзано-Сылвенской депрессии).

Дивыинская свита в рассматриваемом районе протягивается субмеридиональной полосой вдоль западной окраины Юрзано-Сылвенской впадины Предуральского прогиба в 6 км от изученных разрезов (рис. 2).

Граница сочленения карбонатного плато Уфимского вала и Предуральского прогиба, известная как Суксунский разлом, проходит в окрестностях с. Усть-Кишерть. Здесь отмечается контакт разнотипных и разновозрастных пород. На правом берегу субмеридионального участка р. Сылвы обнажаются биогермы сылвенской свиты саранинского горизонта кунгурского яруса. На левом берегу Сылвы в устье р. Таз вскрыты турбидитовые песчаники кошелевской свиты иренского горизонта кунгурского яруса [Мизенс, 1997]. Типовая дивыинская свита делится на три части и сложена мергелями, аргиллитами с прослойями известняков [Беклемишев и др., 1973]. В породах почти постоянно присутствуют спикулы губок, встречаются спонголиты. Дивыинская свита является фациальным, одновозрастным аналогом камайской свиты саргинского горизонта верхнеаргинского подъяруса и рифогенного комплекса сылвенской и шуртанской свит саранинского горизонта кунгурского яруса востока платформы. Отмечается, что в приплатформенной части ее мощность не превышает 10 м.

На территории заказника Предуралье дивыинская свита обнаружена только в двух разрезах — Межевои Лог и Камайский Лог [Пономарева, Хопта, 2023]. Образцы пород дивыинской свиты для исследований отобраны из обнажения Камайского лога. Камайский лог и одноименный разрез находятся в ядре пологой антиклинальной складки Уфимского вала (восточная часть Бымско-Кунгурской впадины).

В Камайском Логу породы представлены равномерным чередованием одинаковых по мощности плит окремнелых известняков и спонголитов с пакетами тонкоплитчатых известковых аргиллитов, с желваками черных кремней. В этой части многочисленны спикулы кремневых губок, встречаются брахиоподы, криноиды, мелкие одиночные ругозы, растительный детрит, конулярии, зубы и плавниковые шипы хрящевых рыб, чешуи и кости лучеперых рыб. Верхняя часть дивыинской свиты в обоих разрезах сложена мергелями, известковыми аргиллитами серыми, коричнево-серыми, алевритистыми, тонко- и микрослоистыми, плитчатыми, с ровными поверхностями наслойения, с остатками мелких брахиопод,

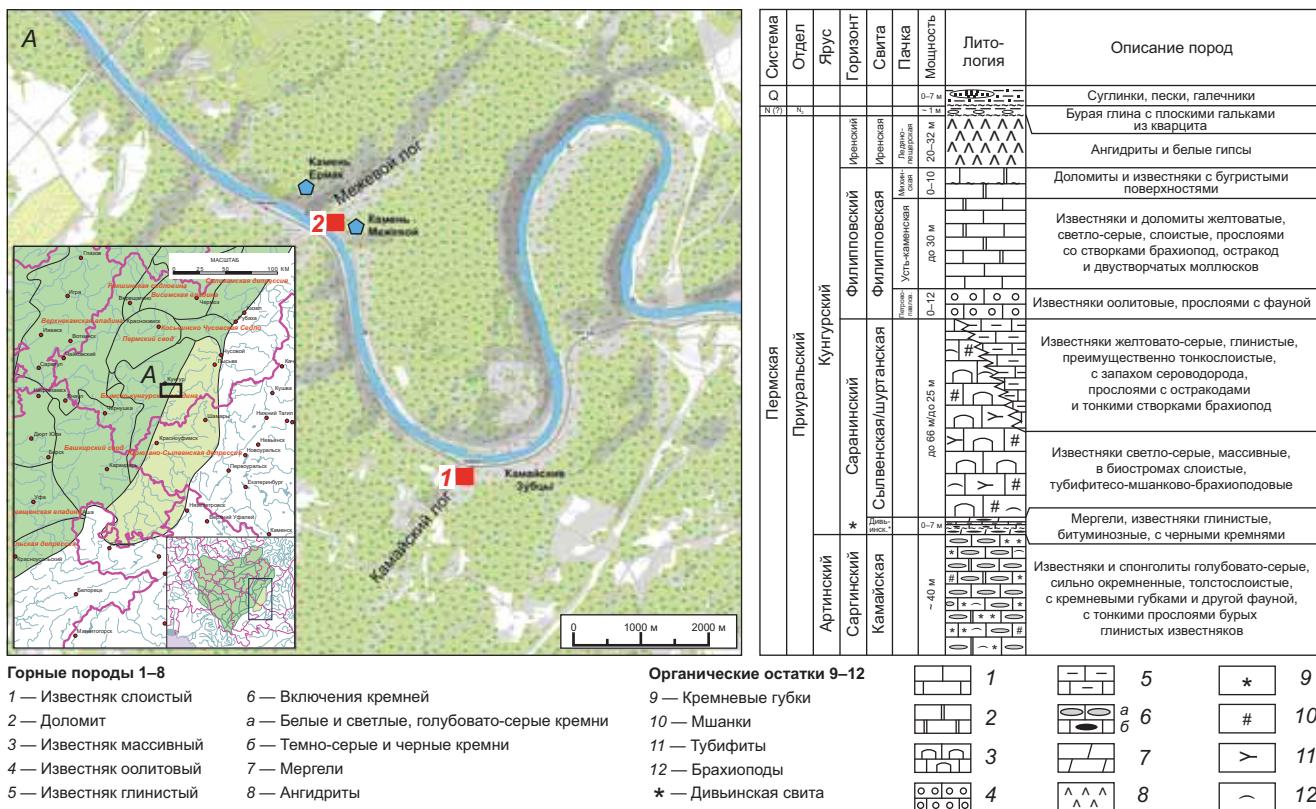


Рис. 2. Схема расположения разрезов с выходами пород дивынской свиты и стратиграфическая колонка заказника «Предуралье». 1 — Камайский Лог, 2 — разрез Межевой Лог

двустворчатых моллюсков, лучеперых и хрящевых рыб, прослойми обогащены мелким растительным детритом, встречаются неизвестковые водоросли (?) и фрагменты стволов хвойных и хвоощевидных растений *Paracalamites frigidus* Neub. Имеется несколько прослоев темно-серых, глинистых известняков с черными кремнями (10–15 см). Перекрывается дивыинская свита в Межевом Логу породами биострома сывленской свиты, в Камайском Логу — светлыми желтовато-серыми, охристыми известняками шуртанской свиты. Мощность дивыинской свиты заказника Предуралье не превышает 7 м. Комплексом фораминифер свита датируется кунгурским ярусом по присутствию *Nodosinelloides pugioidea simulata* (Zolotova) и многочисленным *Hemigordius* [Пономарева и др., 2017]. Рассматриваемая толща практически тождественна средней и верхней частям дивыинской свиты.

Карбонатный материал в исследованных породах микрозернистый, в сочетании с пелитовыми частицами он указывает на их формирование в условиях морского шельфа с глубинами ниже базиса штормовых волн (вероятно 70–100 м). Терригенный и глинистый материал, а также растительный детрит демонстрируют связь бассейна с Сылвенской впадиной Предуральского прогиба, так как на западе располагалась обширная карбонатная платформа, протянувшаяся до меридиана Москвы. Напрашивается вывод о формировании здесь в послекамайское (раннекунгурское) время впадины, более

глубоководной в сравнении с окружающим ландшафтом. Впадина вдавалась в массив карбонатной платформы примерно на 10 км и открывалась на восток в Предуральский прогиб в тыловой части. На самом западном участке, в разрезе Межевой Лог, накопившаяся толща подверглась разрушению в начале филипповского времени кунгурского века. В дивыинской части разреза между нижней и верхней пачками вмыты отдельные плиты органогенных известняков биострома сывленской свиты саранинского горизонта.

Ввиду отсутствия геофизических сведений и данных бурения, границы впадины можно определить по косвенным признакам. Выявленная линейная зона совпадает с крупным полем развития фаций межрифовых понижений шуртанской свиты сараннского горизонта. Эти фации дивынская свита подстилает. Впадина была компенсирована осадками оолитовых известняков в начале филипповского времени. Оолитовые известняки петропавловской пачки филипповской свиты кунгурского яруса образуют линзу северо-западного простирания между Камнями Коронка и Межевой размером 2×5 км. Долиной р. Сылвы линза разделена на две части. На этом участке петропавловская пачка имеет максимальную мощность более 12 м.

К условиям формирования самой толщи можно добавить следующее. Значительная мощность окремнелых известняков и спонголитов камайской свиты саргинского горизонта, обилие спикул губок в по-

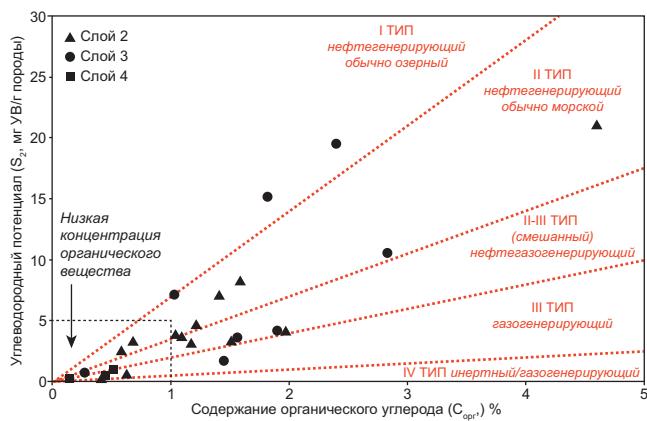


Рис. 3. График распределения значений отношения остаточного потенциала (S_2) к содержанию органического углерода (C_{opr}) для пород дивыинской свиты

породах дивыинской свиты, обогащение мергелей и аргиллитов органическим веществом, специфический комплекс органических остатков и прочие признаки говорят о том, что камайская и дивыинская свиты накопились в зоне апвеллинга. Эти зоны формируются на внешнем краю шельфа, характеризуются кислородным минимумом [Мизенс, 1997]. Созданию такой обстановки на шельфе способствуют заморы, время от времени случающиеся в зонах подъема глубинных вод. Осадок зон апвеллинга всегда содержит кремневые скелеты морских организмов, зерна кварца, кремнистые глины, горючие сланцы, фосфориты, глауконит. Формирование зон апвеллинга связано с глобальными процессами. В середине артинского века произошел подъем уровня Мирового океана, изменилась циркуляция океанских вод. Уральский морской путь постепенно закрывался, температура мелководья падает. Наступление фазы углубления фиксируется исчезновением фузулинидово-мшанковых известняков и появлением спикулит-мшанковых известняков и спонголитов.

Геохимические характеристики дивыинской свиты. Содержание органического углерода (C_{opr}) в породах дивыинской свиты изменяется от 0,15 до 4,6 %, медианное значение 1,09 %. По результатам пиролиза содержание S_1 составляет 0,01–0,51 мг УВ/г породы (медиана 0,09 мг УВ/г породы). Величина параметра S_2 0,09–21,04 мг УВ/г породы. Диапазон изменения водородного индекса ($\text{HI} = 26\text{--}537$ мг УВ/г C_{opr}) позволяет отнести кероген ко II (сапропелевому) и смешанному II-III (сапропелево-гумусовому) типам (рис. 3). Значения T_{max} варьируются в диапазоне 419–446 °C, что соответствует градации ПК₃–МК₁ (рис. 4) и говорит о том, что породы только начали вступать в зону «нефтяного окна». Степень выработанности керогена (PI) низкая — от 0,01 до 0,28. Наблюдается дифференциация пиролитических характеристик НГМТ по слоям.

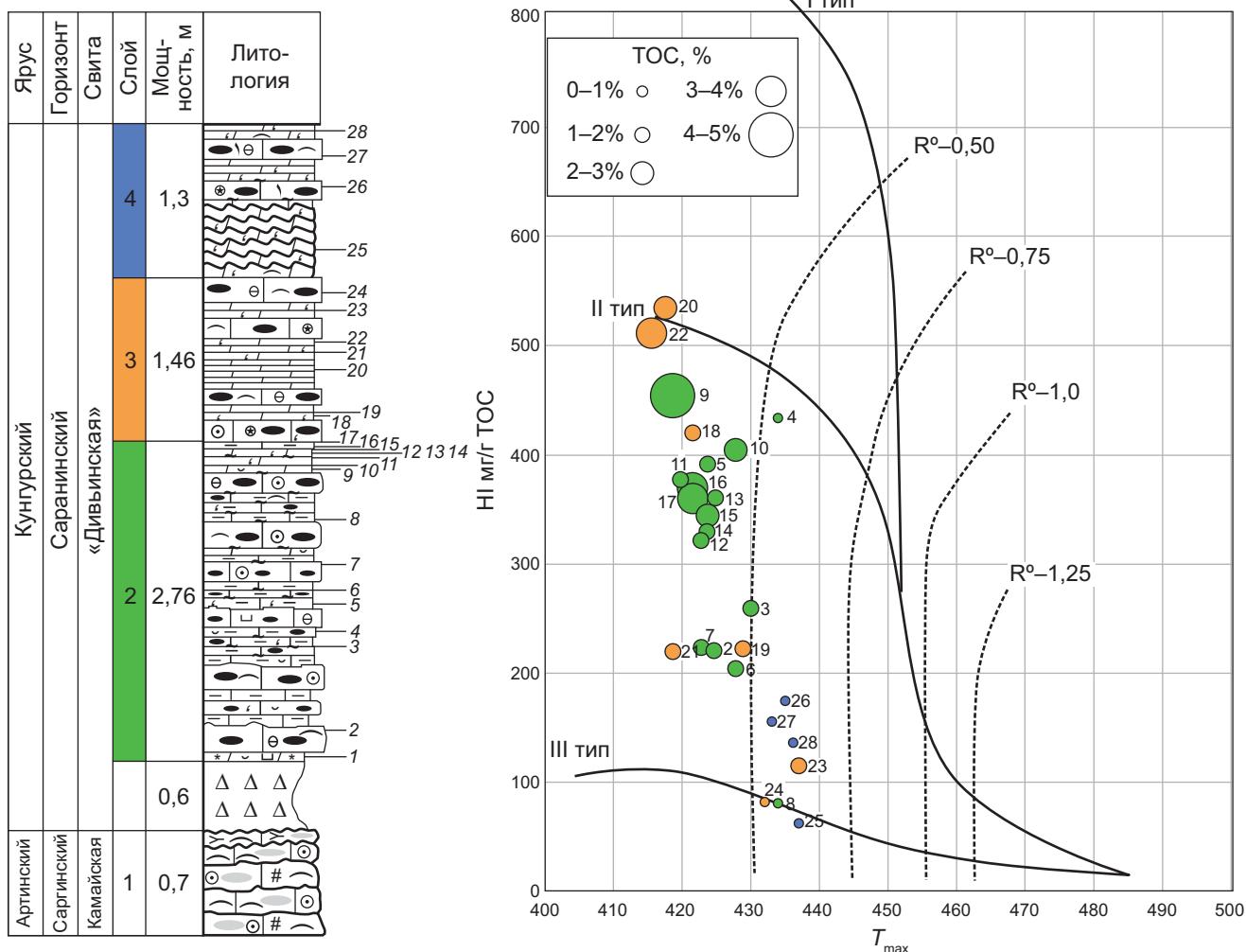
В слое 2 содержание органического углерода (C_{opr}) изменяется от 0,41 до 4,6 %, что качественно характеризует породы от очень бедных до обогащен-

ных органическим веществом, медиальное значение составляет 1,17 %. Диапазон содержания свободных углеводородов (S_1) очень широкий — от 0,02 до 0,39 мг УВ/г породы. Параметр S_2 изменяется от 0,13 до 21,04 мг УВ/г породы (медиана — 3,63 мг УВ/г породы), свидетельствуя об удовлетворительном и высоком материнском потенциале пород. Исключение — образец 2 с крайне бедными генерационными свойствами ($S_2 = 0,13$ мг УВ/г породы). Данные пиролиза показывают в целом умеренный нефтегенерационный потенциал ($S_1 + S_2 = 0,18\text{--}21,43$ мг УВ/г породы), медиальное значение — 3,72 мг УВ/г породы. Судя по величине водородного индекса ($\text{HI} = 83\text{--}457$ мг УВ/г C_{opr}), органическое вещество относится к смешанному II-III типу, с большой долей участия II типа — сапропелевого [Тиссо, Вельте, 1981]. Значения индекса нефтяной продуктивности PI (0,01–0,28) с медиальным значением 0,03, указывают на низкую степень выработанности керогена. Катагенетическая зрелость соответствует стадии ПК₃–МК₁ ($T_{\text{max}} = 419\text{--}445$ °C).

Выход битумоида составляет 0,013–0,04 % (в среднем 0,026 %). Битумоид смолистого или маслянисто-смолистого типа. В составе значительна роль углеводородов (30–55 %), среди которых доминируют насыщенные (20–41 %). Смолисто-асфальтеновая составляющая битумоида (45–70 %) представлена, в основном, тяжелыми смолами (25–51 %), а доли легких смол и асфальтенов близки: 5,38–10,48 % легких смол и 5,73–9,71 % асфальтенов.

Слой 3: полученные значения содержания C_{opr} в образцах слоя 3 изменяются в диапазоне от 0,27 до 3,79 %. В целом, большинство образцов содержат $C_{\text{opr}} > 1$ %, что характеризует их как относительно обогащенные органическим веществом. Содержание S_1 низкое — от 0,03 до 0,67 мг УВ/г породы. А в отношении материнских свойств качество пород очень высокое: параметр S_2 варьирует от 1,7 до 19,52 мг УВ/г породы. Лишь в одном образце S_2 составляет 0,68 мг УВ/г породы. Нефтегенерационный потенциал по пиролизу в целом хороший ($S_1 + S_2 = 0,78\text{--}20,03$ мг УВ/г породы). Водородный индекс изменяется от 84 до 537 мг УВ/г C_{opr} , что предполагает наличие гумусово-сапропелевого и гумусового органического вещества (II и III типы), с преобладанием сапропелевой составляющей. Степень выработанности керогена (PI) низкая — от 0,02 до 0,13. Значения $T_{\text{max}} = 419\text{--}446$ °C свидетельствуют о градации катагенеза ПК₂–МК₁.

Выход битумоида колеблется от 0,02 до 0,24 % (0,1 % в среднем). Битумоид смолистого или смолисто-асфальтенового типа. Состав битумоида смолисто-асфальтеновый (59–81 %). Доля тяжелых смол варьирует от 38 до 55 %, доля углеводородов с преобладанием насыщенных — от 19 до 41 %. Доля легких смол, асфальтенов и ароматической фракции часто близки (7–12 %), за исключением одного случая с наименьшим содержанием углеводородов (19 %) и наиболее высокой долей асфальтенов (21 %).

Рис. 4. Пиролитические характеристики на диаграмме HI от T_{\max}

Слой 4: невысокие значения $C_{\text{опр}}$ изменяются в узких пределах — от 0,15 до 0,51 %. Параметр S_1 очень низок — менее или равен 0,06 мг УВ/г породы. Остаточный углеводородный потенциал (продукты пиролиза керогена) можно охарактеризовать как «бедный»: значения S_2 лежат между 0,22 и 0,99 мг УВ/г породы. Данные пиролиза показывают в целом небольшой суммарный нефтяной потенциал пород: сумма $S_1 + S_2$ не превышает 1,05 мг УВ/г породы. Диапазон изменения водородного индекса HI (64–177 мг УВ/г $C_{\text{опр}}$) позволяет отнести кероген к III (гумусовому) типу, обладающему, в основном, газовым потенциалом. Катагенетическая зрелость пород отвечает началу зоны «нефтяного окна» (T_{\max} 435–440 °C).

Выход битумоида низкий, не превышает 0,015 %. Битумоид смолистого типа. Во фракционном составе битумоида на первый план выходят метаново-нафтено-вальные углеводороды (36–45 %), в целом же на углеводородные фракции приходится 46–56 %. Тяжелые смолы занимают подчиненное положение (25–37 %). Доли ароматической фракции, легких смол и асфальтенов близки и варьируют в диапазоне 5–13 %.

Кинетические спектры деструкции ОВ и бассейновое моделирование. Полученные результаты

открытого пиролиза обрабатывались с помощью ПО «Kinetics2015». Однокомпонентные кинетические спектры деструкции ОВ определены для II типа керогена второго слоя (образцы № 15 и 17). Содержание TOC в образцах различны. Для образца № 15 TOC = 2,15 %, а для образца № 17 = 3,27 %. Показатели T_{\max} для образцов равны 424 (образец № 15), и 422 (образец № 17).

Результаты обработки: на однокомпонентных кинетических спектрах ОВ образца № 15 (при фиксированном частотном факторе $A = 10^{14} \text{ с}^{-1}$) отмечается диапазон выхода УВ — энергии активации (E_a) от 47 до 64 ккал/моль (рис. 5). Энергия активации максимального выхода УВ соответствует 53–54 ккал/моль. При не фиксированном частотном факторе ($A = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$) диапазон выхода УВ от 45 до 61 ккал/моль. Энергия активации максимального выхода УВ соответствует 51–52 ккал/моль. Для образца № 17 (при фиксированном частотном факторе $A = 10^{14} \text{ с}^{-1}$) диапазон энергии активации составляет от 45 до 65 ккал/моль. Энергия активации максимального выхода УВ фиксируется при значениях 53–55 ккал/моль. При не фиксированном частотном факторе ($A = 9,5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$) диапазон выхода УВ варьируется от 47 до 69 ккал/моль. Энергия

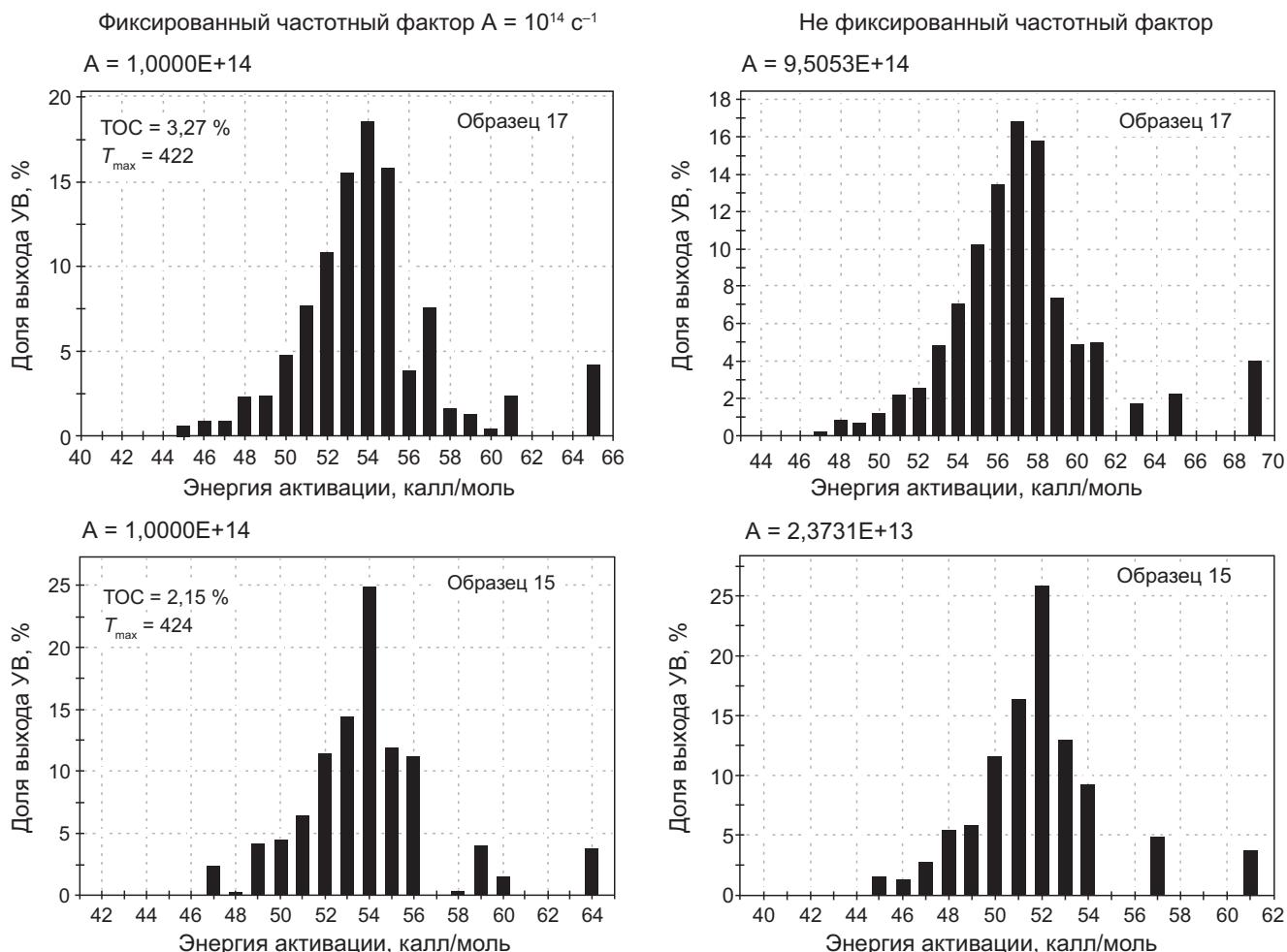


Рис. 5. Результаты обработки кинетических спектров в ПО «Kinetics2015»

активации максимального выхода УВ соответствует 56–58 ккал/моль.

Для моделирования выбрана скважина с наибольшим погружением пород дивыинской свиты на территории Юрзано-Сылвенской депрессии (рис. 6). Рассчитанные кинетические спектры в программе *Kinetics2015* показали различия между результатами обработки спектров при фиксированном и не фиксированном частотном факторе. При фиксированном частотном факторе коэффициент трансформации (TR — transformation ratio) варьируется от 0,24 до 0,25. При не фиксированном частотном факторе данный коэффициент варьируется уже от 0,23 до 0,45. Полученные данные говорят о том, что дивыинская свита в пределах Юрзано-Сылвенской депрессии способна генерировать углеводороды в местах ее максимального погружения.

Заключение. Накопление дивыинской свиты происходило в зоне апвеллинга (зоны края шельфа, характеризующиеся кислородным минимумом). Созданию такой обстановки на шельфе способствуют заморы, время от времени случающиеся в зонах подъема глубинных вод. Формирование зон апвеллинга связано с глобальными процессы-

ми. В середине артинского века произошел подъем уровня Мирового океана, изменилась циркуляция океанских вод. Уральский морской путь постепенно закрывался, температура мелководья падала.

В образцах из обнажения дивыинской свиты содержится значительное количество органического углерода — в среднем более 1 %. Уровень водородного индекса свидетельствует о том, что органическое вещество относится к керогену II типа, со значительными примесями органического вещества III типа. Все проанализированные образцы имеют невысокую термическую зрелость, с T_{\max} около 436 °С (ПК₃ — МК₁). Судя по высокому содержанию и типу органического вещества породы дивыинской свиты характеризуются значительным нереализованным потенциалом.

В пределах Юрзано-Сылвенской депрессии генерация в отложениях дивыинской свиты может начинаться уже на глубинах 1900–2100 м. Степень выработанности потенциала отложений дивыинской свиты в наиболее погруженных частях Юрзано-Сылвенской депрессии достигает 0,23–0,45 %, что обозначает, что эти породы могли внести свой вклад в формирование нефтегазоносности Предуральского краевого прогиба.

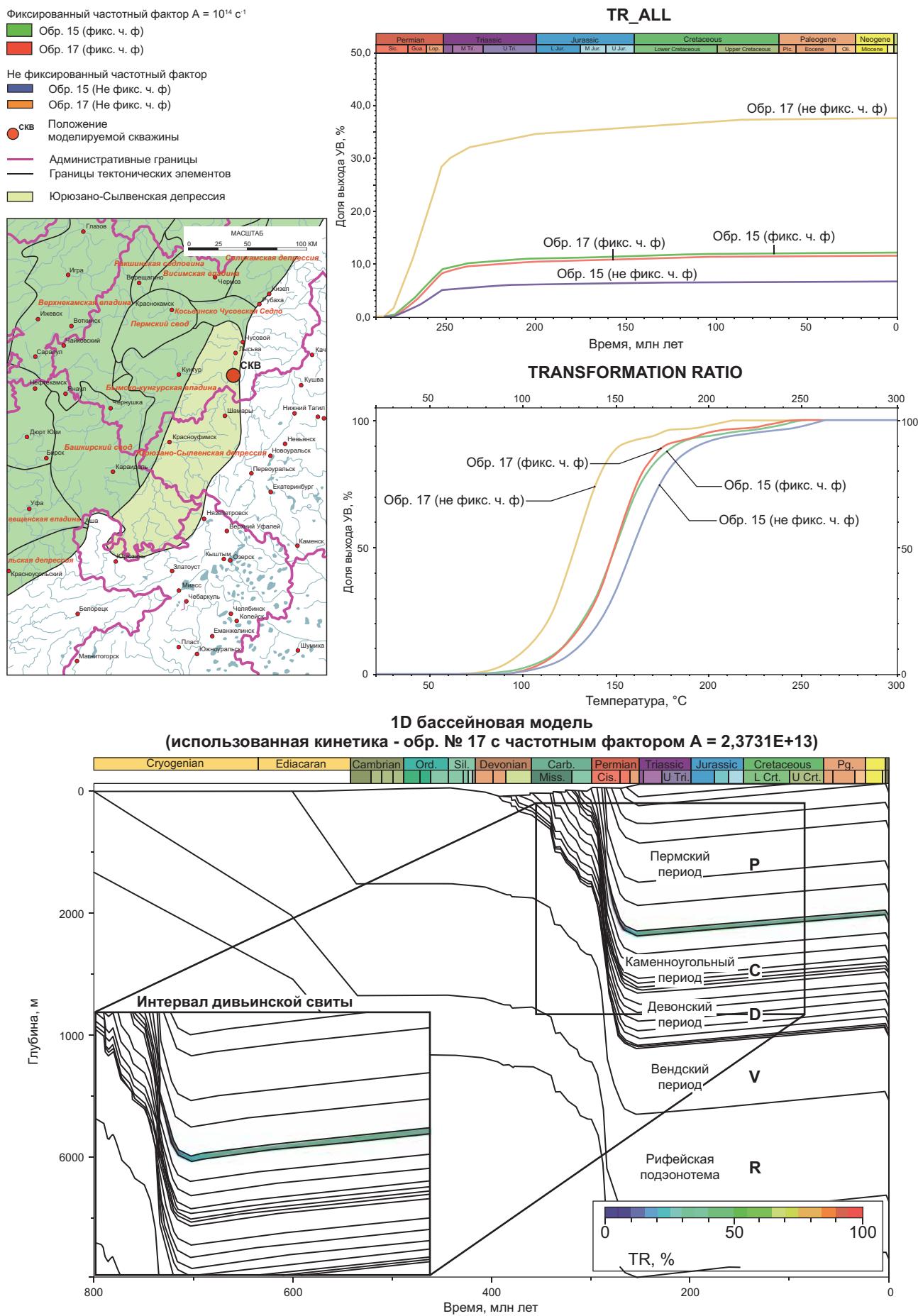


Рис. 6. Результаты моделирования с применением полученных кинетических спектров

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беклемишиев В.С., Красильников Б.В., Наборщиков В.П. Дивья свита Сылвенской впадины и природа поднятий, картируемых по ее кровле // Нижнепермские отложения Камского Приуралья. Пермь, 1973. С.247–252.

Белоконь Т.В., Белокрылова Л.М. Способ фракционирования битумоидов пород с помощью тонкослойной хроматографии // Лаб. и технол. исслед. и обогащ. минер, сырья. Экспресс-информация. М.: ВИЭМС, 1985. Вып. 12. С. 1–6.

Галкин С.В. Методика вероятностной оценки генерационных перспектив в «старых» нефтедобывающих районах (на примере Пермского Прикамья) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 9–10. С. 5–8.

Кожанов Д.Д., Большакова М.А. Оценка вклада до-кембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования // Записки Горного института. 2024. №. 266. С. 199–217.

Мизенс Г.А. Верхнепалеозойский флиш западного Урала. УрО РАН, 1997.

Орлова А.Ю., Полудеткина Е.Н. Геохимия нефти и органического вещества доманиковых отложений южно-татарского свода // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2023. Т. 18, № 1. С. 188–208.

Пономарева Г.Ю., Хопта И.С. Дивыинская свита в разрезах «классического кунгура» (пермская система, Пермский край): Сборник тезисов Седьмой Всероссийской конференции «Верхний палеозой России» (23–25 октября 2023 г., Казань, Россия) [Электронный ресурс]. — Электронные текстовые данные. Казань: Издво Казанского университета, 2023. С. 69–70.

Руководство по анализу битумов и рассеянного органического вещества горных пород / Под ред. В.А. Успенского. Л.: Недра, 1966. 315 с.

Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 504 с.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 28.02.2025

УДК 622.276
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-69-77

ПРОГНОЗ ОТЛОЖЕНИЯ СУЛЬФАТНЫХ СОЛЕЙ КАЛЬЦИЯ, БАРИЯ И СТРОНЦИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

**Фарит Азатович Шарипов¹✉, Елизавета Юрьевна Вобликова²,
Татьяна Алексеевна Киреева³, Вячеслав Шарифуллович Мухаметшин⁴,
Руслан Альбертович Гилязетдинов⁵**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; farit.sharipov.2017@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; voblikova.e.yu@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ta_kireeva@mail.ru

⁴ Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета, Октябрьский, Россия; vsh@of.ugntu.ru

⁵ Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета, Октябрьский, Россия; gilyazetdinov_2023@mail.ru

Аннотация. В работе проведен прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция для нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области. Прогноз отложения солей осуществлен как с помощью аналитического расчета по методике Оддо и Томсона, так и с помощью термодинамического моделирования. В результате определения количества сульфатных солей, возможных к выпадению, установлено насколько может снизиться проницаемость призабойной зоны пласта и дебит добывающих скважин по нефти за счет выпадения гипса, барита и целестина.

Ключевые слова: Непско-Ботуобинская нефтегазоносная область, солеотложение, отложение сульфатных солей в добывающих скважинах, аналитический метод Оддо и Томсона, поддержание пластового давления, термодинамическое моделирование

Для цитирования: Шарипов Ф.А., Вобликова Е.Ю., Киреева Т.А., Мухаметшин В.Ш., Гилязетдинов Р.А. Прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция при разработке нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботуобинской антеклизы (Восточная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 69–77.

FORECAST OF CALCIUM, BARIUM AND STRONTIUM SULFATE SALT DEPOSITS DURING DEVELOPMENT OF THE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD OF THE NEPA-BOTUOBINSKAYA ANTECLISE (EASTERN SIBERIA)

**Farit A. Sharipov¹✉, Elizaveta Yu. Voblikova², Tatyana A. Kireeva³,
Vyacheslav Sh. Mukhametshin⁴, Ruslan A. Gilyazetdinov⁵**

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; farit.sharipov.2017@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; voblikova.e.yu@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ta_kireeva@mail.ru

⁴ Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky, Russia; vsh@of.ugntu.ru

⁵ Institute of Oil and Gas of the Ufa State Petroleum Technical University, Oktyabrsky, Russia; gilyazetdinov_2023@mail.ru

Abstract. The paper presents a forecast of calcium, barium and strontium sulfate salt deposition for the Nepa-Botuoba oil and gas condensate field. The salt deposition forecast was made using both analytical calculations by the Oddo and Thomson method and thermodynamic modeling. As a result of determining the amount of sulfate salts that could precipitate, it was established how much the permeability of the bottomhole formation zone and the oil production rate of producing wells could potentially decrease due to the precipitation of gypsum, barite and celestine.

Keywords: Nepa-Botuoba oil and gas region, salt deposition, sulfate salt deposition in producing wells, Oddo and Thomson analytical method, reservoir pressure maintenance, thermodynamic modeling

For citation: Sharipov F.A., Voblikova E.Yu., Kireeva T.A., Mukhametshin V.Sh., Gilyazetdinov R.A. Forecast of calcium, barium and strontium sulfate salt deposits during development of the Nepa-Botuoba anteclide oil and gas condensate field (Eastern Siberia). *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 69–77. (In Russ.).

Введение. Восточная Сибирь является относительно новым и быстро развивающимся нефтегазодобывающим регионом страны. В период существования СССР на территории Непско-Ботубинской нефтегазоносной области (НГО) было открыто несколько крупных месторождений нефти и газа, однако освоение запасов углеводородов (УВ) откладывалось из-за значительной удаленности от потребителей энергоресурсов и инфраструктурных ограничений. Вследствие этого промышленная добыча нефти и газа началась немногим более 10 лет назад с момента запуска магистрального нефтепровода Восточная Сибирь — Тихий океан (ВСТО) и магистрального газопровода Сила Сибири. Совместно с вводом в разработку месторождений, открытых на территории Непско-Ботубинской НГО, стали актуальными проблемы, осложняющие процессы добычи УВ, одной из которых является отложение неорганических солей (НОС).

Солеотложение — процесс выпадения из раствора различных неорганических соединений, который происходит в результате формирования перенасыщенных растворов как в смеси пластовой и закачиваемой воды (смещение «несовместимых» вод), так и в результате изменения термобарических условий (снижение температуры и давления при подъеме и транспортировке добываемой продукции) [Кашавцев, Мищенко, 2004; Киреева, 2017]. Отложение минералов в призабойной зоне пласта (ПЗП), в насосно-компрессорных трубах и в наземном оборудовании системы сбора и подготовки приводит к снижению производительности скважин, сокращению межремонтного периода, отказу насосного оборудования и другого дорогостоящего нефтепромыслового оборудования, что, в конечном счете, сказывается на технико-экономических показателях разработки месторождения.

К основным видам НОС, образующихся во время разработки нефтяных и газовых месторождений, относятся: сульфатные соли (гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ангидрит CaSO_4), барит BaSO_4 , целестин SrSO_4 , карбонатные соли (кальцит CaCO_3 , магнезит MgCO_3) и хлоридные соли (галит NaCl). Данные осадки редко представлены чистыми минералами, чаще их смесью с другими соединениями. Так, помимо основных компонентов в составе неорганических солей практически всегда присутствуют продукты коррозии (оксиды, гидроксиды, сульфиды и карбонаты железа), кремнезем, а также органические вещества (асфальтены, парафины и смолы) [Кашавцев, Мищенко, 2004].

С целью предупреждения процессов образования отложений неорганических солей преимущественно используются химические и технологические приемы [Кашавцев, Мищенко, 2004]. Химические и химико-технологические методы основаны на добавлении в закачиваемые воды специальных растворов-ингибиторов, препятствующих процессу отложения неорганических солей, а также

десульфатировании закачиваемой воды (метод обратного осмоса), насыщении ее хлоридом натрия и т. д. Используется также оборудование со специальными гладкими покрытиями, которое препятствуют образованию «зародышей» кристаллизации и увеличению скорости прокачки с целью вывести солеобразование на поверхность. Однако основным методом предупреждения солеобразования является все же применение ингибиторов. Но для использования ингибиторов необходимо, прежде всего, определить, какой вид соли будет отлагаться, потому что ингибиторы имеют узко направленное действие, и должны добавляться в закачиваемые воды до начала процесса солеотложения.

Для месторождений нефти и газа на территории Непско-Ботубинской НГО характерны хлоридное и сульфатное солеотложение, в меньшей мере карбонатное [Салихов, Костюк, 2020]. На образование данных неорганических солей оказывают влияние климатические и геологические особенности месторождений.

Для некоторых месторождений характерны низкая пластовая температура ($T_{\text{пл}}$) флюида ($+14^{\circ}\text{C}$), добавочно снижающаяся во время подъема добываемой продукции за счет влияния многолетнемерзлых пород (ММП), распространенных на глубину до 600 м, и аномально низкие пластовые давления ($P_{\text{пл}}$) (на некоторых месторождениях начальные $P_{\text{пл}}$ ниже гидростатического давления на 29 %), которые зачастую ниже давления насыщения ($P_{\text{нас}}$) [Кусов, 2014].

Пластовые воды продуктивных горизонтов представлены крепкими рассолами хлор-кальциевого типа с минерализацией ($M_{\text{общ}}$) до 600 г/л [Зимин и др., 2020].

Поровое пространство терригенных продуктивных пластов в силу особенностей осадконакопления в регионе и в результате действия палеотектонических процессов может быть заполнено катагенным галитом (NaCl), который может растворяться в случае закачки пресных и слабоминерализованных вод [Зимин и др., 2020].

Отложение хлористого натрия (NaCl) на нефтяных и газовых месторождениях Непско-Ботубинской НГО происходит из-за образования насыщенных растворов хлорида натрия, которые формируются при продвижении вглубь пласта закачиваемой воды, которая растворяет катагенный галит и постепенно достигает насыщения по NaCl . В результате к добывающей скважине поступает насыщенный солевой раствор, который при снижении термобарических условий, особенно при эксплуатации при давлении ниже $P_{\text{нас}}$, что сопровождается дегазацией и испарением раствора, «отдает» часть галита в виде твердого осадка. Удаление данного типа отложений осуществляется при помощи периодических промывок скважин пресной водой, однако данное мероприятие может приводить к перегреву узлов погружных электродвигателей (ПЭД) и гидроизоляции, а также к механическим повреждениям

кабеля при смене глубинно-насосного оборудования (ГНО) [Салихов, Костюк, 2020]. Однако в рассматриваемом случае катагеный галит в породах отсутствовал, поэтому вероятность отложения NaCl не рассматривается.

Отложение гипса происходит в результате смешения закачиваемых вод с высоким содержанием сульфат-иона с хлоридно-кальциевыми водами продуктивных пластов с меньшим содержанием сульфат иона. Также на увеличение сульфат-иона в растворе может оказывать влияние растворение и выщелачивание сульфат содержащих минералов продуктивных пластов. Для удаления отложений гипса из призабойной зоны пласта (ПЗП) и внутристекважинного оборудования применяются различные технологии: щелочно-кислотная конвертация гипсовых отложений (ЩКО), обработка раствором соляной кислоты с комплексоном, термокислотная обработка, обработка солевыми растворами, растворение отложений раствором комплексонов [Салихов и др., 2023].

В настоящее время на месторождениях Непско-Ботубинской НГО отложения карбонатов встречаются в виде незначительного налета карбоната кальция (CaCO_3) менее 1 мм на поверхности погружных электродвигателей (ПЭД) [Калинкина и др., 2016]. Увеличение интенсивности отложений карбонатов кальция и магния на месторождениях Непско-Ботубинской антиклизы прогнозируется на заключительных стадиях разработки месторождений в результате снижения пластового давления ниже $P_{\text{нас}}$, приводящего к снижению парциального давления углекислого газа, необходимого для поддержания карбонатного равновесия. Для удаления данных отложений в ПЗП и ГНО используется 12% раствор соляной кислоты [Кашавцев, Мищенко, 2004].

Также на месторождениях Непско-Ботубинской НГО возможно образование малорастворимого целестина и практически нерастворимого барита, растворимости которых составляют (в г/л, при ст. усл) $1,4 \cdot 10^{-3}$ и $2,3 \cdot 10^{-5}$ соответственно, потому что барий и стронций являются гидрохимическими аналогами кальция, их накопление в хлоридных растворах аналогично накоплению кальция. Отложения сульфата бария и сульфата стронция в отличие от гипса практически не растворяются даже сильными кислотами, а используемые в промысловой практике водные растворы солей этилдиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) для удаления целестина и солей диэтелентриаминпентауксусной кислоты (ДТПА) для удаления барита в условиях низких пластовых температур, характерных для месторождений Непско-Ботубинской НГО, из-за низкой скорости реакции является малоэффективными [Бриков, Маркин, 2018]. Кроме того, отложение барита практически всегда сопровождается образованием радиоактивных осадков радиобарита ($\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$), формирование которого связано с изоморфным замещением радием бария в кристаллической ре-

шетке BaSO_4 . Этот процесс происходит потому, что радиев является геохимическим аналогом бария, содержится всегда в пластовых и остаточных водах нефтегазовых залежей, но не образует самостоятельную минеральную фазу, вследствие крайне малого клярка [Киреева, 2023]. Накопление этих радиоактивных осадков на объектах сбора и подготовки нефти и газа представляет опасность для сотрудников производства, вследствие чего особую важность приобретает прогноз отложения именно сульфатов бария и стронция. Однако на текущий момент нефтегазодобывающие предприятия практически не определяют содержание ионов бария и стронция в пластовых водах, а прогноз солеотложения основывается на химических анализах вод, учитывающих только содержание макрокомпонентов (Cl^- , SO_4^{2-} , $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, Ca^{2+} , Mg^{2+}).

Целью данной работы является установление значимости отложения гипса, целестина и барита в добывающих скважинах одного из месторождений Непско-Ботубинской НГО. Для этого следовало, во-первых, при помощи аналитических расчетов по методике Дж.Е. Оддо и М.Б. Томсона определить возможность сульфатного солеотложения, во-вторых, дать количественную оценку отложений гипса, целестина и барита с использованием термодинамического (гидрохимического) моделирования [Кашавцев, Мищенко, 2004]. Затем, с учетом дебитов скважин требовалось рассчитать максимальное количество соли, которая может выпасть в продуктивном пласте, и определить, насколько потенциально может снизиться проницаемость ПЗП за счет выпадения рассматриваемых минералов.

Фактические данные и полученные результаты. Прогноз отложения сульфатных солей кальция, бария и стронция был проведен для нефтегазоконденсатного месторождения Непско-Ботубинской НГО Лено-Тунгусского НГБ (название месторождения запрещено для публикации недропользователем). Основным объектом разработки на месторождении является ботубинский горизонт, отложения которого представлены мелко- и среднезернистыми кварцевыми песчаниками биокской свиты нижней подсвиты вендского возраста. Песчаники массивные, местами горизонтально- и косо-слоистые, средне- и слабосцементированные. По минералогическому составу породы мономиктовые и олигомиктовые с незначительным содержанием полевых шпатов. Обломочный материал хорошо отсортирован. Цементом породы служат гипс, доломит, гидрослюдя, реже ангидрит и кварц, количество цемента изменяется от долей процента до 6,8 %, тип цементации порово-пленочный, контактный. Флюидоупором для продуктивного пласта ботубинского горизонта служит пачка доломитов с прослойями ангидритов верхней подсвиты биокской свиты толщиной порядка 20 м.

Средняя толщина продуктивного пласта составляет порядка 18 м, при средней глубине кровли

пласта в 1900 м. Для залежей характерно аномально низкое $P_{\text{пл}}$ (начальное $P_{\text{пл}} = 14,5$ МПа), средняя $T_{\text{пл}}$ составляет ~ 14 °С.

Коллекторы характеризуются высокой проницаемостью (абсолютная проницаемость — 0,25 мкм²), высокой песчанистостью (коэффициент песчанистости — 0,67 доли ед.) и низкой расчлененностью (коэффициент расчлененности — 2 ед.) при средней открытой пористости 0,146.

В плане гидрогеологического районирования месторождение расположено на юго-западном приподнятом крыле Якутского артезианского бассейна. Гидрогеологический разрез на рассматриваемой территории имеет ярусное строение. Так, верхний ярус представлен преимущественно осадочными, тектонически ненарушенными аллювиальными отложениями четвертичного и нижнеюрского возраста, а также карбонатно-терригенными породами верхнего-среднего кембрия (бордонская свита), где сосредоточены пресные и слабоминерализованные воды. Нижний гидрогеологический ярус сложен терригенными, карбонатными, реже магматическими, в различной степени трещиноватыми (закарстованными) породами нижне-среднекембрийского, нижнекембрийского межсолевого, нижнекембрийского подсолевого и вендского водоносного комплексов. Характерной особенностью геологического строения нижнего яруса является присутствие пластов каменной соли в породах нижнего кембрия (чарская свита) и интенсивная тектоническая нарушенность пластов дизъюнктивного и пликативного типов. Для пластовых вод нижнего гидрогеологического яруса характерна высокая минерализация (более 200 г/л) и высокая плотность (более 1,2 г/см³). По классификации В.А. Сулина воды представлены всеми типами: хлор-кальциевый (ХК), гидрокарбонатно-натриевый (ГКН), сульфатно-натриевый (СН) и хлоридно-магниевый (ХМ), с резким преобладанием ХК типа [Киреева, Корзун, 2022; Чистякова и др., 2020].

Разработка месторождений осуществляется горизонтальными скважинами с длиной горизонтального участка в 750 м. Средняя обводненность добываемой продукции по эксплуатационному объекту составляет порядка 40 %. Система поддержания пластового давления (ППД) осуществляется закачкой воды в горизонтальные скважины по однорядной системе внутренконтурного заводнения, при которой в поперечном направлении «чередуются» ряд добывающих и ряд нагнетательных скважин.

В качестве источника водоснабжения для ППД на ранних стадиях разработки месторождения применялись воды поверхностных источников (рек, водохранилищ) и подземные источники (пресные и слабоминерализованные воды бордонской свиты среднего кембрия). На текущий момент большая доля закачки приходится на подтоварную воду ботуобинского горизонта (табл. 1), которая представляет собой смесь пластовой воды с пресной техногенной водой. Подтоварная вода образуется

в результате отстаивания нефти в резервуарах на установках по подготовке нефти (УПН). В дальнейшем подтоварная вода очищается от механических примесей, тонкоэмульгированной нефти и различных химических реагентов для последующей закачки в пласт. По химическому составу подтоварная вода достаточно близка к пластовым водам месторождения и относится к рассолам ХК типа, однако значения $M_{\text{общ}}$ подтоварной воды значительно ниже, чем в пластовых водах. Вероятно, это происходит в результате обессоливания нефти (смешение обезвоженной нефти с пресной водой для удаления содержащихся в нефти солей) на УПН, вследствие чего полученный раствор становится более пресным. Также в подтоварной воде макрокомпонентный состав отличается от такового в пластовых водах, которые представлены пробами со скв № 1–9 (табл. 1). Химический состав пластовой и подтоварной воды получен по результатам анализов в лаборатории научно-исследовательского производственного института недропользователя, в которых, кроме макрокомпонентного состава, было определено также содержание солеобразующих микроэлементов Ba^{2+} и Sr^{2+} . Интересно отметить пониженное содержание ионов Ba^{2+} и Sr^{2+} по отношению к Ca^{2+} . По данным работы [Киреева, Корзун, 2022] во многих пластовых рассолах нефтегазовых месторождений отношение $\text{Ca}:\text{Sr}:\text{Ba}$ составляет 100:10:0,01, что аналогично соотношению данных ионов в океанической воде. В исследуемых же водах отношение $\text{Ca}:\text{Sr}:\text{Ba}$ составляет приблизительно 100:1:0,001 (табл. 1).

С целью изучения возможности выпадения гипса, целестина и барита на месторождении и расчета максимального количества соли, которая может выпасть в осадок, были использованы пробы воды с некоторых добывающих скважин и с блочной-кустовой насосной станции (БКНС), компонентный состав и показатели которых представлены в табл. 1. Из полученных данных видно, что все пробы пластовой воды (скв. № 1–9) и подтоварная вода имеют только ХК тип по В.А. Сулину, но соотношения ионов различаются. Так, в водах из скв. № 1, 2, 6, 7 и 9 резко преобладает хлорид кальция (до 70 экв.-%). В воде скв. 8 преобладает хлорид магния (42 экв.-%). К подтоварной воде наиболее близки по составу воды из скв. № 3–5, в солевом составе которых преобладает хлорид натрия (до 79 экв.-%).

Для прогноза отложения сульфатных солей на данном месторождении использован аналитический метод Оддо и Томсона, позволяющий рассчитать стабильность растворов при различных термобарических условиях, ионной силы раствора и содержания солеобразующих ионов. Прогноз солеотложения по данному методу осуществляется при помощи индекса насыщения, вычисляемый по следующей формуле:

$$SI = \lg \frac{[\text{Kt}^{2+}][\text{An}^{2+}]}{K}, \quad (1)$$

Таблица 1

Показатели химического состава добываемых вод на одном из месторождений Непско-Ботуобинской антиклизы, ХК тип по В.А Сулину

№	Дата отбора проб	Генезис воды и место отбора проб	рН	Плотность, г/см ³	M, г/л	г/дм ³								Формула Курлова
						HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	Ba ²⁺	Sr ²⁺	
1	31.03.2024	Пластовая вода, скв. №1	4,84	1,26	292,95	0,05	194,97	0,18	74,15	21,89	0,10	0,002	1,61	M _{291,34} Cl 100 / Ca67 Mg33
2	31.03.2024	Пластовая вода, скв. №2	4,73	1,27	263,85	0,06	174,59	0,20	69,14	17,63	0,69	0,002	1,54	M _{262,31} Cl 100 / Ca70 Mg30
3	03.04.2024	Пластовая вода, скв. №3	4,5	1,27	376,00	0,05	233,08	0,10	11,02	9,72	120,25	0,002	1,78	M _{374,23} Cl 100 / Na79 Mg12 Ca9
4	06.04.2024	Пластовая вода, скв. №4	4,99	1,22	254,37	0,14	156,87	0,13	33,07	3,04	58,19	0,002	2,93	M _{251,43} Cl 100 / Na57 Ca37 Mg6
5	06.04.2024	Пластовая вода, скв. №5	5,25	1,14	459,85	0,09	289,90	0,12	30,26	18,29	118,75	0,002	2,44	M _{457,35} Cl 100 / Na63 Mg19 Ca18
6	06.04.2024	Пластовая вода, скв. №6	4,2	1,24	171,14	0,04	7,74	0,01	82,64	0,20	78,71	0,002	1,79	M _{438,38} Cl 100 / Ca55 Na45
7	13.04.2024	Пластовая вода, скв. №7	4,51	1,29	367,07	0,07	238,66	0,14	88,12	17,55	20,61	0,002	1,92	M _{365,15} Cl 100 / Ca65 Mg22 Na13
8	11.04.2024	Пластовая вода, скв. №8	5,59	1,14	213,41	0,09	148,74	0,05	18,25	18,25	26,64	0,002	1,39	M _{219,58} Cl 100 / Mg42 Na32 Ca26
9	13.04.2024	Пластовая вода, скв. №9	5,03	1,22	302,81	0,17	199,11	0,20	74,88	18,67	8,15	0,002	1,63	M _{301,15} Cl 100 / Ca66 Mg28 Na6
10	09.03.2024	Подтоварная вода	5,26	1,15	96,99	0,05	61,15	0,23	13,03	2,61	19,82	0,002	0,28	M _{96,71} Cl 100 / Na50 Ca38 Mg12

где SI — индекс насыщения (выпадение солей предполагается при $SI > 0$), ед.; $[K^{2+}][A^{2+}]$ — произведение молярных концентраций в растворе солеобразующих катиона и аниона соответственно; K — константа произведения растворимости при равновесном состоянии, при вычислении которой учитываются температура, давление, ионная сила раствора и эмпирические коэффициенты, взятые из справочных данных [Кашавцев, 2004].

Расчет индекса насыщения пластовых вод ботуобинского горизонта вендинского возраста гипсом, целестином и баритом проводился для закачки подтоварной воды для пропорций смесей с шагом в 10 %. Исходя из того, что закачиваемая подтоварная и пластовая воды имеют приблизительно одинако-

вую температуру ($\sim 14^{\circ}\text{C}$), в расчете значение температуры принималось равной $T_{\text{пл}}$. В силу того, что принимаемая в расчетах температура ниже $+50^{\circ}\text{C}$, эмпирические коэффициенты брались для гипса. Вид образующихся сульфатов кальция зависит от температуры: при температуре ниже 50°C образуется гипс, а при более высокой температуре — ангидрит [Лурье, 1989]. Величина давления в расчете принималась равной $P_{\text{пл}}$. Несмотря на то, что при разработке давление вблизи нагнетательной скважины больше $P_{\text{пл}}$, а вблизи добывающей — меньше, в прогнозе сульфатного солеотложения данное изменение давления (в пределах десятков МПа) можно не учитывать, так как это практически не отражается на растворимости этих сульфатных солей [Лурье, 1989].

Таблица 2

**Значение величины индекса насыщения (SI)
для различных пропорций смешения растворов
при прогнозе выпадения гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.**

№ сква- жины	Пропорции смешения									
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	
Значение SI для гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при закачке подтоварной воды										
1	0,51	0,18	0,02	-0,13	-0,27	-0,39	-0,51	-0,63	-0,74	
2	0,35	0,04	-0,09	-0,21	-0,33	-0,43	-0,54	-0,64	-0,74	
3	-0,68	-0,90	-0,93	-0,96	-0,98	-0,99	-0,99	-0,96	-0,93	
4	-0,42	-0,63	-0,67	-0,70	-0,74	-0,77	-0,80	-0,82	-0,84	
5	0,31	-0,05	-0,22	-0,39	-0,53	-0,65	-0,75	-0,83	-0,87	
6	-0,61	-0,65	-0,59	-0,58	-0,58	-0,60	-0,63	-0,68	-0,75	
7	0,81	0,43	0,22	0,04	-0,14	-0,30	-0,45	-0,59	-0,72	
8	-1,02	-1,13	-1,09	-1,05	-1,02	-0,99	-0,97	-0,94	-0,90	
9	0,56	0,22	0,05	-0,10	-0,24	-0,37	-0,50	-0,62	-0,73	

Примечание: в пропорциях смешения первое число соответствует содержанию пластовой воды в смеси.

Таблица 3

**Значение величины индекса насыщения (SI)
для различных пропорций смешения растворов
при прогнозе выпадения целестина SrSO_4**

№ сква- жины	Пропорции смешения									
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	
Значение SI для целестина SrSO_4 при закачке подтоварной воды										
1	1,00	0,73	0,58	0,43	0,28	0,12	-0,03	-0,20	-0,37	
2	0,88	0,62	0,48	0,35	0,21	0,07	-0,07	-0,22	-0,37	
3	0,66	0,44	0,35	0,25	0,14	0,03	-0,10	-0,22	-0,37	
4	0,67	0,47	0,40	0,32	0,23	0,14	0,03	-0,10	-0,27	
5	1,28	1,00	0,84	0,67	0,49	0,31	0,13	-0,07	-0,29	
6	-0,10	-0,10	-0,07	-0,07	-0,09	-0,14	-0,20	-0,29	-0,40	
7	1,23	0,94	0,77	0,60	0,42	0,24	0,06	-0,13	-0,33	
8	-0,01	-0,12	-0,12	-0,15	-0,18	-0,22	-0,28	-0,35	-0,43	
9	1,05	0,77	0,62	0,46	0,30	0,14	-0,02	-0,19	-0,36	

Примечание: см. примечание к табл. 2.

В результате анализа данных, полученных для прогноза сульфатного солеотложения (табл. 2), можно заключить, что при закачке подтоварной воды отложению гипса подвержены скважины № 1, 2, 5, 7 и 9 при следующих пропорциях смешения: 90/10, 80/20, 70/30 и 60/40. Следует отметить, что наибольшие значения индекса насыщения (SI) для гипса отмечаются в случае смешения пластовой и нагнетаемой воды в пропорции 90/10 соответственно.

В результате анализа данных, представленных в табл. 3, можно заключить, что при закачке подтоварной воды отложению целестина подвержены скважины № 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 9 при следующих про-

Таблица 4

**Значение величины индекса насыщения (SI)
для различных пропорций смешения растворов
при прогнозе выпадения барита BaSO_4**

№ сква- жины	Пропорции смешения									
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90	
Значение SI для барита BaSO_4 при закачке подтоварной воды										
1	-1,10	-1,00	-0,79	-0,63	-0,53	-0,50	-0,53	-0,65	-0,94	
2	-0,68	-0,67	-0,55	-0,46	-0,42	-0,43	-0,50	-0,64	-0,93	
3	-0,88	-0,85	-0,69	-0,59	-0,52	-0,51	-0,56	-0,68	-0,95	
4	-0,25	-0,37	-0,35	-0,34	-0,37	-0,42	-0,51	-0,67	-0,95	
5	-2,04	-1,73	-1,34	-1,03	-0,80	-0,66	-0,62	-0,69	-0,95	
6	-1,02	-0,91	-0,74	-0,63	-0,57	-0,56	-0,60	-0,72	-0,97	
7	-1,96	-1,67	-1,29	-0,99	-0,77	-0,64	-0,61	-0,69	-0,94	
8	-0,51	-0,57	-0,50	-0,47	-0,47	-0,50	-0,57	-0,70	-0,97	
9	-1,07	-0,97	-0,76	-0,61	-0,51	-0,48	-0,52	-0,65	-0,93	

Примечание: см. примечание к табл. 2.

порциях смешения: 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 и 30/70. Следует отметить, что наибольшие значения индекса насыщения (SI) для целестина отмечаются в случае смешения пластовой и нагнетаемой воды в пропорции 90/10 соответственно, т. е. солеотложение происходит не в непосредственной близости от нагнетательной скважины, а на некотором отдалении.

Анализ данных, представленных в табл. 4, показал, что при закачке подтоварной воды барит не выпадет в осадок, так как индекс насыщения (SI) меньше нуля. Прежде всего это связано с низким содержанием Ba^{2+} в пластовых водах (менее 2 мг/л), вероятно, вследствие низкой пластовой температуры (14 °C) и достаточно высокого содержания сульфат-ионов (более 100 мг/л) в пластовых водах на рассматриваемом месторождении. Известно, что увеличение содержание Ba^{2+} стимулирует увеличение температуры раствора [Киреева, Корзун, 2022], а основным ограничительным условием для содержания Ba^{2+} является концентрация в водах сульфат-иона, который при содержании более 60 мг/л практически полностью выводит Ba^{2+} из раствора [Шварц, 2003].

В результате расчета величины индекса насыщения для гипса, барита и целестина по ряду скважин одного из месторождений Непско-Ботуобинской антеклизы можно заключить, что на данном месторождении существует риск выпадения труднорастворимого целестина и слаборастворимого гипса в поровом пространстве продуктивного пласта. Однако аналитический метод прогноза солеотложения Оддо и Томсона, широко используемый в промысловой практике, не позволяет рассчитать количество соли, выпадающей в осадок. Между тем для решения промысловых задач необходимо определить какое количество соли может образоваться в нефтепромысловом оборудовании, так как именно количество образующихся минеральных отложений

Таблица 5

**Результаты расчета выпадения гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
для различных пропорций смешения растворов**

№ сква- жины	Пропорции смешения								
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90
Количество гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в мг/л, выпадающего в осадок									
1	604	1850	3140	2836	2253	1676	1193	731	382
2	606	1844	3130	2784	2190	1644	1186	724	378
3	607	1629	2672	2518	2018	1524	1127	701	369
4	608	1748	2899	2654	2105	1568	802	708	373
5	612	1656	2702	2539	2045	1530	1132	707	371
6	610	1843	3166	3016	2324	1705	1252	763	405
7	605	1724	2916	2639	2103	1573	1150	702	374
8	541	1555	2580	2362	1874	1396	713	630	332
9	634	1943	3298	2978	2365	1759	1252	767	401

Примечание: см. примечание к табл. 2.

негативно влияет на технологические процессы и работу оборудования — чем больше по массе образуется отложений, тем больше вероятность «засоления» оборудования и сбоев технологических процессов [Бриков, Маркин, 2018].

Дополнить аналитические расчеты по методике Оддо и Томсона позволяют методы термодинамического моделирования геохимических процессов [Борисов, Шваров, 1992], которые позволяют не только определить количество отлагающейся соли, но и учесть в расчете компоненты состава минералов вмещающих пород, которые могут перейти в раствор, а также состав растворенных органических веществ и газов. Расчет процесса образования сульфатных отложений в данной работе выполнен в программном комплексе IPM-PVTр (разработчик PETEX) в модуле Salt Map. Программа IPM-PVTр используется для создания интегрированных моделей термодинамических свойств пластовых флюидов, а также программный комплекс позволяет рассчитать состав смешивающихся вод и количество образовавшихся солеотложений в широком диапазоне термобарических условий.

В качестве исходных данных для моделирования заданы: физико-химические свойства пластовых флюидов (компонентный состав газоконденсата, молярная масса, плотность и газосодержание пластовой нефти, химические составы пластовой и подтоварной вод), термобарические условия ($T_{\text{пл}}$, начальное $P_{\text{пл}}$ и давление насыщения) и обводненность добываемой продукции. Расчеты проводились для пропорций смесей пластовой и подтоварной вод с шагом в 10 %. Давление и температура принимались равными пластовым условиям.

Результаты прогноза отложения солей с применением термодинамического моделирования подтвердили прогноз солеотложения по методу Дж.Е. Оддо и М.Б. Томпсона: возможность выпадения сульфат-

Таблица 6

**Результаты расчета выпадения целестина SrSO_4
для различных пропорций смешения растворов**

№ сква- жины	Пропорции смешения								
	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90
Количество целестина SrSO_4 в мг/л, выпадающего в осадок									
1	98	182	316	267	207	154	102	62	31
2	99	182	314	257	196	145	101	60	26
3	99	221	230	338	270	204	150	94	80
4	100	164	270	234	182	132	95	58	31
5	122	273	326	392	325	218	162	106	81
6	100	182	321	301	220	156	112	67	35
7	53	253	388	231	181	133	95	57	30
8	89	146	241	208	162	118	85	52	27
9	103	191	332	280	218	162	107	65	33

Примечание: см. примечание к табл. 2.

ных солей кальция и стронция и невозможность образования отложений барита. Также были получены данные по количеству отлагающихся гипса и целестина, которые представлены в табл. 5 и 6.

При закачке подтоварной воды отложению гипса подвержены все рассматриваемые скважины месторождения (табл. 5). Наибольшее количество осадка образуется при пропорции смешения 70/30, где первое число соответствует доле пластовой воды в смеси. Анализируя данные по каждой скважине, можно заключить, что наибольшее количество гипса может выпасть в скважине № 9 (3298 мг/л), наименьшее — в скважине № 8 (2580 мг/л).

При закачке подтоварной воды отложению целестина подвержены все рассматриваемые скважины месторождения (табл. 6). Наибольшее количество осадка образуется при пропорции смешения 70/30, т. е. аналогично закономерности выпадения гипса. Анализируя данные по каждой скважине, можно заключить, что наибольшее количество целестина может выпасть в скважине № 7 (388 мг/л), наименьшее — в скважине № 3 (230 мг/л).

Усредненный по всем скважинам месторождения график выпадения гипса и целестина для различных пропорций смешения раствора представлен на рис. 1, где первая точка соответствует 100 %-ному содержанию пластовой воды месторождения НБА. При любых пропорциях смешения барит не выпадает в осадок. При добавлении 10 % подтоварной воды в раствор начинает выпадать в осадок гипс и целестин. Дальнейшее добавление подтоварной воды в раствор также способствует выпадению сульфатных солей кальция и стронция в осадок. При содержании подтоварной воды в смеси в 30 % образуется максимальное количество осадка: в среднем по скважинам гипса — 2945 мг/л, целестина — 304 мг/л. Дальнейшее добавление подтоварной воды в раствор также способствует выпадению сульфатных солей

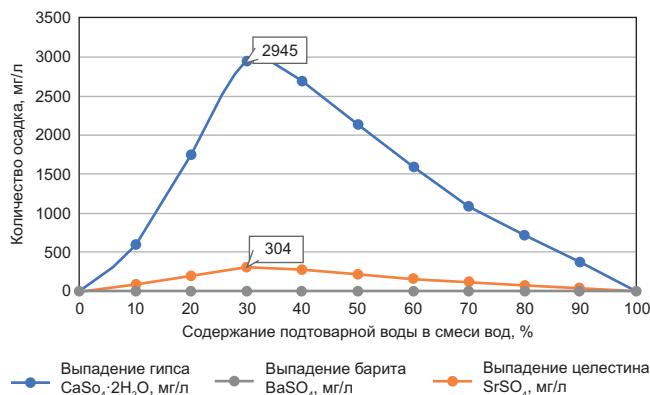


Рис. 1. Зависимость количества образующихся сульфатных солей от содержания подтоварной воды при смешении с пластовой водой (пластовые условиях)

кальция и стронция в осадок, однако количество отложений гипса и целестина постепенно убывает.

Применение термодинамического моделирования позволило определить максимальное количество сульфатных солей кальция и стронция при смешении высокоминерализованных пластовых вод исследуемого месторождения с подтоварной водой. Так, в среднем по рассматриваемым скважинам из 1 л смеси суммарно может выпасть порядка 3,25 г солей. Следует отметить, что средняя проницаемость нагнетательных скважин на месторождении составляет порядка 200 м³/сут, вследствие этого максимальное количество гипса может составить 2,945 г/л · 200000 л/сут = 589000 г/сут, т. е. 589 кг/сут. Максимальное количество целестина может образоваться: 0,3 г/л · 200000 л/сут = 60000 г/сут, т. е. 60 кг/сут. Суммарное количество сульфатных солей при максимальном выпадении составляет 649 кг/сут. Образование такого огромного количества выпадающих солей вполне возможно на нефтепромыслах. В частности, известно, что на Арланском месторождении закачка вод р. Белая в нефтеносные горизонты нижнего карбона приводила к образованию гипсовых пробок, которые полностью останавливают работу добывающих скважин за несколько суток.

Прогноз снижения проницаемости ПЗП в результате сульфатного солеотложения. Одним из наиболее негативных факторов, возникающих при техногенном солеотложении, является ухудшение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов, а именно — проницаемости. Результаты экспериментов по снижению проницаемости образцов керна при прокачке минерализованной воды приведены в работе [Абукова и др., 2012], а в работе [Киреева и др., 2017] была дана оценка снижения проницаемости коллектора в результате сульфатного солеотложения.

Проведем оценку ухудшения коэффициента проницаемости терригенного коллектора при выпадении гипса и целестина для рассматриваемого месторождения.

Максимальное выпадение неорганических солей по результатам термодинамического моделирования

составило до 2,95 г/л гипса и 0,3 г/л целестина, что при плотности гипса 2,3 г/см³ и целестина 4 г/см³ составляет 1,28 см³ сульфата кальция и 0,08 см³ сульфата стронция на 1 дм³ продуктивного пласта (суммарно 1,36 см³ на 1 дм³ породы). Средняя открытая пористость для рассматриваемого месторождения составляет 0,146 доли ед., вследствие чего объем пор на 1 дм³ породы составляет 0,146 дм³. Поэтому при выпадении из раствора 1,33 см³ сульфатных солей объем порового пространства уменьшится на данную величину и составит 0,144 дм³, что на 1 % ниже от первоначального значения.

Исходя из известных значений коэффициента проницаемости (абсолютная проницаемость 0,25 мкм²) и пористости (открытая пористость 0,146 доли ед.) для продуктивного пласта ботубинского горизонта, рассчитаем радиус порового канала до отложения солей по зависимости проницаемости от размера пор, получаемой из соотношения уравнений Пуазейля и Дарси:

$$k_{\text{пп}} = \frac{r^2 m}{8}, \quad (2)$$

где $k_{\text{пп}}$ — коэффициент проницаемости, r — радиус порового канала, m — пористость горной породы; отсюда:

$$r = \sqrt{\frac{8k_{\text{пп}}}{m}}. \quad (3)$$

Радиус порового канала до отложения сульфатов кальция и стронция по данному уравнению составил 3,7 мкм. Если считать, что объем порового канала выражается как объем цилиндра, радиус которого — это радиус порового канала (r), а высота — длина блока породы (h) 1 дм (10^7 мкм), то объем пор до отложения сульфатных солей составит:

$$V = \pi r^2 h = 4,28 \cdot 10^8 \text{ мкм}^3. \quad (4)$$

Допустим, что объем канала фильтрации уменьшится на 1 % аналогично уменьшению порового пространства породы и составит $4,23 \cdot 10^8$, следовательно радиус порового канала после выпадения сульфатных солей составит 3,67 мкм.

Коэффициент проницаемости после выпадения гипса и целестина можно оценить по формуле (2):

$$k_{\text{пп}} = (3,67^2 \cdot 0,144)/8 = 0,24 \text{ мкм}^2. \quad (5)$$

В результате после выпадения сульфатных солей кальция и стронция на месторождении Восточной Сибири коэффициент проницаемости снизится с 0,25 мкм² до 0,24 мкм², что на 4 % ниже первоначальных значений.

Исходя из того, что дебит добывающих скважин прямо пропорционален коэффициенту проницаемости, можно заключить, что вследствие образования малорастворимых отложений гипса и целестина дебит добывающих скважин на рассматриваемом месторождении потенциально может снизиться на

4 %. Следует отметить, что с учетом накопительного эффекта, который заключается в постепенной кольматации призабойной зоны пласта, дебит добывающих скважин может снизиться на величину, превышающую численно установленное значение вплоть до остановки работы скважин.

Выводы. 1. Для ботуобинского горизонта одного из нефтегазоконденсатных месторождений Непско-Ботуобинской антиклизы существует риск выпадения сульфатных солей кальция и стронция вследствие смешения несовместимых вод (подтоварной и пластовой).

2. Прогноз возможного сульфатного солеотложения осуществлялся по аналитической методике Дж.Е. Оддо и М.Б. Томсона и с помощью термодинамического моделирования в программном комплексе IPM-PVTp.

3. Термодинамическое моделирование позволило рассчитать максимальное количество сульфат-

ных солей, которые потенциально могут выпасть в осадок для каждой из рассмотренных эксплуатационных скважин месторождения: наибольшее количество гипса может выпасть в скважине № 9 (3298 мг/л), целестина — в скважине № 7 (388 мг/л). Среднее по скважинам выпадение неорганических солей по результатам моделирования составило до 2,95 г гипса и 0,3 г целестина из каждого литра смешивающихся вод.

4. Максимальное количество образующихся сульфатных солей при учете средней приемистости нагнетательных скважин на месторождении в среднем по каждой скважине составляет 649 кг/сут (589 кг/сут гипса и 60 кг/сут целестина).

5. Проведенные расчеты на основе соотношения уравнений Пуазейля и Дарси показали, что в результате отложения сульфатных солей в призабойной зоне пласта дебит добывающих скважин по нефти может снизиться на 4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абукова Л.В., Абрамова О.П., Попов С.Н., Анисимов Л.А. Прогноз взаимодействия коллекторов, пластовых и технических вод при разработке нефтегазоконденсатного месторождения им. Ю. Корчагина // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2012. № 2(6). С. 12.
- Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 256 с.
- Бриков А.В., Маркин А.Н. Нефтепромысловая химия. М.: Де Либри, 2018. 355 с.
- Зимин С.В., Порошин В.Д., Гримус С.И. Освоение ресурсов углеводородов в засолоненных коллекторах Припятского прогиба и юга Сибирской Платформы // Нефтяное хозяйство. 2020. № 2. С. 22–27.
- Калинкина Н.В., Чертовских Е.О., Кунаев Р.У. и др. Организация эффективной защиты скважин от солеотложений химическими методами на примере Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2016. № 1. С. 52–57.
- Кашавцев В.Е., Мищенко И.Т. Солеобразование при добыче нефти. М.: Орбита-М, 2004. 432 с.
- Киреева Т.А. Гидрохимические особенности бария, в связи с техногенными процессами, осложняющими разработку нефтяных месторождений // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования». М.: Изд-во Моск. ун-та, 2023. С. 317–321.
- Киреева Т.А. Нефтегазопромысловая гидрогеохимия. М.: МАКС Пресс, 2017. 224 с.
- Киреева Т.А., Корзун А.В. Новые данные о повышенном содержании бария в пластовых водах нижнемеловых и юрских отложений Красноленинского свода (Западная Сибирь) // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 124–128.
- Киреева Т.А., Миникаева Р.И., Анисимов Л.А. Прогноз отложения сульфатных солей (с учетом содержания стронция) при эксплуатации нефтяных месторождений // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2017. № 6. С. 55–63.
- Кусов Б.Р. Причины аномально низких термобарических параметров некоторых залежей УВ В Восточной Сибири // Недропользование XXI. 2014. № 4 (48). С. 78–80.
- Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1989. 448 с.
- Салихов Р.М., Костюк И.И. Разработка и реализация мероприятий, направленных на увеличение межремонтного периода механизированного фонда скважин ООО «ИНК» // Нефтяное хозяйство. 2020. № 9. С. 55–58.
- Салихов Р.М., Чертовских Е.О., Гильмутдинов Б.Р. и др. Опыт борьбы с гипсообразованием в условиях аномально высокой концентрации солеобразующих ионов на Ярактинском месторождении // Нефтяное хозяйство. 2023. № 9. С. 129–132.
- Чистякова Н.Ф., Драванте В.В., Сивцов А.И. Особенности ионно-солевого состава подземных вод вендинижнекембрийских отложений Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения на стадии катагенеза // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15, № 3. С. 1–20.
- Шварц А.А. Эколого-гидрогеологический анализ состояния подземных вод при региональных исследованиях: Дисс. ... докт. геол.-мин. н. СПб., 2003.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК ?

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-78-87

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФТОРСОДЕРЖАЩЕГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА И КАЛЬЦИТА ПРИ 750 °С, 1 кбар И РАЗНОМ РЕЖИМЕ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ

**Яна Олеговна Алферьева¹✉, Артем Владиславович Микшин²,
Татьяна Игоревна Щекина³, Елизавета Ильинична Григорьева⁴**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yanaalf@bk.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; artemmikshin@inbox.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; t-shchekina@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; grigliza@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты двух экспериментов по взаимодействию фторсодержащего гранитного расплава и кальцита с одинаковым исходным составом сухой шихты и разным режимом летучих компонентов. Установлено, что в обоих случаях на границе кальцита и фторсодержащего гранитного расплава при заданных P - T параметрах происходит интенсивный перенос вещества. Помимо прочих компонентов из силикатного расплава в карбонатную часть переносятся W и Mo, которые там отлагаются в виде молибденсодержащего шеелита.

Сопоставление полученных образцов позволяет качественно оценить влияние состава флюида в изучаемой системе на стабильность образующихся фаз и возможность транспорта рудных компонентов.

Ключевые слова: редкometальные скарны, перенос вольфрама и молибдена, взаимодействие фторсодержащего расплава и кальцита

Для цитирования: Алферьева Я.О., Микшин А.В., Щекина Т.И., Григорьева Е.И. Взаимодействие фторсодержащего алюмосиликатного расплава и кальцита при 750 °С, 1 кбар и разном режиме летучих компонентов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 78–87.

INTERACTION OF FLUORINE-CONTAINING ALUMINOSILICATE MELT AND CALCITE AT 750°C, 1 KBAR AND DIFFERENT VOLATILE COMPONENT REGIMES

Yana O. Alferyeva¹✉, Artem V. Mikshin², Tatyana I. Shchekina³, Elizaveta I. Grigorieva⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yanaalf@bk.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; artemmikshin@inbox.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; t-shchekina@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; grigliza@mail.ru

Abstract. The results of two experiments on the interaction of fluorine-containing granite melt and calcite with the same initial composition of the dry batch and different regimes of volatile components are presented. It is established that in both cases, at the boundary of calcite and fluorine-containing granite melt at given p - T parameters, an intensive transfer of matter occurs. In addition to other components, W and Mo are transferred from the silicate melt to the carbonate part, where they are deposited as molybdenum-containing scheelite.

Comparison of the obtained samples allows us to qualitatively assess the effect of the fluid composition in the studied system on the stability of the resulting phases and the possibility of transporting ore components.

Keywords: rare metal skarns, transfer of tungsten and molybdenum, interaction of fluorine-containing melt and calcite

For citation: Alferyeva Ya.O., Mikshin A.V., Shchekina T.I., Grigorieva E.I. Interaction of fluorine-containing aluminosilicate melt and calcite at 750 °C, 1 kbar and different volatile component regimes. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 78–87. (In Russ.).

Введение. Продукты контактово-реакционного взаимодействия карбонатов с алюмосиликатным расплавом широко распространены в природе. Например, в магматическую стадию становления интрузий вдоль ее контакта с доломитами могут развиваться магнезиальные скарны. Они имеют ряд особенностей, отличающих их от постмагматических контактово-реакционных образований. Для магнезиальных скарнов магматической стадии характерно развитие только в экзоконтакте интру-

зива. В эндоконтактовой же зоне магматического тела эти метасоматиты часто присутствуют в виде ксенолитов [Граменицкий, 2012]. Характерными минералами магнезиальных скарнов магматической стадии являются шпинель, клинопироксен, близкий по составу к фассаиту, оливин форстеритового состава, в абиссальных фациях появляется ортопироксен. В околоскарновых породах развит плагиоклаз основного состава An-Bit. Реакционные известковые скарны магматической стадии достаточно редки

и могут формироваться только в экзотических высокотемпературных приповерхностных условиях [Богомолов, 1970, Шабынин, 1974, Перцев, 1998, Летников и др., 1978]. Характерными минералами таких известковых скарнов являются волластонит, спуррит, тиллелит, ларнит, мервинит и др.

В известковых скарнах постмагматической стадии типичными минералами являются кальциевые пироксены ряда диопсид-геденбергит, кальциевые гранаты гроссуляр-андрадитового ряда. Кроме них к скарновым минералам относят волластонит, эпидоты, везувиан, родонит, бустамит и др. По появлению того или иного минерала выделяются температурные фации известковых скарнов [Жариков и др., 1998, Граменицкий, 2012]. Волластонит-плагиоклазовая фация образуется при температуре 700–800 °С. В интервале 600–700 °С формируется гранат-пироксен-волластонитовая фация. При дальнейшем понижении температуры образуются безволластонитовые фации: гранат-пироксен-плагиоклазовая (530–650 °С), гранат-эпидотовая (500–530 °С), пироксен-эпидотовая (450–500 °С).

В условиях эксперимента контактово-реакционную зональность, близкую к типичной известково-скарновой, удалось получить при температурах субсолидуса гранитного расплава $T \leq 700$ °С, давлении 1 кбар в присутствии близнейтральных хлоридных растворов [Зарайский и др., 1986, Зарайский, 2007]. Повышение кислотности растворов приводит к росту растворимости кальцита. Это препятствует образованию скарновых парагенезисов. При воздействии щелочных растворов и чистой воды скарновой зональности также не образуется. Повышение температуры до субликивидуса гранитного расплава и выше при давлении $P \geq 1$ кбар приводит к росту устойчивости кальцита и также препятствует формированию скарновой зональности [Летников и др., 1978, Перцев, 1977].

Присутствие фтора в магматической системе существенным образом влияет на параметры устойчивости фаз. 4 мас. % фтора понижают температуру солидуса гранитного расплава до 600–650 °С [Manning, 1981]. В результате этого образуется широкий температурный диапазон, в котором глубокодифференцированный алюмосиликатный расплав может сосуществовать со скарновыми минералами. Таким образом, с термодинамической точки зрения образование известковых скарнов в зоне контактово-реакционного взаимодействия становится возможным уже на магматической стадии становления интрузий ($800 \geq T \geq 600$ °С, $P=1$ кбар). В этом случае реакционная колонка отличается от привычных известково-скарновых минеральных ассоциаций [Alferyeva, et al., 2024]. Помимо гроссуляра и волластонита в ней всегда присутствует куспидин и иногда кварц. Вдоль контакта силикатного расплава и апокарбонатной части развивается плагиоклаз переменного состава. При исходном содержании фтора в алюмосиликатном расплаве выше 4 мас. % в апокарбонатной части

формируется флюорит, который замещает кальцит на фронте взаимодействия.

Согласно современным представлениям [Zaraisky, et al., 2008] гранитные расплавы, имеющие повышенные содержания фтора (до 4 мас. %), в природных условиях образуются как остаточные в ходе кристаллизационной дифференциации исходных расплавов среднего или кислого состава. Помимо фтора они характеризуются повышенными содержаниями многих редких и некоторых цветных металлов а также воды и других компонентов, которые не входят в структуры породообразующих минералов. К массивам таких гранитов часто приурочены месторождения Ta, Nb, Sn, W, Mo и пр. Источником рудного вещества для скарновых молибден-вольфрамовых и других скарново-редкометальных месторождений тоже могут быть массивы глубоко дифференцированных гранитоидов.

Отложение редкометальных минералов непосредственно в процессе скарнообразования имеет очень ограниченное распространение. Стадии рудообразования наступают после скарнового процесса и сопровождаются привносом кремнезема и рудных металлов гидротермальным флюидом, состав которого изменяется в сторону повышения кислотности [Жариков, 1968; Жариков и др., 1998; Зарайский, 2007; Граменицкий, Кононов, 2022]. Послескарновые метасоматиты относятся к семейству кварц-полевошпатовых. В тыловой зоне имеют кварцевый или кварц-плагиоклазовый состав. Характерными минералами являются новообразованные гранат и клинопироксен. Встречаются везувиан, куспидин, флюорит.

Присутствие куспидина и флюорита в окорудных метасоматитах свидетельствует о фтористой специфике их минералообразующей среды. В связи с этим в данной работе предпринята попытка экспериментального моделирования контактово-реакционного взаимодействия модельного глубокодифференцированного фторсодержащего алюмосиликатного расплава и кальцита, а также переноса рудных компонентов WO_3 и MoO_3 на контакте этих сред.

Методика экспериментов. Проведено два эксперимента по взаимодействию кальцита и фторсодержащего гранитного расплава. Оба опыта имели одинаковый исходный состав. На дно платиновой ампулы загружалась смесь химических реагентов, по соотношению главных компонентов близкая к эвтектическому составу гранитной фторсодержащей системы [Manning, 1981] с добавлением рудных компонентов WO_3 и MoO_3 (см. таблицу). Поверх нее загружался химический реактив карбоната кальция. Соотношение масс силикатной и карбонатной частей примерно выдерживалось равным 1. В ампулы добавлялась чистая дистиллированная вода в количестве 10 % от массы сухой навески. Ампулы герметично заваривались. В ходе эксперимента контролировалась ориентировка ампул: карбонатная

часть навески находилась вверху ампулы, а силикатная внизу.

Опыты проводились в ИЭМ РАН г. Черноголовки Московской обл. на установке высокого газового давления УВГД10000 при $T = 750^{\circ}\text{C}$ и давлении 1 кбар в течение 7 дней. После закалки проводилось контрольное взвешивание ампул. По результатам взвешивания установлено, что в ходе проведения эксперимента ампула опыта 952 потеряла 0,05 г, что на 0,01 г больше исходного содержания в ней воды. Ампула опыта 968 вес не изменила.

В процессе вскрытия для сохранения целостности продуктов опытов в ампулы заливался циакриновый клей. Полученные образцы имеют примерный размер 4×30 мм. Они были исследованы на кафедре петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ с помощью энергодисперсионного микроанализатора (спектрометр INCA-Energy 350) на базе растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV». Дисперсия для Na, K, Ca, Al, Si составила 0,02 мас. %, для F — 0,05 мас. %.

Продукты экспериментов. В *опыте 952* присутствуют признаки интенсивного взаимодействия кальцита и алюмосиликатного материала. Полученный образец содержит неизмененную кальцитовую зону, участок контактово-реакционного взаимодействия и слабо измененную силикатную часть. Протяженность участка контактово-реакционного взаимодействия составляет около 700 мкм в апокарбонатной части образца и более 250 мкм в силикатной части. Образец имеет хорошо выраженную зональность, которая проявлена в смене минеральных ассоциаций. Нами выделено 5 зон, которые сменяют друг друга на разном расстоянии от контакта. Переходы между зонами резкие, обусловлены появлением или исчезновением одной или нескольких фаз. В исходном кальците и во всех выделенных зонах апокарбонатной части в небольшом количестве (до 3 %) присутствуют мелкие (≤ 1 мкм) изометричные зерна цельзиана. Барий нами не вводился в состав исходной навески. Появление этой фазы, скорее всего, связано с недостаточной чистотой реагента карбоната кальция.

Зона 1 сложена неизмененным кальцитом. Зерна кальцита округлые слабо сцементированные. Пористость зоны составляет около 40 %. В зоне присутствуют единичные кристаллы субмикронного размера рудной Mo-W фазы. По результатам качественного анализа ее состав наиболее близок к молибдошебелиту. В валовом составе зоны эти металлы не диагностируются.

На границе зон 1 и 2, исходный кальцит замещается кусpidин-флюоритовой ассоциацией (рис. 1, а). Количество флюорита в зоне 2 примерно в полтора-два раза больше, чем кусpidина. Оба минерала имеют небольшой размер (≤ 2 –3 мкм), неправильную червеобразную форму. Образуют сложные сростки, форма которых напоминает очертания исходных зерен кальцита. В этой зоне 2 в небольшом количестве

(до 5 %) встречаются мелкие кристаллы рудного минерала, содержащего вольфрам и молибден. Точно определить его состав невозможно из-за небольших размеров зерен. Вероятно, он близок к молибдошебелиту. Для зоны 2 тоже характерна высокая пористость, примерно 40–45 %. Протяженность зоны составляет 550–600 мкм.

При дальнейшем приближении к контакту в зоне 3 исчезает кусpidин, количество флюорита составляет в среднем ≈ 80 %, появляется богатая фтором алюмо-силикатная фаза $L_{(3)}$. Алюмосиликатная фаза $L_{(3)}$ по зоне распределена неравномерно. У границы с зоной 2 ее содержание составляет около 5–7 %, она занимает интерстиции между кристаллами флюорита. У границы с зоной 4 ее количество достигает 30–40 %, она слагает основную массу образца (рис. 1, б, в). Химический состав $L_{(3)}$ приведен в табл. 1. Он изменяется в широких пределах. У границы с зоной 2 в пересчете на 100 ат. % ее состав выглядит следующим образом: Ca — 15,36, Al — 15,07, Si — 7,39, O — 52,74, F — 9,40. При приближении к границе с зоной 4 в фазе стремительно падает содержание F и Ca, растет количество Si. У контакта с зоной 4 состав этой фазы становится близок к составу анортита (ат. %): Ca — 7,72, Al — 15,71, Si — 14,88, O — 61,69. По морфологическим признакам и с учетом большого диапазона химического состава эта фаза отнесена нами к продуктам закалки фторсодержащего алюмосиликатного расплава с экстремально низким содержанием щелочей.

В зоне 3 содержатся мелкие зерна Mo-W рудного минерала. По данным качественного анализа он близок к молибдошебелиту. По объему зоны он распределен неравномерно. У границы с зоной 2 содержание этого минерала в среднем составляет 3–5 %. У границы с четвертой зоной количество его кристаллов увеличивается до 7–10 %. Зона 3 имеет мощность около 100–150 мкм. Для нее также характерна высокая пористость (40–45 %), которая заметно уменьшается (до 15–20 %) непосредственно у первичного контакта с силикатной частью (зоной 4).

Исходный контакт с силикатной частью (граница зон 3 и 4) ярко выражен (рис. 1, в). На нем происходит резкая смена структуры и минерального и химического состава образца. По контакту образец распался на две части. Зона 4 имеет небольшую мощность, до 50 мкм. Сложена игольчатыми кристаллами микронного размера. При анализе по площади зоны диагностируется только алюминий и кислород. Качественное соотношение которых хорошо пересчитывается на формулу корунда.

Мощность следующей зоны 5 больше 200 мкм. Ее структура неполнокристаллическая, гиалопилитовая. Количество стекла составляет примерно 50 %. Кристаллические фазы представлены щелочным полевым шпатом, плагиоклазом, флюоритом и топазом. Распределение этих фаз очень неравномерное.

Силикатное стекло из пятой зоны существенно отличается по составу (таблица) от стекла зоны 3.

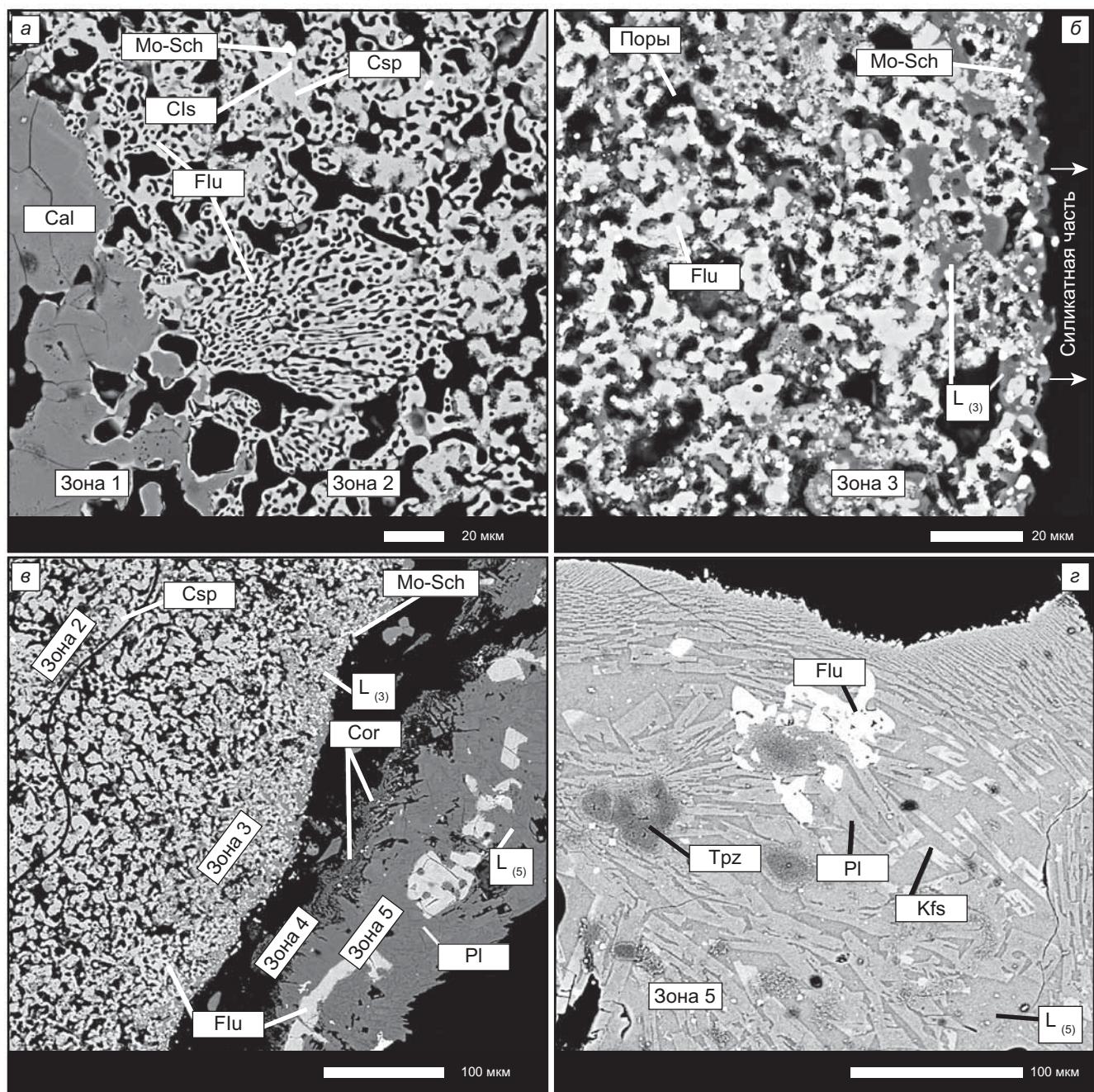


Рис. 1. Минеральный состав зон контактово-реакционного взаимодействия в образце 952: фронт замещения карбонатной части, граница зон 1 и 2 (а), приконтактовая область апокарбонатной части, зона 3 (б), область контакта (в), силикатная часть (г). Условные обозначения: Cal — кальцит, Cls — цельзиан, Cor — корунд, Csp — кусpidин, Flu — флюорит, Kfs — щелочной полевой шпат, L_(3,5) — алюмосиликатное стекло из зон 3 и 5 соответственно, Mo-Sch — молибдо-шеелит, Pl — плагиоклаз олигоклаз-андезинового состава. Черной линией там, где это необходимо, проведена граница между зонами

В нем содержится в 1,5–3 раза больше кремнезема, повышено содержание щелочей, железа и магния. Концентрация глинозема в 2–3 раза меньше, чем в стекле зоны 3. Количество CaO не превышает 1 масс. %. Содержание фтора в стекле приконтактовой области ниже порога обнаружения. По мере удаления от контакта количество фтора увеличивается до 2,5 масс. %.

Плагиоклаз представлен длиннопризматическими скелетными кристаллами реберного типа. Их размер варьирует от первых микрон до 100 мкм в длину.

Мелкие кристаллы тяготеют к краям образца, более крупные — к центру. Кристаллы часто зональны. Зерна олигоклаз-андезинового состава могут быть частично или полностью окаймлены щелочным полевым шпатом. Щелочной полевой шпат также встречается и в виде отдельных кристаллов.

Зерна флюорита образуют скопления неправильной формы размером до 100 мкм. Они часто в виде включений содержат алюмосиликатное стекло и полевые шпаты. По образцу распределены неравномерно. Топаз встречается в виде изометрических

Таблица

Средние составы стекол в разных зонах колонки взаимодействия в полученных образцах и исходный состав силикатной части системы (масс. %)

Образец	952			968			Исходный состав	
	Фаза	$L_{(3)}$	$L_{(5)}$	$L_{(6)}$	$LCF_{(2)}$	$LCF_{(3)}$	$L_{(6)}$	
Si (SiO_2)		14 ± 5 (30)	$33,6 \pm 1,8$ (72,0)	$29,9 \pm 1,7$ (64,0)	$13,4 \pm 0,4$ (28,7)	$17,7 \pm 0,8$ (37,9)	$30,3 \pm 1,8$ (64,9)	33,74 (72,16)
Al (Al_2O_3)		$18,4 \pm 1,4$ (34,8)	$7,2 \pm 1,7$ (13,6)	$10,3 \pm 1,5$ (19,4)	< п.о.	< п.о.	$9,5 \pm 1,6$ (17,9)	8,24 (15,56)
Fe (Fe_2O_3)		$0,02 \pm 0,03$ (0,03)	$0,19 \pm 0,04$ (0,27)	$0,03 \pm 0,03$ (0,04)	< п.о.	< п.о.	$0,17 \pm 0,07$ (0,24)	0,49 (0,69)
Mg (MgO)		< п.о.	$0,07 \pm 0,02$ (0,11)	$0,04 \pm 0,01$ (0,06)	< п.о.	< п.о.	< п.о.	—
Ca (CaO)		21 ± 6 (30)	$0,70 \pm 0,07$ (0,98)	$0,16 \pm 0,01$ (0,22)	$30,2 \pm 1,9$ (42,2)	$26,5 \pm 1,7$ (37,0)	$0,07 \pm 0,05$ (0,10)	—
Ba (BaO)		$0,03 \pm 0,03$ (0,04)	< п.о.	< п.о.	$0,32 \pm 0,11$ (0,36)	< п.о.	< п.о.	—
Na (Na_2O)		< п.о.	$1,4 \pm 0,4$ (1,9)	$2,66 \pm 0,25$ (3,59)	< п.о.	< п.о.	$2,0 \pm 0,2$ (2,7)	2,79 (3,77)
K (K_2O)		< п.о.	$4,6 \pm 0,4$ (5,6)	$4,5 \pm 0,5$ (5,4)	< п.о.	< п.о.	$4,8 \pm 0,5$ (5,8)	3,80 (4,58)
Li (Li_2O)		н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	0,15 (0,33)
W (WO_3)		< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	0,30 (0,30)
Mo (MoO_3)		< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	< п.о.	0,30 (0,30)
F		$4,0 \pm 3,4$	$1,1 \pm 1,1$	$3,0 \pm 1,4$	$16,0 \pm 1,7$	$17,3 \pm 1,4$	$3,4 \pm 1,5$	3,97
O		42 ± 5	$47,0 \pm 1,0$	$45,8 \pm 1,4$	37 ± 3	33 ± 4	$49 \pm 1,4$	46,23
Сумма		$99,7 \pm 2,1$ (96,7)	$96,0 \pm 1,1$ (95,1)	$96,4 \pm 0,9$ (94,5)	97 ± 2 (81)	95 ± 5 (85)	$99,6 \pm 1,4$ (93,6)	100,0 (100,0)

Примечания. $L_{(3, 5, 6)}$ — алюмосиликатное стекло из зон 3, 5 или 6, $LCF_{(2, 3)}$ — продукт закалки карбонатно-фторидной фазы из зоны 2 или 3. Прочерк — компонент не вводился в силикатную часть системы, < п.о. — содержание ниже порога обнаружения, н.а. — элемент не анализировался. В скобках приведены массовые содержания соответствующих окислов и их сумма с учетом содержания фтора ($O = 2F$). Состав каждой фазы измерялся не менее пяти раз.

образований неправильной формы, размер которых достигает 60 мкм.

По всей зоне равномерно распределены мелкие зерна рудной W-Mo фазы. В большинстве случаев из-за небольших размеров ее точный состав определить невозможно. Состав единичных крупных кристаллов, расположенных около контакта с карбонатной частью, пересчитывается на формулу молибдошелита. По результатам качественных анализов в составе некоторых мелких кристаллов рудного минерала фиксируется преобладание молибдена над вольфрамом. Общее содержание рудных минералов в зоне 5 не превышает 3 %.

Граница между зонами 5 и 6 в образце не сохранилась. От контакта она отнесена более, чем на 200 мкм. Шестая зона имеет неполнокристаллическую структуру. Содержание кристаллической фазы не превышает 15–20 %. Состоит из алюмосиликатного стекла, в котором равномерно распределены мелкие иголки закалочных фаз, и крупных (до 50 мкм) кристаллов топаза. Состав стекла в зоне 6 близок к исходному составу силикатной части образца. При этом, содержание кремнезема и фтора в нем существенно меньше относительно исходного (см. таблицу).

В **опыте 968** также произошло интенсивное перераспределение вещества между карбонатной и силикатной частью с образованием новых мине-

ральных фаз. Полученный образец состоит из зоны неизмененного кальцита, области контактово-реакционного взаимодействия и алюмосиликатного стекла.

Зона 1 (рис. 2, *a*), как и в предыдущем случае, сильно пористая (до 40 %), сложена неизмененным округлым слабо сцементированным кальцитом. На фронте замещения (граница зон 1 и 2) кальцит частично замещается флюоритом (30 %), куспидином (30 %) и карбонатно-фторидной фазой LCF (около 10 %).

Все кристаллические фазы в зоне 2 ксеноморфны, не имеют характерных кристаллографических очертаний. Флюорит образует скрытокристаллические анхимономинеральные пористые участки. Их размер может достигать 50×100 мкм. В то время как куспидин, кальцит и фаза LCF образуют сложные сростки, в которых фаза LCF заполняет интерстиции между кальцитом и куспидином. Как в флюоритовых, так и в LCF -кальцит-куспидиновых участках прослеживаются следы структуры первичного кальцита: форма и размер межзерновых пор. Мощность зоны 2 составляет примерно 200 мкм.

Фаза LCF состоит преимущественно из Ca , Si , O и F (таблица). В составе отмечается существенный избыток анионов и низкая сумма анализа. Если недостаток катионов компенсировать углеродом, то в пересчете на 100 ат. % состав LCF следующий: Ca —

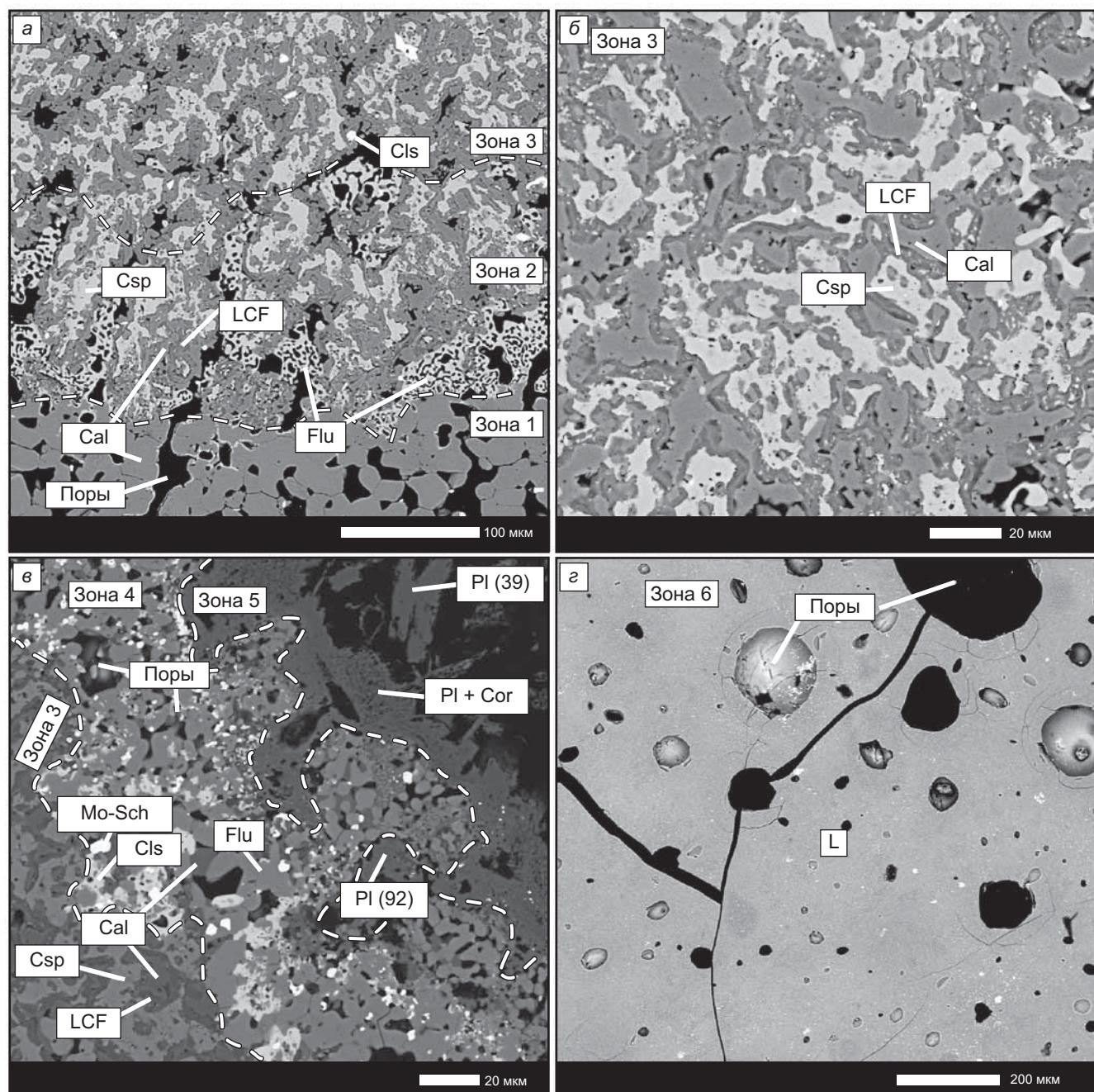


Рис. 2. Минеральный состав зон в образце 968: *а* — фронт замещения карбонатной части (граница зон 1 и 2), *б* — зона 3, *в* — приконтактовая область, *г* — силикатная часть. Условные обозначения см. рис. 1, LCF — продукты закалки кальций-кремний-карбонатно-фторидной фазы, PI — плагиоклаз (в скобках содержание аортитового компонента в мол. %)

15,5, Si — 9,8, C — 10,3, O — 47,1, F — 17,2. В составе LCF также возможно небольшое присутствие воды.

На границе зон 2 и 3 исчезает флюорит (рис. 2, *б*). Пористость третьей зоны составляет около 10–15 %. Зона преимущественно сложена кальцитом (40 %) и кусpidином (40 %), которые имеют неправильную форму. Межзерновое пространство заполнено кальций-кремне-карбонатно-фторидной фазой LCF (15–20 %), состав которой приведен в таблице (в пересчете на 100 ат. % Ca — 14,5, Si — 13,8, C — 6,5, O — 45,2, F — 19,9). В зоне в небольшом количестве (первые проценты) присутствуют рудные минералы, представленные цельзианом и молибдошелеелитом.

Их точный состав определить невозможно из-за маленького размера кристаллов. Мощность зоны составляет около 200 мкм.

При дальнейшем приближении к контакту (рис. 2, *в*), на границе зон 3 и 4 происходит существенный рост содержания рудных минералов. Количество молибдошелеелита в 4 зоне составляет примерно 15–20 %. Количество цельзиана тоже увеличивается до 10–15 %. Вновь появляется флюорит, содержание которого составляет примерно 60 %. В отличие от флюорита из зоны 2 в четвертой зоне флюорит представлен изометричными субдиоморфными иногда округлыми кристаллами размером 3–5 мкм. Кальцит

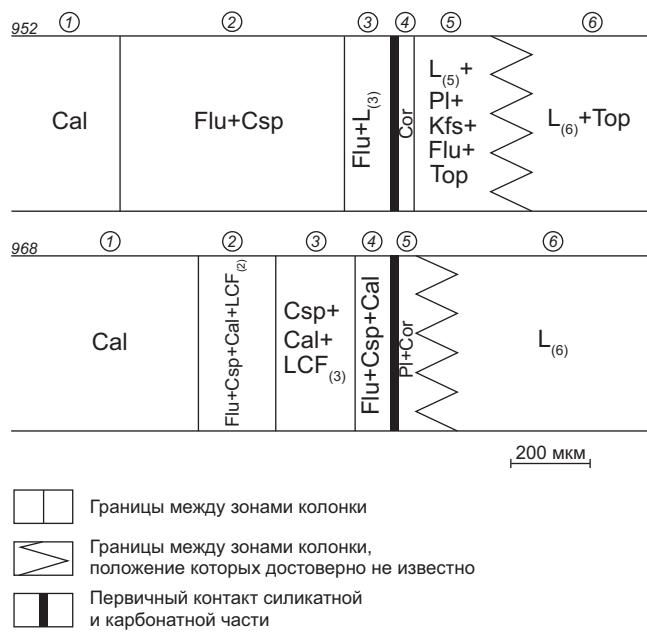


Рис. 3. Сопоставление зональности образцов 952 и 968

и куспидин в этой зоне присутствуют в небольшом количестве (примерно по 5 % каждого). Кальцит формирует субдиоморфные зерна с хорошо выраженным гранями. Пористость зоны составляет 25–30 %. Мощность 50–100 мкм.

Зона 5 имеет высокую пористость (около 30–40 %), сложена мелкими (7–10 мкм) удлиненными кристаллами плагиоклаза. Их состав изменяется от почти чистого аортита до андезина ($\text{Na}_{0,04}\text{Ca}_{1,03}\text{Al}_{1,99}\text{Si}_{2,00}\text{O}_8$ – $\text{Na}_{0,52}\text{K}_{0,06}\text{Ca}_{0,37}\text{Al}_{1,42}\text{Si}_{2,60}\text{O}_8$ в пересчете на 8 атомов кислорода). Присутствуют единичные зерна небольшого размера (до 5 мкм), состав которых удовлетворительно пересчитывается на корунд. В минеральном составе зоны не обнаружено фторсодержащих фаз. Мощность не превышает 50 мкм.

В образце 968 не удается точно установить положение первичного контакта карбонатного и силикатного материала. По аналогии с образцом 952 появление корунда и плагиоклаза может быть признаком перехода из апокарбонатной области экзоконтакта в силикатную эндоконтактовую часть.

Участок образца, непосредственно контактирующий с зоной 5 со стороны силикатной части, не сохранился. Расстояние от первичного контакта до начала шестой зоны не известно. Зона 6 состоит из алюмосиликатного стекла с небольшим количеством (2–3 %) закалочных фаз. В стекле присутствуют поры, размер которых может достигать 200 мкм. Также есть мелкие кристаллы рудной фазы Mo-W состава. Их количество не превышает 3 %. Состав стекла из зоны 6 близок к исходному составу силикатной части образца.

Обсуждение результатов. В представленных экспериментах во взаимодействие приводились две контрастных по химическому составу среды: фторсодержащий алюмосиликатный расплав и кальцит.

На границе этих сред происходило интенсивное перераспределение компонентов с образованием новых фаз. Согласно современным представлениям транспорт вещества в таких условиях осуществляется посредством некристаллических фаз: расплава и водного флюида.

Масса ампулы 952 в ходе опыта существенно уменьшилась. Это произошло в результате ее разгерметизации и потери системой части вещества. С учетом полученной зональности и мощности области взаимодействия можно утверждать, что вскрытие ампулы 952 произошло до начала закалки эксперимента на стадии нагрева или в процессе выдерживания ампул при необходимых P - T параметрах. В зависимости от этого полученная в 952 зональность может быть первичной, образованной по исходным веществам, или вторичной. Во втором случае сначала в ампуле формировалась зональность, схожая с опытом 968. После вскрытия, в результате смены флюидного режима она была полностью замещена с формированием зональности 952.

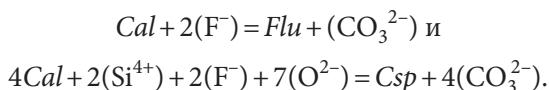
В соответствии с принятой в термодинамике терминологией система, которая обменивается с окружающей средой веществом и энергией, называется «открытой». В таком опыте взаимодействие возможно не только между кальцитом и силикатным расплавом, но и между этими фазами и внешней средой, с помощью которой создается давление. Поэтому по формальным признакам такой опыт следует признать неудачным.

В проведенных опытах средой, передающей давление, был инертный газ аргон. В следствие разгерметизации в ампуле уменьшилось содержание исходных летучих компонентов и выросло содержание аргона. Он обладает малой химической активностью. В литературе описаны клатратные газогидраты с аргоном и короткоживущие эксимерные молекулы, состоящие из двух атомов аргона или аргона и галогена [Бык, Фомина, 1968; Фролов, 1979; Смирнов, 1983]. В нашем случае вероятность их образования пренебрежимо мала. Поэтому химическое взаимодействие исходных компонентов системы и аргона практически отсутствует и его распределение в ампуле определяется только физической диффузией.

Потеря исходных летучих в опыте 952 привела к смене флюидного режима на контакте кальцита и алюмосиликатного расплава. Сопоставление зональности образцов 952 и 968 (рис. 3) позволяет качественно охарактеризовать влияние режима летучих компонентов на состав фаз в изучаемой системе.

В отличие от опубликованных ранее результатов [Alferueva, et al., 2024] колонка в образцах 952 и 968 содержит зону неизмененного кальцита, что позволяет получить полное представление о последовательности минеральных ассоциаций в области контактово-реакционного взаимодействия. Общая мощность колонки взаимодействия в опыте 952 примерно в полтора раза больше, чем в 968.

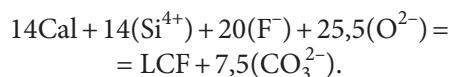
В «закрытых» условиях опыта 968 кальцит как одна из стабильных фаз сохраняется во всех апокарбонатных зонах (2, 3, 4) колонки взаимодействия вплоть до непосредственного контакта с силикатной частью. В «открытых» условиях кальцит весь распадается уже на фронте замещения, что свидетельствует о существенном сокращении его поля стабильности. Замещение кальцита флюоритом и куспидином проходит по реакциям (в скобках приведены компоненты, которые переносятся флюидом или одним из расплавов):



Вода и выделяющийся в этих реакциях углерод в виде CO_2 в открытой ампуле свободно покидают систему, способствуя смешению реакций вправо. Обобщенная запись реакций в ионном виде позволяет не уточнять, в какой именно фазе растворены переносимые компоненты: в водном флюиде, силикатном или карбонатно-фторидном расплаве. В зависимости от конкретных условий в этих реакциях могут участвовать также ионы водорода или различных металлов.

Фтор в соответствии с этими реакциями частично или полностью связывается в кристаллические фазы и не покидает систему, как остальные летучие компоненты. В результате на границе с кальцитом даже в открытых условиях формируется куспидин-флюоритовая ассоциация. Открытая система не потеряла весь фтор. Как и в случае с закрытой системой произошло его частичное перераспределение из силикатной в апокарбонатную часть с образованием фторсодержащих минералов.

Карбонатно-фторидная фаза LCF обнаружена только в продуктах опыта 968. Ее состав (см. таблицу) не пересчитывается на известные минералы. Эта фаза не имеет определенных кристаллографических очертаний и заполняет интерстиции между другими минералами (рис. 2, б). Нами было выдвинуто предположение [Alferyeva, et al., 2024], что она является продуктом закалки расплава. Вдоль колонки взаимодействия состав LCF существенно изменяется. Наиболее значительные вариации отмечаются в содержании Si и расчетном количестве углерода. Состав LCF в зоне 3 близок к полученному ранее. Для усредненного состава LCF (Ca — 14, Si — 14, C — 6,5, O — 45, F — 20 ат. %) можно записать следующую реакцию образования:



Сопоставление зональности колонок взаимодействия опытов 952 и 968 однозначно показывает, что стабильность фазы LCF зависит от режима летучих компонентов. В «открытых» условиях LCF не образуется.

Появление расплава LCF является результатом контактово-реакционного взаимодействия исходных контрастных сред. Высокие содержания фтора и кальция, а также отсутствие алюминия и щелочных металлов свидетельствуют о том, что эта фаза образовалась непосредственно в апокарбонатной части образца. LCF имеет такую же природу происхождения, что и все новообразованные кристаллические фазы колонки.

В приконтактовой области апокарбонатной части «открытой» системы опыта 952 обнаружены продукты закалки другой жидкости: специфического расплава $\text{L}_{(3)}$. В химическом составе LCF и $\text{L}_{(3)}$ обнаруживаются общие черты: близкое отношение содержания Si и Ca и отсутствие щелочей. При этом в $\text{L}_{(3)}$ существенно ниже концентрация F и отмечается большое количество Al, что позволяет по формальным признакам считать эту жидкость алюмосиликатным расплавом.

Алюмосиликатный расплав $\text{L}_{(3)}$ тоже мог образоваться непосредственно в апокарбонатной части в результате замещения кристаллических фаз в ходе контактово-реакционного взаимодействия. В пользу этого свидетельствует практически полное отсутствие в его составе щелочей и существенное обогащение по фтору. В алюмосиликатном расплаве зон 5 и 6 таких тенденций изменения состава в приконтактовой области не отмечается.

Механизм образования расплава в изотермических условиях на месте исходного кристаллического вещества прост. Он обусловлен изменением химического состава. При контактово-реакционном взаимодействии в результате привноса одних компонентов и выноса других состав исходного кристаллического вещества смешается в сторону эвтектического. Следствием такого изменения химического состава может быть пересечение линии солидуса системы и переход в субликивидусную область, в которой расплав является одной из стабильных фаз.

Процесс контактово-реакционного взаимодействия, где в качестве одной из фаз присутствует расплав (алюмосиликатный или любой другой), был назван магматическим или расплавным замещением [Коржинский, 1952; Граменицкий и др., 2018]. Во многом он близок к метасоматозу. При магматическом замещении тоже образуется зональность, в которой на разном расстоянии от контакта стабильны различные фазовые ассоциации. По появлению или исчезновению одной или нескольких фаз проводятся границы зон области взаимодействия.

Ранее неоднократно высказывались идеи, что с формированием различных высокоплотных жидких фаз (расплавов, рассолов и пр.) может быть связан процесс переноса и отложения рудного вещества [Ферсман, 1960; Доломанова, 1966; Reyf, 2004; Маракушев, 1979; Маракушев и др., 1983; Рябчиков, Хамилтон, 1971; Когарко, Кригман, 1981; Граменицкий и др., 2005]. Возможно, именно высокоплотные

жидкости, а не флюид осуществляют эффективную концентрацию компонентов и обуславливают рудную специализацию скарнов [Граменицкий, Кононов, 2022].

В соответствии с данными таблицы содержание W и Mo в продуктах закалки фаз LCF и L₍₃₎ ниже порога обнаружения. Однако, факт интенсивного транспорта рудного вещества в изучаемой системе не вызывает сомнений. W и Mo как в условиях опыта 968, так и в условиях опыта 952 частично выносятся из силикатной части образца и в виде Mo-содержащего шеелита откладываются преимущественно в приконтактовой области апокарбонатной части.

Состав расплавов, существующих при параметрах эксперимента, часто существенно изменяется в процессе закалки. Даже при быстром сбросе температуры и давления расплавы теряют часть растворенной в них воды и других летучих компонентов. Расплавы могут частично или полностью раскристаллизовываться, образуя стекло-кристаллический или кристаллический агрегат закалочных фаз. Восстановление состава расплава и равновесных с ним при параметрах опыта кристаллических фаз — нетривиальная задача, которая до сих пор не имеет однозначного решения. В связи с этим необходимо отметить, что содержание W и Mo было нами измерено только в продуктах закалки фаз LCF и L₍₃₎, истинная растворимость рудных минералов в этих расплавах при параметрах эксперимента остается неизвестной, и что часть нерудных минералов, составляющих основной объем продуктов эксперимента, тоже может иметь закалочное происхождение. Например, появление субдиоморфного кальцита и флюорита в четвертой зоне образца 968 может быть признаком их кристаллизации из расплава. В этом случае зона 4 образца 968 при параметрах опыта тоже частично или полностью состояла из карбонатно-фторидного расплава.

В природе в процессе магматической дифференциации молибден и вольфрам концентрируются

преимущественно в кислых породах, обогащенных щелочными металлами и кремнеземом [Рехарский, 1973]. Одной из важных форм их миграции в гидротермальных растворах являются оксогалоидные соединения [Буслаев, Давидович, 1965; Брызгалин, 1967], которые образуются при частичной замене кислорода на фтор или хлор в молибдатных или вольфраматных комплексах. Высокие содержания фтора в зонах концентрирования молибдошебелита в наших экспериментах подтверждают данные о существенной роли галогенидов в транспорте этих металлов.

Заключение. При 750 °C и 1 кбар на границе фторсодержащего алюмосиликатного расплава и кальцита происходит интенсивное взаимодействие, сопровождающееся переносом компонентов и образованием новых фаз.

Процесс взаимодействия сопровождается появлением в апокарбонатной области высокоплотных жидкостей, состав и стабильность которых зависят от режима летучих компонентов.

Полученные результаты позволяют оценить влияние состава флюида на состав и стабильность фаз, образующихся в диапазоне контактово-реакционного взаимодействия кальцита и фторсодержащего гранитного расплава.

Из алюмосиликатного расплава в апокарбонатную часть интенсивно переносятся рудные компоненты и образуют Mo-содержащий шеелит. В рамках проведенных экспериментов существенного влияния фугитивности воды и углекислоты в системе на миграцию рудных компонентов не установлено.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Режимы петрогенеза внутренних геосфер Земли». Аналитические данные получены в лаборатории локальных методов исследования вещества (кафедра петрологии и вулканологии, Геологический факультет МГУ) с использованием электронно-зондового микронализатора «JEOL JXA-8230», приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богомолов М.А. Об известковых скарнах магматической стадии // Очерки физико-химической петрологии. 1970. Т. 2. С. 5–14.

Брызгалин О.В. О влиянии состава раствора на форму переноса вольфрама в гидротермальных условиях // Минералогия и геохимия вольфрамитовых месторождений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1967. С. 19–23.

Буслаев Ю.А., Давидович Р.Л. О некоторых оксофторомолибдатах и оксофторвольфраматах калия // Журнал неорганической химии. 1965. Т. X, вып. 8. С. 961–968.

Бык С. Ш., Фомина В. И. Газовые гидраты // Успехи химии. 1968. Т. 37, № 6. С. 1097–1135.

Граменицкий Е.Н. Петрология метасоматических пород. М.: Инфра-М, 2012. 220 с.

Граменицкий Е.Н., Кононов О.В. Минеральные формации и петрология Тырныаузского вольфрамо-молибденового месторождения. М.: Инфра-М, 2022. 466 с.

Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Алферьева Я.О. Процессы расплавного замещения при взаимодействии оgneупоров с техногенными расплавами // Петрология. 2018. Т. 26, № 4. С. 1–20.

Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Девятова В.Н. Фазовые отношения во фторсодержащих гранитной и нефелин-сиенитовой системах и распределение элементов между фазами. М: ГЕОС, 2005. 186 с.

Доломанова Е.И. О возможной роли ликвации силикатных расплавов в рудообразовании // Очерки геохимии эндогенных и гипергенных процессов. М.: Наука, 1966. С. 127–151.

Жариков В.А. Скарновые месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1968. С. 220–302.

Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А. и др. Метасоматизм и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998. 489 с.

- Зарайский Г.П. Эксперимент в решении проблем метасоматизма. М.: ГЕОС, 2007. 136с.
- Зарайский Г.П., Жариков В.А., Стояновская Ф.М., Балашов В.Н. Экспериментальное исследование биметасоматического скарнообразования. М.: Наука, 1986. 232 с.
- Когарко Л.Н., Кригман Л.Д. Фтор в силикатных расплавах и магмах. М.: Наука, 1981. 126 с.
- Коржинский Д.С. Гранитизация как магматическое замещение // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1952. № 2. С. 56–59.
- Лепников Ф.А., Медведев В.Я., Иванова Л.А. Взаимодействие гранитного расплава с карбонатами и силикатами. Новосибирск: Наука СО, 1978. 152 с.
- Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование (геохимические аспекты). М.: Наука, 1979. 262 с.
- Маракушев А.А., Граменицкий Е.Н., Коротаев М.Ю. Петрологическая модель эндогенного рудообразования // Геология рудн. месторождений. 1983. Т. 25, № 1. С. 3–20.
- Перцев Н.Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород. М.: Наука, 1977. 256 с.
- Перцев Н.Н. Кислотно-основное взаимодействие силикатных магм с карбонатными породами // Доклады академии наук. 1998. Т. 362, № 1. С. 102–105.
- Рехарский В.И. Геохимия молибдена в эндогенных процессах. М.: Наука, 1973. 268 с.
- Рябчиков И.Д., Хамильтон Д.Л. О возможности отделения концентрированных хлоридных растворов в ходе кристаллизации кислых магм // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197, № 4. С. 933–936.
- Смирнов Б.М. Эксимерные молекулы // Успехи физических наук. 1983. Т. 139, вып. 1. С. 53–81.
- Ферсман А.Е. Пегматиты. Т. 1. Гранитные пегматиты. Избранные труды. Т. 6. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 742 с.
- Фролов В.В. Химия: Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 559 с.
- Шабынин Л.И. Рудные месторождения и формации магнезиальных скарнов. М.: Наука, 1974. 288 с.
- Alferjeva Ya.O., Gramenitsky E.N., Novikova A.S. Experimental modeling of interaction between fluorine-containing granite melt and calcite marble // Petrology. 2024. Vol. 32. No. 2. P. 235–247.
- Manning D.A.C. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz—Ab—Or with excess water at 1 kb // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. Vol. 76. P. 206–215.
- Reyf F.G. Immiscible phases of magmatic fluid and their relation to Be and Mo mineralization at the Yermakovka F–Be deposit, Transbaikalia, Russia // Chemical Geol. 2004. Vol. 210. № 1–4. P. 49–71.
- Zaraisky G.P., Aksyuk A.M., Devyatova V.N., et al. Zr/Hf Ratio as an Indicator of Fractionation of Rare-Metal Granites by the Example of the Kukulbei Complex, Eastern Transbaikalia // Petrology. 2008. Vol. 16. No. 7. P. 710–736.

Статья поступила в редакцию 08.07.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025

УДК 552.5 + 553.982:550.4:004.02 + 004.85
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-88-96

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ НАУКИ О ДАННЫХ В ГЕОХИМИИ НЕФТИ И ГАЗА

Глеб Антонович Шевченко^{1✉}, Мария Александровна Большаякова²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gleb.a.shevchenko@gmail.com✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

Аннотация. В статье рассматривается актуальность вопроса применения методов науки о данных в геохимии нефти и газа. Для изучения этого вопроса была разработана и реализована на практике методика поиска и сбора научных публикаций за последнее десятилетие из баз данных и их последующего анализа. Выявлен возрастающий интерес к взаимной интеграции этих областей. В работе приведены конкретные примеры найденных публикаций, обозначены ключевые “проблемы” препятствующие широкому внедрению науки о данных в геохимию (необходимость верификации результатов, недостаток квалифицированных специалистов, проблемы с доступом к данным, недоверие к новым подходам) и перспективные идеи для дальнейшего использования методов науки о данных для решения задач органической геохимии (геологические ассистенты, открытые геолого-геохимические базы данных и специализированные цифровые инструменты).

Ключевые слова: органическая геохимия, геохимия нефти и газа, наука о данных, анализ данных, машинное обучение, визуализация данных

Для цитирования: Шевченко Г.А., Большаякова М.А. Текущее состояние применения методов науки о данных в геохимии нефти и газа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 88–96.

APPLICATIONS OF DATA SCIENCE METHODS IN PETROLEUM GEOCHEMISTRY: CURRENT STATE

Gleb A. Shevchenko^{1✉}, Mariya A. Bolshakova²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gleb.a.shevchenko@gmail.com✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

Abstract. This paper explores the relevance of applications of Data Science methods in petroleum geochemistry. In order to investigate this topic, a methodology for searching, gathering and analyzing scientific papers published in the last decade was developed and successfully applied. The study reveals a growing interest in integrating Data Science methodology into petroleum geochemistry. The article also presents specific examples of found publication, identifies key “problems” hindering widespread Data Science adoption in geochemistry (including the need for result verification, shortage of qualified specialists, issues regarding access to data and negative sentiment towards new methods), and proposes promising ideas for further utilization of data science methods to tackle challenges presented by organic geochemistry (geological assistants, open access geological and geochemical databases and specialized digital toolkits and software).

Keywords: organic geochemistry, petroleum geochemistry, data science, data analysis, machine learning, data visualization

For citation: Shevchenko G.A., Bolshakova M.A. Applications of Data Science methods in petroleum geochemistry: current state. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 88–96. (In Russ.).

Введение. В последнее десятилетие (с начала 2010-х годов) значительно возросло применение систем искусственного интеллекта во всех областях человеческой жизни. Это коснулось и научной сферы деятельности, и привело к трансформации множества существующих и появлению новых междисциплинарных направлений, которые сочетают в себе естественные и компьютерные науки (биоинформатика, геоинформатика, хемоинформатика и др.), а также к использованию новых, во многом более совершенных методов исследований, позволяющих работать более эффективно.

В данной статье речь пойдет о том, как эта трансформация повлияла на геологию, конкретно на геологию нефти и газа. Актуальность исследования этого вопроса заключается в том, что искусственный интеллект и наука о данных тесно связаны между собой и использование новых методов для анализа нефтегеологической информации и интеграция их в производственные процессы и научную деятельность дают множество преимуществ.

В геологии нефти и газа используются методы многих геологических наук: литология, стратиграфия, геофизика (сейсморазведка и геофизические

исследования скважин), геохимия нефти и газа (органическая геохимия), петрофизика и других. В большинстве опубликованных статей внимание исследователей концентрируется на применении методов науки о данных в нефтегазовой геологии в целом, без разделения на отдельные направления [Шиверский, 2022; Tariq, et al., 2021]. Преимущественно подобные исследования посвящены геофизическим и петрофизическим работам, где широко применяются математические и компьютерные методы для решения практических задач.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней будет рассмотрен вопрос применение методов в сфере геохимии нефти и газа.

Целью этой работы является оценка тенденций применения в геохимии (конкретно нефтегазовой/органической) методов науки о данных, посредством обзора научных публикаций.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- охарактеризовать суть и возможности науки о данных;
- разработать методику для поиска и последующего анализа релевантных публикаций: поиск и выбор источников информации, составление выражения-запроса для их отбора, выборка подходящих под критерии записи;
- собрать и выверить найденную информацию, объединить в единый набор данных и провести его анализ: дедупликация записей, расчет соотношений, визуализация данных для выявления общей картины и трендов;
- описать потенциальные препятствия для более широкого применения в органической геохимии и пути их разрешения;
- обозначить перспективные идеи, которые в дальнейшем могут быть реализованы авторами и другими исследователями.

Наука о данных (англ. *Data Science*) — это раздел информатики, предметом которого являются данные, все аспекты работы с ними и изучение проблем их сбора, анализа, обработки и представления в цифровой форме. Наука о данных имеет связь не только с искусственным интеллектом, но и со следующими смежными областями [Maslanko, et al., 2021; Sarker, et al., 2021].

Аналитика данных (*Data Analytics*) включает процессы сбора, обработки, изучения и интерпретации данных для получения практических выводов с использованием традиционных (статистических, эмпирических и логических) методов.

Аналитика больших данных (*Big Data*) — технологии и инструменты для хранения, обработки и анализа больших по объему и сложных наборов данных.

Сбор и интеллектуальный анализ данных, добыча данных (*Data Mining*) — извлечение нетривиальной и практически полезной информации из необработанных массивов больших данных.



Рис. 1. Положение науки о данных по отношению к составляющим ее областям знаний в виде диаграммы Венна по [Conway, 2010] с изменениями

Искусственный интеллект (*Artificial Intelligence, AI*) — алгоритмы, позволяющие выявлять скрытые зависимости и закономерности в данных и в дальнейшем делать предсказания или принимать решения на их основе (можно сказать, что они являются сердцем, центральной составляющей науки о данных): машинное обучение (*Machine Learning, ML*) — классические, специализированные под конкретные задачи и алгоритмы, и глубокое обучение (*Deep Learning, DL*) — искусственные нейронные сети.

Инженерия данных (*Data Engineering*) — построение, обслуживание и управление инфраструктурой для работы с данными.

Визуализация данных (*Data Visualization*) — создание графиков, диаграмм, карт и других визуальных элементов для понимания, коммуникации результатов анализа и поиска закономерностей.

Важно отметить, что во многих статьях термины «наука о данных» и «машинное обучение» / «искусственный интеллект» (и аналогичные исходно англоязычные термины) зачастую используются в качестве синонимов, хотя, по сути, таковыми не являются (рис. 1) [Sarker, et al., 2021]. Это во многом определяется наибольшим интересом именно к этому направлению в науки о данных, желанием использовать в работах «модные термины» для попадания в поисковые алгоритмы и главенствующим положением этих направлений среди других, которые выполняют подчиненную роль в «хранении, перемещении и обработке данных».

Авторы также будут использовать эти термины в качестве синонимов далее по тексту, поскольку науку о данных можно представить как комбинацию машинного обучения и любой предметной области (в данном случае геохимии нефти и газа) (рис. 1) и термины «*Data Science*» и «*Machine Learning*» имеют

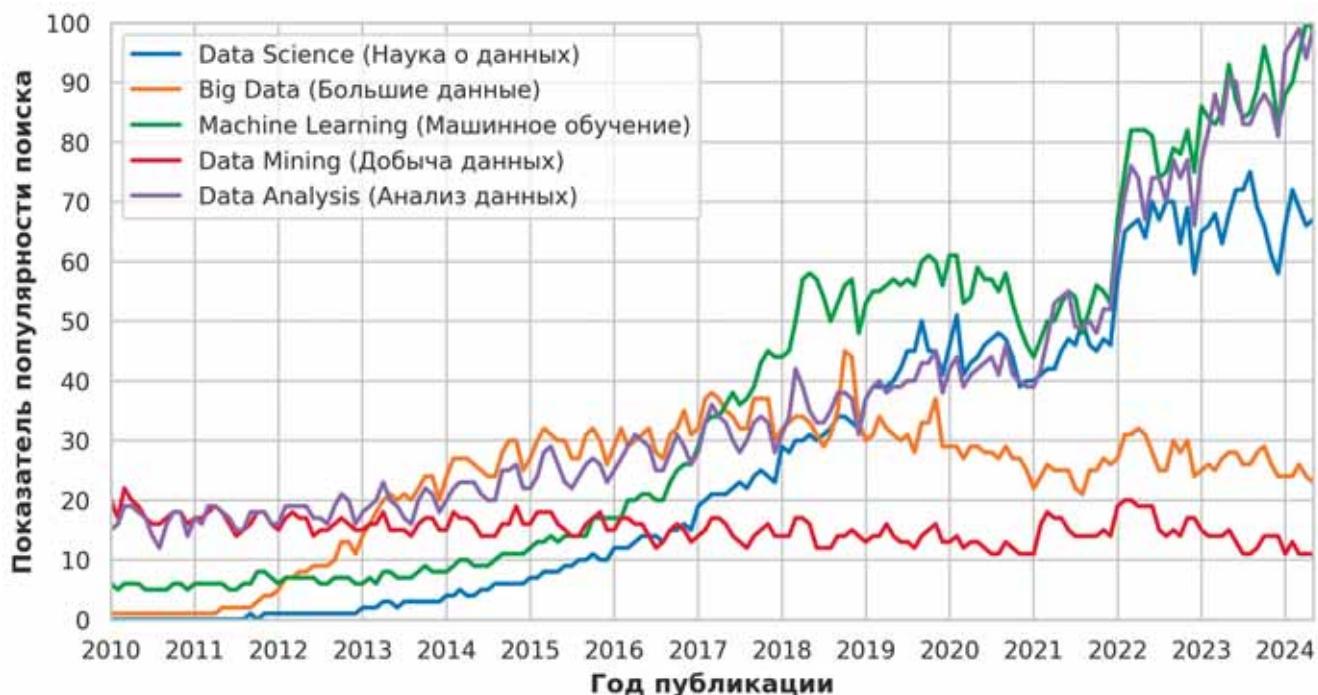


Рис. 2. Мировые тренды популярности поисковых запросов в Google Trends для терминов Data Science и смежных с ней областей за последние 10 лет [Google Trends, 2024]

Таблица 1

Виды представлений информации (по [Maslianko, et al., 2021; Sarker, et al., 2021])

Типы данных	Примеры	Методы обработки и анализа
Структурированные данные: матрица (таблица), массивы	Данные в виде таблиц с определенными строками и столбцами: базы данных (SQL), CSV-файлы, электронные таблицы (Excel, Calc и другие)	Статистический анализ, традиционные методы машинного обучения (регрессия, классификация, кластерный анализ, понижение размерности данных)
Полуструктурированные данные	Данные имеют частичную структуру, содержат теги или маркеры, которые помогают определить их содержание (XML, JSON, HTML, YAML)	Преобразование в структурированный формат или обработка методами для неструктурированных данных
Неструктурированные данные	Изображения Аудио	Компьютерное зрение, глубокое обучение — нейронные сети (полносвязанные, сверточные, генеративно-состязательные, автоэнкодеры и другие типы)
	Тексты	Обработка естественного языка (Natural Language Processing)
	Временные ряды Сигналы	Методы анализа временных рядов (ARIMA, LSTM, скользящее окно и др.)

схожие восходящие тренды популярности (рис. 2) и зачастую употребляются в качестве синонимов.

Типы данных и методы работы с ними. Поскольку данные являются основой любого исследования и предметом изучения Data Science, необходимо обозначить их основные типы, которые в том или ином виде встречаются в любой исследовательской работе, и методы, применяемые для их обработки и анализа (табл. 1).

Методика исследования. Для оценки заинтересованности научного сообщества в вопросе симбиоза науки о данных и органической геохимии были проанализированы крупнейшие базы научных публикаций с открытыми метаданными (для того, чтобы обеспечить прозрачность и повторяемость получаемых результатов) и отсутствием ограничений на максимальное количество выдаваемых в результатах записей [Gusenbauer, 2023].

Таблица 2

Поисковые теги, разделенные по принадлежности «компонентам» (тематикам)

Язык \ Компоненты	Геохимические	Цифровые
Английский	“organic matter”, “petroleum geochemistry”, “organic geochemistry”, “pyrolysis”, “source rocks”, “total organic carbon”, «reservoir geochemistry», «biomarker», «kinetics», «biodegradation», «geochemical indices», «surface geochemistry»	“artificial intelligence”, “machine learning”, “deep learning”, “data science”, “data analysis”, “database”, “data visualization”, “big data”, “neural networks”
Русский	«органическое вещество», «геохимия нефти и газа», «органическая геохимия», «пиролиз», «нефтегазоматеринские толщи», «органический углерод», «резервуарная геохимия», «биомаркер», «биодеградация», «геохимические коэффициенты»	«искусственный интеллект», «наука о данных», «машинное обучение», «глубокое обучение», «нейронные сети», «анализ данных», «база данных», «визуализация данных», «большие данные»

Международные: OpenAlex (включает Directory of Open Access Journals, CrossRef, Microsoft Academic Graph, Research Organization Registry, Unpaywall) [Pries, et al., 2022]. Web of Science и Scopus не использовались по причине отсутствия к ним открытого доступа, их коммерческой природы и существенного пересечения метаданных с OpenAlex, что позволяет использовать только ее для научометрической оценки [Лутай, 2022; Culbert, et al., 2024];

Российские: eLIBRARY.ru (РИНЦ).

В процессе поиска релевантных статей использовались следующие **критерии**.

1) Использовались теги, которые можно разделить на составляющие «компоненты» (табл. 2).

2) Даты публикации: последние 10 лет (2014–2024).

3) Поиск осуществлялся в следующих поисковых полях: название публикации и аннотация. Поиск по ключевым словам не использовался по причине сравнительной ненадежности, поскольку максимальное количество слов на одну статью ограничено и эти слова зачастую могут охватывать не все тематики статьи, в отличие от названий и аннотаций, где всегда заключен основной смысл.

4) Производился отбор по тематикам и областям науки (field) с последующей дополнительной фильтрацией выборок по тематикам и подобластям (subfield):

eLIBRARY.ru: Геология, Информатика, Кибернетика (Тематика); Геология (Тематика);

OpenAlex: Engineering, Computer Science, Earth and Planetary Sciences, Chemistry (Field); Artificial Intelligence, Mechanics of Materials, Analytical Chemistry, Geochemistry and Petrology, Ocean Engineering, Geology, Information Systems (Subfield).

В целом, **последовательность шагов** по созданию необходимого для анализа набора данных следующая:

1) Извлечение данных: экспорт записей из обозначенных выше баз, используя встроенные в них средства для скачивания и скрейпинг локально сохраненных веб-страниц с использованием скрипта на языке Python.

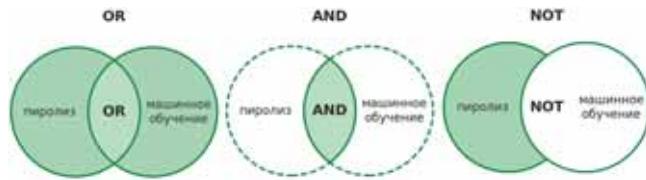


Рис. 3. Логические операторы, которые используются в поисковых системах при построении выражений-запросов: OR — записи, включающие хотя бы один из тегов; AND — записи, включающие оба тега; NOT — записи, включающие один тег и не включающие другой

Записи фильтровались с использованием комбинации различных тегов (при этом также учитывалась морфология слова), складывающихся из двух компонент по следующему принципу: (“biomarker” OR “органическая геохимия” OR ...) AND (“data science” OR «машинное обучение» OR ...) (рис. 3).

2) Очистка и объединение данных: приведение их к табличному формату (актуально для веб-страниц), унификация названий колонок метаданных и удаление лишних, дедупликация записей в пределах каждого из наборов и после объединения наборов из разных источников на основе названий.

3) Получение дополнительной информации о данных: подсчет встречаемости тегов в поисковых полях и определение количества общих записей между базами данных.

4) Визуализация результатов: представление результатов с использованием диаграмм Венна, линейных диаграмм трендов, столбчатых диаграмм распределения по годам и частот встречаемости тегов.

Данный литературный обзор и сам является примером использования методики одного из направлений науки о данных на практике, поскольку в ходе его выполнения осуществлена работа по сбору и анализу данных с визуализацией результатов и дальнейшей формулировкой выводов.

Результаты и обсуждение. Характеристики собранных данных по состоянию на конец мая 2024 г. представлены ниже в табл. 3.

Пересечения баз данных (общих записей, встречающихся в обеих базах) имеют вид, представлен-

Таблица 3

Характеристика собранных наборов данных

База данных	Включаемые термины	«Геохимические» AND «Цифровые», шт	«Геохимические», шт	Доля «цифровой» части в результатах
OpenAlex		2661	47461	0,056 (5,6 %)
eLIBRARY.ru		556	12636	0,044 (4,4 %)

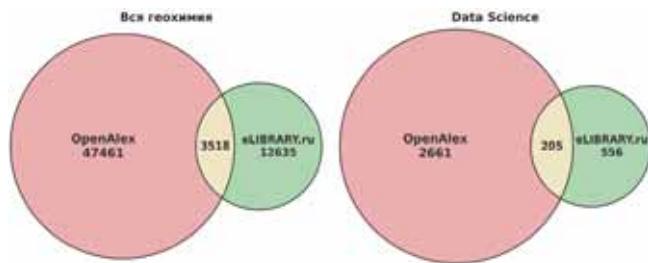


Рис. 4. Диаграммы Венна, показывающие количество записей, присутствующих в каждом из наборов данных и общих для обеих баз записей (табл. 3)

ный на рис. 4. Для расчета величины перекрытия использовались только названия статей, так как не удалось осуществить экспорт из eLIBRARY.ru поля DOI (цифрового идентификатора объекта), который бы позволил однозначно определить и вычислить количество дубликатов.

Диаграммы количества публикаций как по геохимической тематике в целом, так и по тематике науки о данных, построенные по данным из обоих источников, представлены на рис. 5. По ним хорошо видно, что количество публикаций возрастает от года к году, так же, как и доля статей, в которых используется методика науки о данных.

На рис. 6 представлена встречаемость используемых терминов. Видно, что теги “machine learning”,

“database”, “neural networks”, “geochemical”, “biomarker” характеризуется наибольшей встречаемостью.

Описание конкретных примеров. Из собранного набора мы выбрали некоторые примеры статей, которые иллюстрируют возможности и использование применительно к геохимическому направлению методов науки о данных. Публикации из выборки можно разделить на две группы по целям и решаемым задачам.

Анализ с помощью методов науки о данных — целью исследования является решение геохимических задач, использующих эти методы (табл. 4).

Цифровые инструменты на языке Python — целью такого исследования является создание инструмента для упрощения процесса анализа данных методами науки о данных, описание этого процесса и схемы работы решения:

1) *Geochemistry π* [ZhangZhou, et al., 2024] — Python-фреймворк для геохимических исследований с использованием автоматического машинного обучения (AutoML) и табличных геохимических данных;

2) *GeoPyTool* [Yu, et al., 2018] — программное обеспечение для визуализации и анализа геохимических и структурных данных;

3) *pyrolite* [Williams, et al., 2020] — набор инструментов для визуализации, обработки и преобразования геохимических данных.

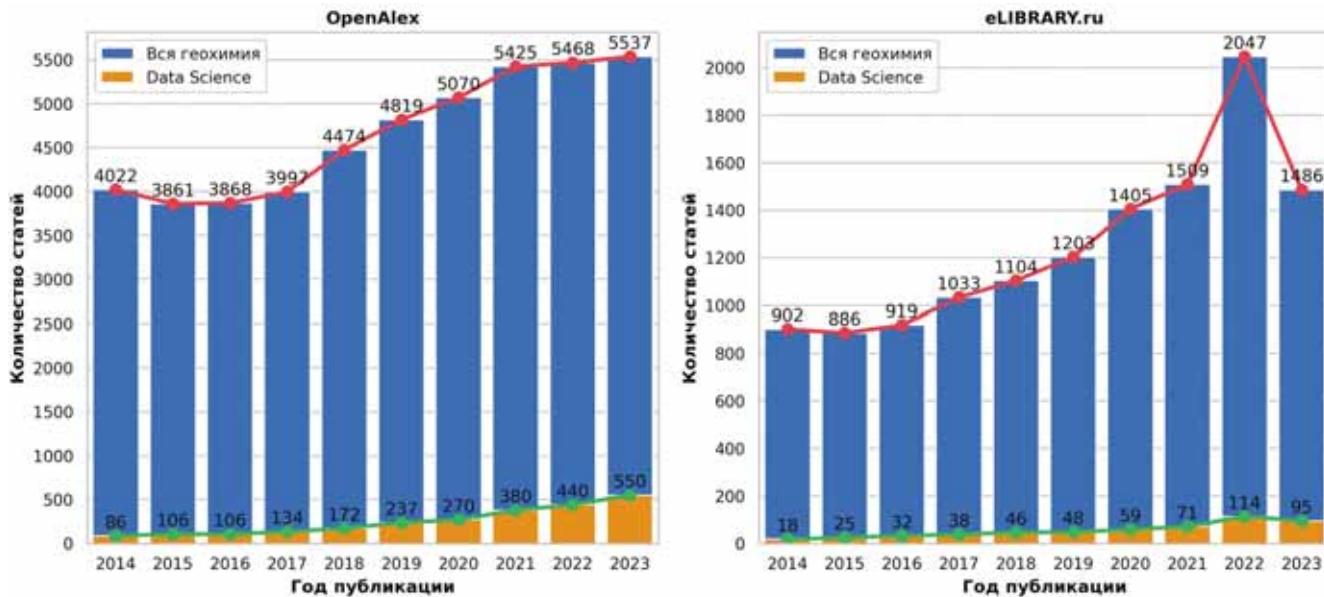


Рис. 5. Столбчатая диаграмма с накоплением по годам количества публикуемых статей, полученных по результатам анализа публикаций из двух баз данных

Таблица 4

Анализ материалов статей с помощью методов науки о данных

Статья	Краткое описание	Используемые методы	Результаты
Prediction of TOC content ... (Sun, et al., 2023)	Сравнительный анализ машинного обучения с традиционными эмпирическими методами для предсказания значений ТОС в породах с высоким содержанием органического вещества, оценка важности различных каротажных кривых для отбора наиболее важных признаков при прогнозировании ТОС.	Машинное обучение (случайный лес, дерево решений, метод опорных векторов и градиентный бустинг XGBoost).	Модель случайного леса продемонстрировала наивысшую точность прогнозирования ТОС ($R^2 = 0,915$), превосходя XGBoost ($R^2 = 0,847$), метод опорных векторов ($R^2 = 0,762$) и традиционные методы (R^2 от 0,003 до 0,137).
Intelligent geochemical interpretation ... (Su, et al., 2024)	Автоматическая интерпретация изображений масс-хроматограмм с использованием нейронных сетей для определения характеристик биомаркеров нефти и проведения корреляции нефть-НГМТ.	Сверточные нейронные сети (CNN), факторный анализ для понижения размерности данных.	CNN успешно интерпретирует масс-хроматограммы, определяя зрелость органического вещества (ОВ) и тип материнской породы. Точность сопоставима с ручной интерпретацией, но автоматизация значительно ускоряет процесс и позволяет извлекать информацию из масс-хроматограмм, которая недоступна при традиционной интерпретации.
Geochemical biodegraded oil classification ... (Bispo-Silva, et al., 2023)	Определение степени биодеградации нефти по изображениям хроматограмм с использованием сверточных нейронных сетей, сравнительный анализ нескольких алгоритмов машинного обучения.	Сверточные нейронные сети (CNN), машинное обучение (наивный байесовский классификатор, случайный лес, дерево решений и логистическая регрессия).	CNN успешно классифицирует хроматограммы на биодеградированные и небиодеградированные с accuracy = 97,6 %. Нейронные сети показали наилучшую accuracy = 96,7 % среди всех тестируемых алгоритмов машинного обучения.
Выявление особенностей ... (Осипов и др., 2022)	Определение различий органического вещества двух нефтегазоматеринских толщ (НГМТ), осуществление корреляции нефть-НГМТ, сравнение методов геохимического (традиционного) и статистического анализов.	Машинное обучение (случайный лес, k-ближайших соседей, анализ главных компонент для понижения размерности).	Результаты статистического анализа хорошо согласуются с результатами традиционного геохимического анализа. Поэтому статистический анализ (включает методы машинного обучения) является эффективным инструментом для выявления различий между НГМТ и корреляции нефть-НГМТ.
Denoising of Geochemical Data ... (Zhang, et al., 2024)	Исследование возможности очистки данных региональных геохимических исследований от шумов.	Нейронные сети (автоэнкодеры).	Автоэнкодеры эффективно уменьшают шум, что проявляется в уменьшении эффекта самородка на вариограммах. Определена линейная зависимость между степенью снижения шума и производительностью автоэнкодера. Производительность также связана с показателями качества данных, такими как точность, прецизионность и F-статистика (ANOVA). Определен оптимальный размер кодирующего слоя (11 узлов), который обеспечивает максимальное снижение шума без удаления значимых геохимических аномалий.
DATA MINING IN ORGANIC ... (Torres, et al., 2022)	Разработка методологии анализа геохимических данных нефти с использованием интеллектуального анализа данных и машинного обучения для классификации происхождения нефти.	Машинное обучение (случайный лес, дерево решений и логистическая регрессия, искусственные нейронные сети), иерархический кластеризация, кластеризация методом k-средних, многомерное шкалирование (MDS) для снижения размерности данных.	Из 60 исходных атрибутов с помощью MDS был выделен оптимальный набор из 26 переменных. Классификация 200 образцов нефти с помощью ML-алгоритмов показала следующие accuracy: 92.50 % для дерева решений, 95.00 % для случайного леса и 87.50 % для искусственной нейронной сети. Предложенный метод сопоставим по точности с результатами, полученными традиционными методами.

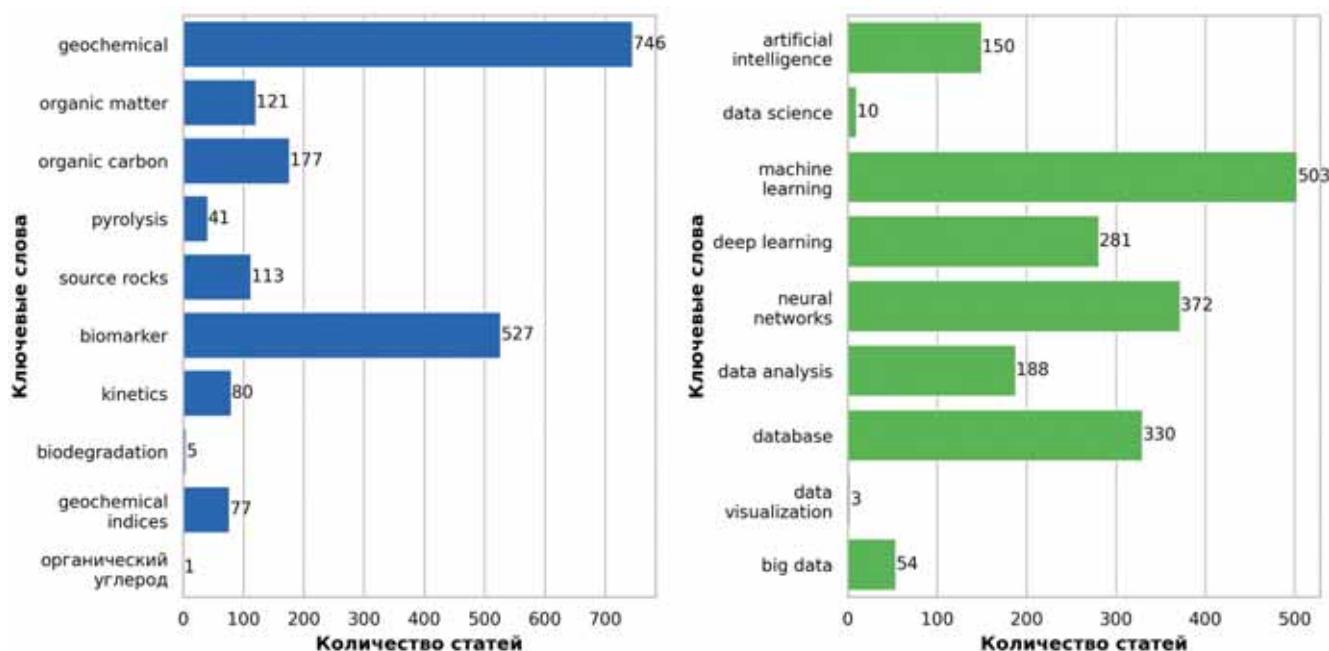


Рис. 6. Диаграмма суммарной встречаемости тегов в названиях и аннотациях

Факторы, мешающие расширению использования методов науки о данных применительно к геологии. Исходя из изложенного выше напрашивается вывод, что включение методов науки о данных должно принести качественные улучшения в исследовательские процессы. Однако полученные в результате исследования цифры (табл. 3) свидетельствуют о том, что существуют некие препятствия для широкого применения этих методов.

1. Проблема интерпретируемости моделей и верификации результатов. Модели машинного обучения могут давать точные прогнозы, но быть при этом «черными ящиками», т.е. не объяснять, почему они пришли к такому выводу, так как причинно-следственные связи в сложных моделях не имеют выражения в явном виде. Это затрудняет интерпретацию и верификацию полученных результатов, что, зачастую, является самой сложной задачей в процессе исследования, решить которую может только опытный специалист. В связи с этим возникает вторая проблема.

2. Скептическое отношение к новым подходам. Исследования в области геохимии нефти и газа пока могут быть больше ориентированы на применение традиционных, чем переход на использование новых цифровых методов, что можно кратко охарактеризовать выражением «не надо ломать то, что уже работает правильно». Эксперты могут быть не осведомлены о возможностях этих методов, им может не хватать должных навыков для их корректного применения, или это может быть связано с проблемой интерпретируемости результатов.

3. Ограниченный доступ к данным. Большое количество геолого-геохимических данных является собственностью компаний или государства и может быть недоступно для проведения исследований. Так

в Российской Федерации такая информация может предоставляться только по запросу или представлять собой коммерческую и государственную тайну. Это приводит к ограничению размера выборок и следующей проблеме.

4. Объем данных для обучения и особенности «геологический объектов». Модели машинного обучения во многом основаны на принципах математической статистики. В связи с этим, необходимо достаточное количество данных для обучения и получения точных результатов. Это не всегда достижимо, поскольку когда идет речь о геологических данных, то количества «реальных» замеров для получения репрезентативной выборки может просто не хватать. Поэтому существуют специальные техники, которые, например, генерируют синтетические «промежуточные» данные между известными «реальными», что, однако, означает дополнительные вычисления и временные затраты на их реализацию и выполнение. В то же время каждый геологический объект или процесс является по-своему уникальным и индивидуальным, что зачастую плохо поддается однозначной классификации и интерпретации даже при его изучении учеными-специалистами с использованием классических методов. Создание единой модели для нескольких таких объектов не всегда возможно по причине отличающихся параметров распределений, описывающих интересующие модельный свойства, например, две разновозрастные нефтегазоматеринские толщи с принципиально разными параметрами генерационным потенциалом.

5. Высокая стоимость оборудования и недостаток вычислительных мощностей для обучения и эксплуатации моделей. Большая часть методов машинного обучения и даже простых нейронных сетей на сегод-

няшний момент не требует много вычислительных ресурсов, и они способны быстро исполняться практически на любом вычислительном устройстве, но не для сложных мультимодальных или полнотекстовых моделей, которые требуют достаточно дорогого оборудования (видеокарта или ИИ-ускоритель) для их локального использования или привязки к облачным сервисам для их удаленного исполнения. В случаях когда требуется работать с большим объемом данных, необходимых для обучения самих моделей, то задача только усложняется, поскольку возрастают требования к размерам хранилищ информации, что требует значительных инвестиций в оборудование.

6. Сложность решаемой задачи. При решении простой задачи, не требующей большого количества данных, автоматически отпадает необходимость в реализации специализированной системы хранения и обработки данных вместо использования, например, обычных электронных книг Excel в виде неоправданных временных затрат. Тоже самое можно сказать и про применение алгоритмов машинного обучения вместо простых, сугубо алгоритмических методов или классических методов анализа данных.

7. Новизна области исследования и нехватка квалифицированных специалистов. Применение методов науки о данных при работе с геолого-геохимическими данными — активно развивающаяся область (что видно исходя из трендов роста публикаций), поэтому многие исследования могут быть еще не опубликованы или находиться в стадии разработки. Кроме того, проведение подобных исследований и реализация новых цифровых решений требует наличие глубокими знаниями как в предметной области — геологии, так и в других составляющих науку о данных областях — информатике и математике (рис. 1). В настоящий момент эта проблема активно решается созданием междисциплинарных программ для подготовки специалистов, имеющих необходимую экспертизу в обеих областях.

Перспективы использования методов науки о данных в органической геохимии.

1. Геологические ассистенты. Адаптация (тонкая настройка) большой языковой или мультимодальной (GPT, Mistral, Llama и прочие) модели для решения геологических (и геохимических) задач, способных отвечать на вопросы, помогать пользователю в обработке данных, генерировать графические материалы [Cheng, et al., 2023; Lin, et al., 2023].

2. Геолого-геохимические базы данных. Создание единых, обезличенных баз данных с результатами геохимических исследований и свободным доступом: проектирование структуры баз, организация сбора и систематизации данных из разных источников, их администрирование, интеграция с другими источниками геологической информации, предоставления внешнего доступа для пользователей и разработчиков через API или веб-интерфейс [Осипов и др., 2022; Farrell, et al., 2021; Wyborn, et al., 2020].

3. Цифровые инструменты. Инструменты для решения рутинных и узкоспециализированных задач органической геохимии, такие как обработка определение степени биодеградации нефти по хроматограммам, полуавтоматическая интерпретация пиков; определение условий осадконакопления, источников и типов ОВ, степени катагенетической преобразованности, литологического состава вмещающей НГМТ, на основе геохимических коэффициентов и индексов; визуализация карт и специализированных геохимических диаграмм; автоматическая интерпретация результатов пиролиза с использованием геохимических диаграмм.

Заключение. Проведенное исследование показало, что наблюдается рост числа статей, совместно упоминающих науку о данных и геохимию нефти и газа, что свидетельствует о том, что методы науки о данных на данный момент находят свое применение в этой области. Однако, в целом, востребованность подобного рода исследований пока не так высока, что хорошо отражают вычисленные доли «цифровой» статей среди всех результатов: 5.6 (OpenAlex) и 4.4 (eLIBRARY.ru) %.

Обозначены 7 проблем, препятствующих использованию методики науки о данных абсолютно во всех исследовательских проектах, связанных не только с геохимией, но и геологией нефти и газа в целом.

В работе предложены 3 варианта использования методов науки о данных.

Включение методов науки о данных в практику геохимии нефти и газа является, по мнению авторов, неизбежной и необходимой тенденцией для поддержания актуальности и конкурентоспособности геологии нефти и газа в целом среди других естественных наук. Эта тенденция, пусть медленно, но реализуется на практике множеством исследователей. Сейчас создание подобных инструментов является задачей значительно более простой и актуальной, чем когда бы то ни было до этого в силу наличия таких технологий как язык программирования Python и его огромной экосистемы библиотек для работы с любыми типами данных в во всех возможных форматах, любыми возможными методами и наличия открытого доступа к огромному количеству обучающих материалов в интернете.

Авторы также хотят отметить, что предложенная методика поиска и сбора материалов не является совершенной — ими могла быть найдена лишь часть отвечающих критериям поиска работ, поэтому собранный набор статей и полученные результаты не является исчерпывающим. Так, например, могут быть улучшены следующие аспекты поиска и обработки данных:

1) использование при поиске публикаций других открытых, но ограничивающих массовый экспорт записей баз данных [Gusenbauer, 2023]: Bielefeld Academic Search Engine (BASE), GeoRef, CORE

и OpenAIRE, — это должно позитивно сказаться на полноте выборки;

2) добавление дополнительных слов в поисковой набор тегов, создание набора тегов для других языков кроме русского и английского;

3) осуществление дедупликации статей между базами данных, используя другие поля метаданных, такие как имена авторов и DOI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лутай А.В., Любушкин Е.Э. Сравнение качества метаданных в БД CrossRef, Lens, OpenAlex, Scopus, Semantic Scholar, Web of Science Core Collection. Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ). 2022. URL: https://podpiska.rfbr.ru/storage/reports2021/2022_meta_quality.html (дата обращения: 28.05.2024).

Осипов К.О., Абля Э.А., Сауткин Р.С. и др. Выявление особенностей органического вещества нефти и нефтегазоматеринских толщ путем сопоставления результатов геохимического анализа со статистическим анализом, основанным на методах машинного обучения (на примере одного из месторождений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна) // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 2. С. 217–229.

Шиверский Г.В., Кривоцеков С.Н. Перспективы применения методов искусственного интеллекта в нефтегазовой геологии // Журнал магистров. 2022. № 2. С. 57–67.

Bispo-Silva S., Oliveira C.J., De Alemar Barberes G. Geochemical biodegraded oil classification using a machine learning approach // Geosciences. 2023. Vol. 13. N 11. P. 321.

Cheng D., Zhang T., He Z., et al. K2: A Foundation Language Model for Geoscience Knowledge Understanding and Utilization // arXiv e-prints. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2306.05064>

Conway D. The Data Science Venn Diagram. Drew Conway Data Consulting. 2010. URL: <http://drewconway.com/zia/2013/3/26/the-data-science-venn-diagram> (дата обращения: 31.05.2024).

Culbert J., Hobert A., Jahn N., et al. Reference Coverage Analysis of OpenAlex compared to Web of Science and Scopus // arXiv e-prints. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.16359>

Farrell U.C., Samawi R., Anjanappa S., et al. The Sedimentary Geochemistry and Paleoenvironments Project // Geobiology. 2021. Vol. 19. N 6. P. 545–556.

Google Colab. URL: <https://colab.research.google.com/drive/1oULyxOqrpP90-SVIEy1RRM2SNHgAKpHb?usp=sharing> (дата обращения: 31.05.2024).

Gusenbauer M. A free online guide to researchers' best search options // Nature. 2023. Vol. 615. P. 586.

Lin Z., Deng C., Zhou L., et al. GeoGalactica: A Scientific Large Language Model in Geoscience // arXiv e-prints. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.00434>

Данные и код. Для создания иллюстраций и обработки данных использовалась интерактивная облачная платформа Google Colab для работы с кодом на Python. Блокнот с кодом и пояснениями находится в открытом доступе [Google Colab, 2024].

Благодарности. Авторы статьи признательны рецензентам за потраченное время и ценные замечания.

Maslianko P., Sielskyi Y. Data Science — definition and structural representation // System Research & Information Technologies. 2021. N 1. P. 61–78.

Priem J., Piwowar H., Orr R. OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts // arXiv e-prints. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.01833>

Sarker I.H. Data Science and Analytics: An Overview from Data-Driven Smart Computing, Decision-Making and Applications Perspective // SN Computer Science. 2021. Vol. 2, N 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00765-8>

Su K., Lu J., Yu J., et al. Intelligent geochemical interpretation of mass chromatograms: Based on convolution neural network // Petroleum Science. 2024. Vol. 21, N 2. P. 752–764.

Sun J., Dang W., Wang F., et al. Prediction of TOC content in Organic-Rich shale using machine learning algorithms: comparative study of random forest, Support Vector Machine, and XGBOOST // Energies (Basel). 2023. Vol. 16, N 10. P. 4159.

Tariq Z., Aljawad M.S., Hasan A., et al. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. Vol. 11, N 12. P. 4339–4374.

Torres S.B., De Oliveira Matias I., De Araújo Ponte F.F., et al. Data mining in organic geochemistry: case study in Potiguar basin // Geociências. 2022. Vol. 41, N 1. P. 105–114.

Williams M.J., Schoneveld L., Mao Y., et al. pyrolite: Python for geochemistry // Journal of Open Source Software. 2020. Vol. 5. N 50. P. 2314.

Wyborn L., Lehnert K.A. OneGeochemistry: Creating a global FAIR-Way to access and share geochemical data // Goldschmidt Abstracts. 2020. URL: <https://doi.org/10.46427/gold2020.2910>

Yu Q.-Y., Bagas L., Yang P.-H., et al. GeoPyTool: a cross-platform software solution for common geological calculations and plots // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. N 4. P. 1437–1447.

Zhang S.E., Bourdeau J.E., Nwaila G.T., et al. Denoising of Geochemical Data using Deep Learning—Implications for Regional Surveys // Natural Resources Research. 2024. Vol. 33. P. 495–520.

Zhangzhou J., He C., Sun J., et al. Geochemistry π: Automated machine learning Python framework for tabular data // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2024. Vol. 25. N 1. P. e2023GC011324.

Статья поступила в редакцию 02.06.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 28.02.2025

УДК 550.834

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-97-104

ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ ТОНКИХ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛНОВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Юрий Петрович Ампилов^{1✉}, Анатолий Викторович Вершинин²,
Даниил Сергеевич Кунченко³, Константин Александрович Петровский⁴,
Карина Рауфовна Сафуанова⁵**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; yury@ampilov.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; versh1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3928-3864>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; d.kunchenko@seismotech.ru, <https://istina.msu.ru/workers/489864888/>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; petrovsky@cae-fidesys.com, <https://istina.msu.ru/workers/283955382/>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

Аннотация. Целью работы является подбор метода изучения количественных характеристик коллекторских свойств доюрского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири по данным 3D сейсморазведки и опробование его на реальных данных.

В качестве методического примера выбрана кора выветривания в доюрском комплексе Западной Сибири, поскольку при сравнительно небольшой ее мощности (от 0 до 50 м) отражения от кровли и подошвы не разделяются. Амплитудно-частотная характеристика данного интерференционного отражения зависит от толщины, и потому некоторые сейсмические атрибуты могут на это реагировать.

Для выяснения этих связей впервые применено полноволновое сейсмическое моделирование с использованием метода спектральных элементов в рамках передового отечественного программного комплекса «Фидесис», разработанного выпускниками и сотрудниками кафедры вычислительной механики МГУ имени М.В. Ломоносова и адаптированного сотрудниками и аспирантами Геологического ф-та МГУ для решения поставленных задач. В данной статье приведены первые результаты их практического использования. По сравнительным расчетам установлено, что применяемые до этого в сейсмике традиционные лучевые методы моделирования вкупе со сверткой с коэффициентами отражения дают ложные результаты и потому не рекомендуются для дальнейшего применения.

Предложенная и опробованная технология позволила построить прогнозную карту толщины потенциально нефтегазоносной коры выветривания в кровле доюрского комплекса на площади съемки 3D.

Ключевые слова: полноволновое моделирование, свертка сигнала, сейсморазведка, акустическое моделирование, сейсмические атрибуты, Западная Сибирь, доюрский комплекс

Для цитирования: Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Кунченко Д.С., Петровский К.А., Сафуанова К.Р. Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полноволнового моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 97–104.

PREDICTION OF THIN-LAYER THICKNESS USING SEISMIC FULL-WAVE MODELING

**Yury P. Ampilov^{1✉}, Anatoly V. Vershinin², Denis S. Kunchenko³,
Konstantin A. Petrovsky⁴, Karina R. Safuanova⁵**

¹ Lomonosov Moscow State University; Institute of Oil and Gas Problems RAS, Moscow, Russia; yury@ampilov.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; versh1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3928-3864>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; d.kunchenko@seismotech.ru, <https://istina.msu.ru/workers/489864888/>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; petrovsky@cae-fidesys.com, <https://istina.msu.ru/workers/283955382/>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

Abstract. The aim of the work is to select a method for studying the quantitative characteristics of the reservoir properties of the pre-Jurassic oil and gas complex of Western Siberia according to 3D seismic data and testing it on real data.

The weathering crust in the Pre-Jurassic complex of Western Siberia was chosen as a methodological example, since with its relatively small capacity (from 0 to 50 meters) reflections from the roof and the sole are not separated. The amplitude-frequency response of this interference reflection depends on the thickness, and therefore some seismic attributes may react to this.

To clarify these connections, full-wave seismic modeling using the spectral element method was used for the first time within the framework of the advanced domestic CAE FIDESYS software developed by graduates and staff of the Chair of Computational Mechanics of Lomonosov Moscow State University and adapted by staff and graduate students of the Geological Faculty of Moscow State University to solve the tasks set. This article presents the first results of their practical use. According to comparative calculations, it has been established that the traditional beam modeling methods previously used in seismics, coupled with convolution with reflection coefficients, give false results and therefore are not recommended for further use.

The proposed and tested technology made it possible to build a forecast map of the thickness of the potentially oil and gas-bearing weathering crust in the roof of the Pre-Jurassic complex on the 3D survey area.

Keywords: full-wave modeling, signal convolution, seismic exploration, acoustic modeling, seismic attributes, Western Siberia, pre-Jurassic complex

For citation: Ampilov Yu.P., Vershinin A.V., Kunchenko D.S., Petrovsky K.A., Safuanova K.R. Prediction of thin-layer thickness using seismic full-wave modeling. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 97–104. (In Russ.).

Введение. Значительная степень разведанности месторождений нефти и газа в Западной Сибири и истощение «классических» нефтегазоносных комплексов делает актуальным вопрос поиска дополнительных перспективных объектов. Нарастить ресурсную базу возможно с помощью активного освоения трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ), поскольку обычные запасы во многом открыты и давно разрабатываются. Существенная часть ТРИЗ относится к глубокозалегающим резервуарам доюрского комплекса (ДЮК).

Сейсморазведка, безусловно, является основным геофизическим методом при поисках и разведке месторождений углеводородов, но и ее возможности для исследования глубокозалегающих ТРИЗ значительно ограничены в сравнении с традиционными продуктивными интервалами в меловой части разреза Западносибирской нефтегазоносной провинции.

В данной статье предпринята попытка оценить интерпретационные возможности сейсморазведки для глубоких горизонтов Западной Сибири на основе последних достижений полноволнового моделирования [Ампилов и др., 2024].

Целью работы является подбор метода изучения количественных характеристик коллекторских свойств ДЮК в межскважинном пространстве по данным 3D сейсморазведки.

Для моделирования впервые используется расчет полной сейсмической волновой картины на основе метода спектральных элементов [Левин, Вершинин, 2015; Vershinin, Charara, 2020; Vershinin, 2022]. Учитываются все типы волн, возникающих в трехмерной среде: продольные, поперечные, поверхностные, обменные, дифрагированные, в отличие от упрощенных сверточных и лучевых схем, применяемых в настоящее время и зачастую дающих результаты, приводящие к ошибочным выводам.

Анализ и выбор методов моделирования. Традиционно в сейсморазведке для моделирования волновых полей широко используется лучевой метод [Аки, Ричардс, 1983; Ампилов, Облогина, 1982], чаще всего, в рамках простой однороднослойной модели. В простейшем варианте это может быть даже одномерная модель свертки с коэффициентами отражения, которая меняется от трассы к трассе.

Никаких кратных волн или волн-спутников, неизбежно возникающих в тонкослоистой среде, не учитывается, тем более обменных. Причем, такой весьма схематичный подход применяется даже в наиболее распространенном случае различных акустических инверсий. Получаемые результаты являются неадекватными реальной среде, и выводы, основанные на полученных виртуальных изображениях, могут оказаться ложными [Ампилов, 2010].

Часто не учитывается, что лучевой метод является асимптотическим и работает лишь в высокочастотном приближении, когда длина волны существенно меньше пути распространения. При типичных длинах волн в «нефтяной» сейсморазведке, примерно от 50 до 200 м, это не всегда корректно [Ампилов, 1992].

От большинства перечисленных ограничений свободны методы, основанные на моделировании волновых фронтов. Правда и они не полностью удовлетворяют некоторым геофизическим задачам, особенно, если в расчет принимаются только отдельные типы волн, например, однократные отраженные.

В способах расчета волновых полей тоже есть различные подходы, начиная от наиболее распространенного метода конечных элементов до наиболее практического метода конечных разностей [Лисица и др., 2014]. Последний позволяет использовать модель-решетку любой сложности и дает качественный результат при менее значительных вычислительных ресурсах, чем в методах конечных элементов с прямоугольными сетками. Однако устойчивость конечноразностного метода зависит от шага матрицы конкретной модели, что вносит в алгоритм элемент неопределенности.

В связи с изложенным требуются новые решения для сейсмического моделирования, и они найдены. Основой послужил разработанный на кафедре вычислительной механики МГУ имени М.В. Ломоносова алгоритм для описания распространения сейсмических волн в произвольно-неоднородной среде на основе метода спектральных элементов (МСЭ) [Ampilov, et al., 2024, Левин, Вершинин, 2015]. В данной статье он адаптирован для достижения конкретной поставленной геологической цели на основе тесного межфакультетского сотрудничества

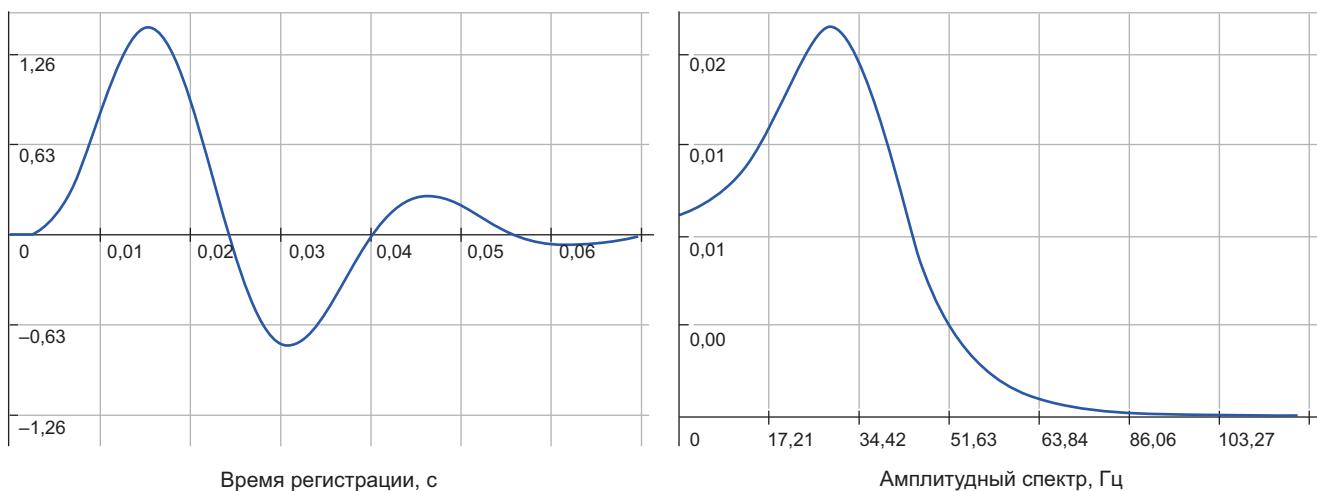


Рис. 1. Импульс Рикера. Форма сигнала (слева) и его спектр (справа)

между геологическим и механико-математическим факультетами МГУ, о чем свидетельствует и состав авторов статьи.

Как и любой метод, МСЭ имеет свои ограничения. Основной сложностью является необходимость построения качественной расчетной сетки без сильно искаженных элементов. Также метод требует тщательного выбора параметров (порядок МСЭ, степень измельчения сетки, число Куранта и др.) для конкретной задачи.

Несмотря на это метод спектральных элементов представляет собой мощный инструмент для решения уравнений в частных производных, который сочетает в себе преимущества классического метода конечных и спектральных методов на основе рядов Фурье. Его высокая точность и гибкость делают его привлекательным для сложных научных и инженерных задач. В то же время, при использовании МСЭ для решения трехмерных промышленных задач сейсмики его высокая вычислительная сложность требует значительных высокопроизводительных компьютерных ресурсов.

При достаточно точных расчетах (высоких порядках полиномов Лежандра) полноволновое моделирование на основе спектральных элементов значительно превосходит конечноразностный метод по соответствию результатов моделирования реальным данным. Главным преимуществом данных методик перед акустическим случаем является более точное описание откликов от структур неоднородностей, при образовании которых волновая природа сейсмических волн играет важную роль.

Детальное исследование различных аспектов МСЭ проведено в фундаментальной монографии ученых МГУ имени М.В. Ломоносова [Левин, Вершинин, 2015]. На этой основе был разработан отечественный многофункциональный пакет инженерного анализа САЕ Fidesys, используемый при проектировании деталей и конструкций в различных отраслях, включая машиностроение, строительство, горное дело и т. п.

В данной статье приводятся первые прикладные результаты его применения в сейсморазведке. В качестве альтернативы дополнительно использовался также широко известный импортный пакет Tesseral, но только применительно к акустическому моделированию (случай однократных продольных волн).

Входные данные для полноволнового моделирования — модуль упругости и коэффициент Пуассона — были получены пересчетом из скоростей продольных, поперечных волн, а также плотности, определенных с использованием кривых акустического и плотностного каротажа в опорной скважине на изучаемой площади с забоем на глубине 2912 м. Для целей данного эксперимента модель в скважине предполагалась безграничной во всех направлениях.

Шаг между приемниками в сейсмограмме был выбран 25 м, а в качестве зондирующего импульса был взят импульс Рикера частотой 30 Гц (рис. 1), сдвинутый на $(-\pi)$. В данной задаче было решено по результатам тестирований аппроксимировать вектор поля упругих смещений и скоростей полиномами Лагранжа 11 порядка. Это давало высокую точность решений и приемлемую скорость расчетов.

При моделировании можно наблюдать процесс распространения волновых фронтов в любой текущий момент времени (рис. 2).

Акустическое моделирование однократных продольных волн было выполнено в ПО Tesseral. Настройки моделирования те же, что и для полноволнового моделирования, за исключением задания степени полинома, так как акустическое моделирование основано на методе конечных разностей. Моделирование в ПО Tesseral не учитывало обменных и кратных волн, в отличие от полноволнового моделирования, где все они рассчитывались. Так что сейсмограммы, полученные в результате этих двух видов моделирования, существенно отличаются (рис. 3).

Кроме них в рамках исследования была рассчитана сейсмопротяжка как свертка зондирующего импульса с коэффициентами отражения при нормальном падении, чтобы сравнить все три резуль-

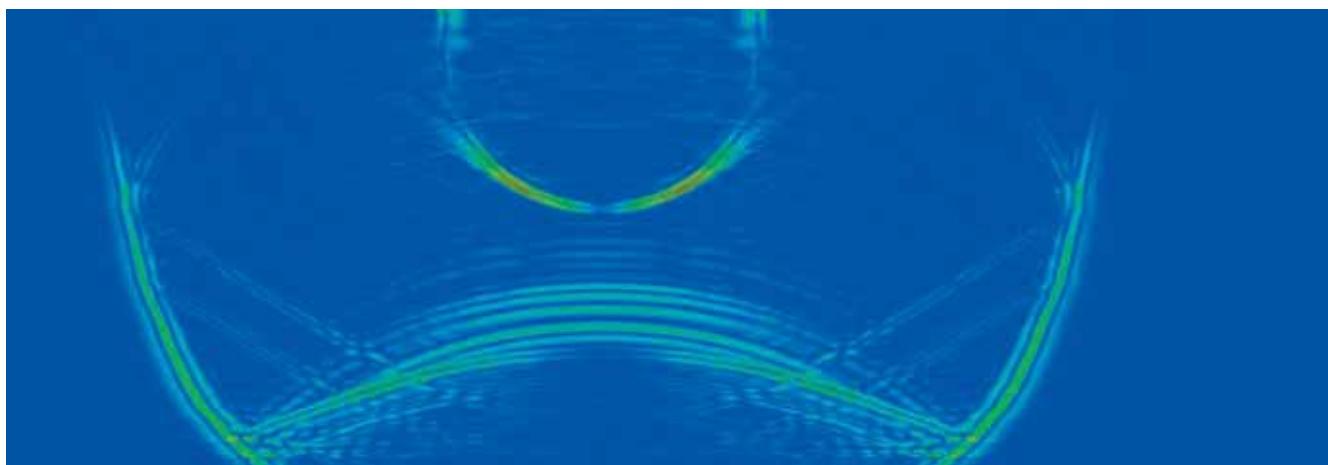


Рис. 2. Распространение волновых фронтов всех типов волн

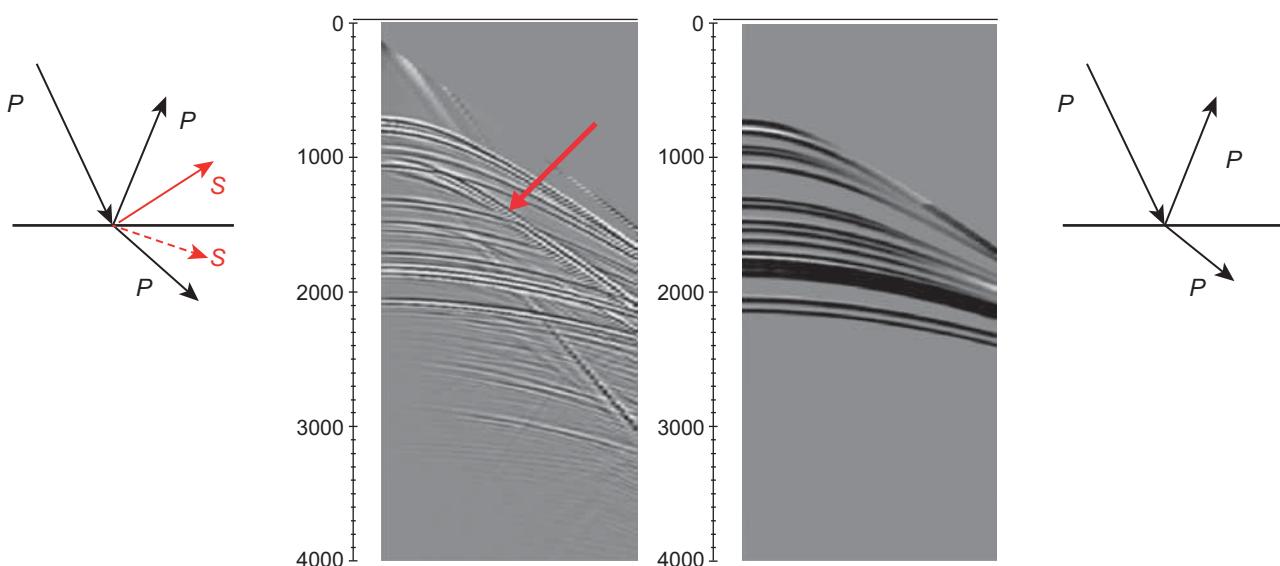


Рис. 3. Сейсмограмма, полученная при полноволновом моделировании в ПО Фидесис (слева) в сравнении с сейсмограммой однократных продольных волн, полученной в ПО Tesserai (справа). Красной стрелкой показана обменная отраженная волна

тата и сделать вывод о том, можно ли использовать для реальной среды аппроксимацию в виде акустической модели или свертки с целью дальнейшего атрибутного анализа.

В процессе обработки сейсмограмм, полученных в результате полноволнового и акустического моделирования, был сделан мьютинг, скоростной анализ (рис. 4), суммирование сейсмотрасс и получение одиночной суммопротрассы.

Можно увидеть существенные отличия полученных времененных разрезов друг от друга, что объясняется наличием или отсутствием волн того или иного типа на них.

Динамический анализ синтетических сейсмограмм. Динамический анализ сейсмических записей стал неотъемлемой частью процессов обработки и интерпретации [Ампилов, 2008]. Это связано с тем, что стандартная обработка ограничивается лишь решением кинематических задач — построением структурного плана сейсмических границ,

привязанных к некоторым стратиграфическим поверхностям. Динамический анализ и последующая динамическая интерпретация способны дополнить сведения о геологическом разрезе информацией о литологии, пористости, флюидонасыщенности пластов и их мощности, даже если последняя меньше разрешающей способности сейсморазведки [Ампилов, Батурина, 2012].

Определение мощности продуктивных отложений имеет принципиальную важность для оценки запасов нефтяных и газовых месторождений. Однако из-за ограниченной вертикальной разрешающей способности сейсморазведочных данных оценка толщин маломощных отложений является в классическом понимании практически нерешаемой задачей. Для ее эмпирического решения могут быть в благоприятных сейсмогеологических условиях использованы некоторые сейсмические атрибуты, которые чувствительны к изменению мощности пластов. Они особенно полезны в районах с низкой

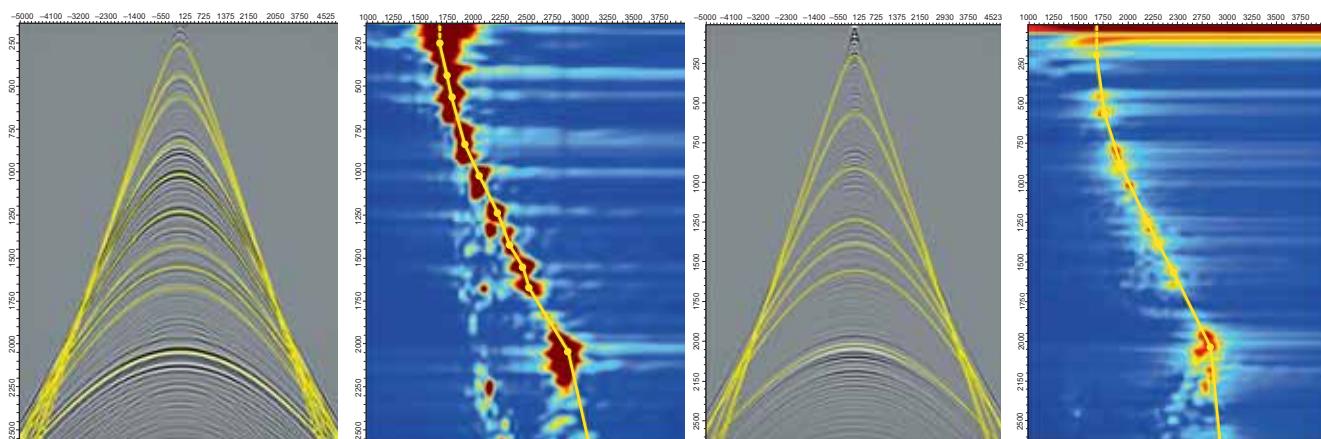


Рис. 4. Сейсмограммы и спектры скоростей для полноволнового случая (слева) и для акустического случая (справа)



Рис. 5. Разрезы, полученные по свертке (а), акустическому моделированию (б) и полноволновому моделированию (в) для модели среды из опорной скважины.

плотностью скважин, где традиционные методы могут не дать достаточной информации для надежных геологических выводов.

Целью данного методического исследования являлась попытка дать прогноз толщин коры выветривания доюрского комплекса на площади 3D сейморазведки, основываясь на атрибутном анализе сейсмической записи с использованием полноволнового моделирования для поиска наиболее информативных атрибутов.

Суть атрибутного анализа синтетических суммопротяжек на первом этапе сводится к следующему:

1) получают набор синтетических суммопротяжек всеми тремя методами (рис. 5) при вариации толщины коры выветривания ДЮК от 5 до 50 м;

2) вычисляется множество сейсмических атрибутов для интервала регистрации отражений, находится линейная зависимость величины мощности коры выветривания от каждого из атрибутов. Выбираются атрибуты, которые имеют наиболее высокий коэф-

фициент корреляции с параметром мощности коры выветривания (КВ).

По полученным временным разрезам были рассчитаны несколько сейсмических атрибутов в интервале регистрации отражений от КВ (более 2 с), один из которых Original amplitude (исходная амплитуда) изображен на рис. 6.

Интервал коры выветривания ДЮК, мощность которой по опорной скважине составляет 15 м, находится на времени 2080–2090 мс [Ахиярова, 2023].

Анализируя данные расчеты, можно сказать, что не наблюдается единобразия значений атрибутов для трех случаев: «свертки», акустического и полноволнового моделирования. И поскольку полноволновое моделирование наиболее адекватно по сравнению с остальными двумя методами описывает реальную среду, можно сделать вывод о невозможности применения первых двух для дальнейшего динамического анализа волнового поля. Ввиду этого для прогноза мощности КВ по значениям атрибутов

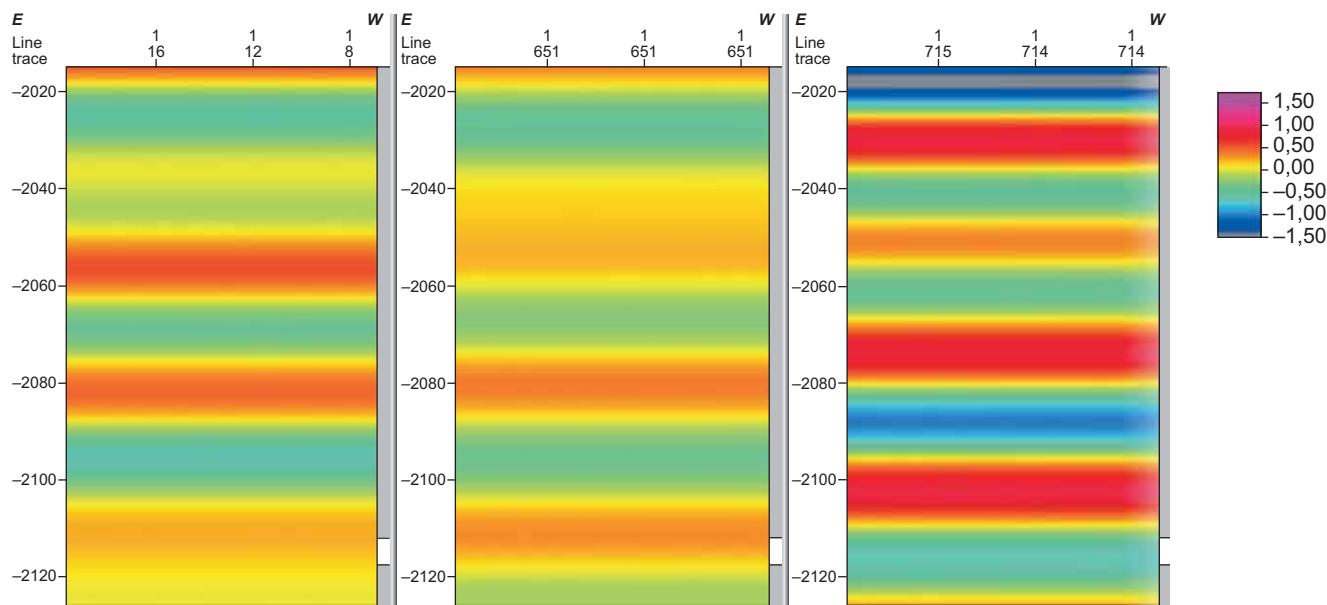


Рис. 6. Атрибут Original Amplitude на временах более 2 секунд (слева — модель «свертки», в центре — акустическое моделирование, справа — полноволновое моделирование)

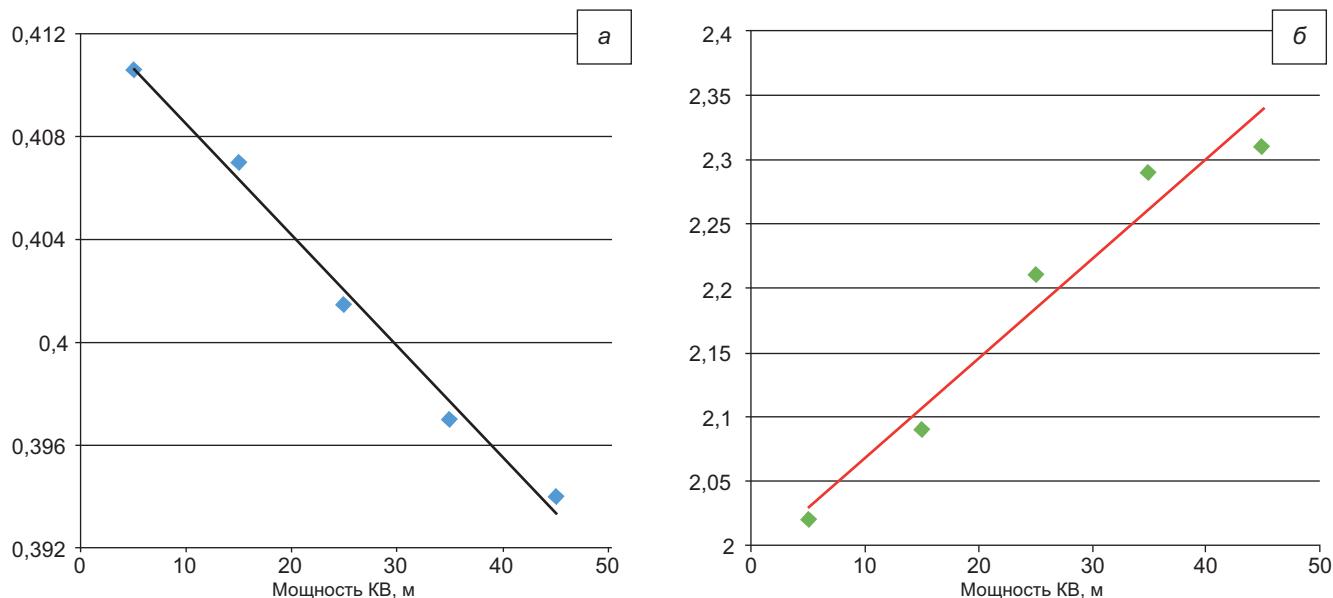


Рис. 7. Зависимость атрибута Envelope (а) и атрибута Instantaneous Bandwidth (б) от толщины KB в м по результатам моделирования

будем использовать только полноволновое моделирование.

Оценка толщины коры выветривания с учетом полноволнового моделирования. Выше был сделан вывод о некорректности методов «свертки» и лучевого моделирования для задач динамического анализа. Поэтому для прогноза мощности коры выветривания меньше, чем разрешающая способность сейсморазведки, использовалось исключительно полноволновое моделирование.

В пределах исследуемого района вертикальная разрешающая способность сейсморазведки применительно к KB оценивается примерно в 60 м. То есть, при значениях мощности KB меньше 60 м, от кровли и подошвы формируется единое отражение, называемое в зарубежной литературе тюнинг-эффектом.

Для изучения зависимости значений атрибутов от мощности KB было выполнено полноволновое моделирования для пяти ее мощностей: 5, 15, 25, 35 и 45 м. Затем были посчитаны наиболее употребительные атрибуты в этом регионе от кровли KB в окнах 15, 25 и 40 мс: Envelope, Instantaneous Bandwidth, Instantaneous Frequency, Amplitude, RMS Amplitude.

Среди перечисленных атрибутов информативных оказалось только 2: Envelope (огибающая) в окне 40 мс (рис. 7, а) и Instantaneous Bandwidth (мгновенная ширина спектра) в окне 15 мс (рис. 7, б). На графиках этих атрибутов можно наблюдать близкую к линейной зависимость значения атрибута от мощности KB. В дальнейшем использовались только эти два атрибута, поскольку остальные не показывают значимой связи с изменением толщины KB.

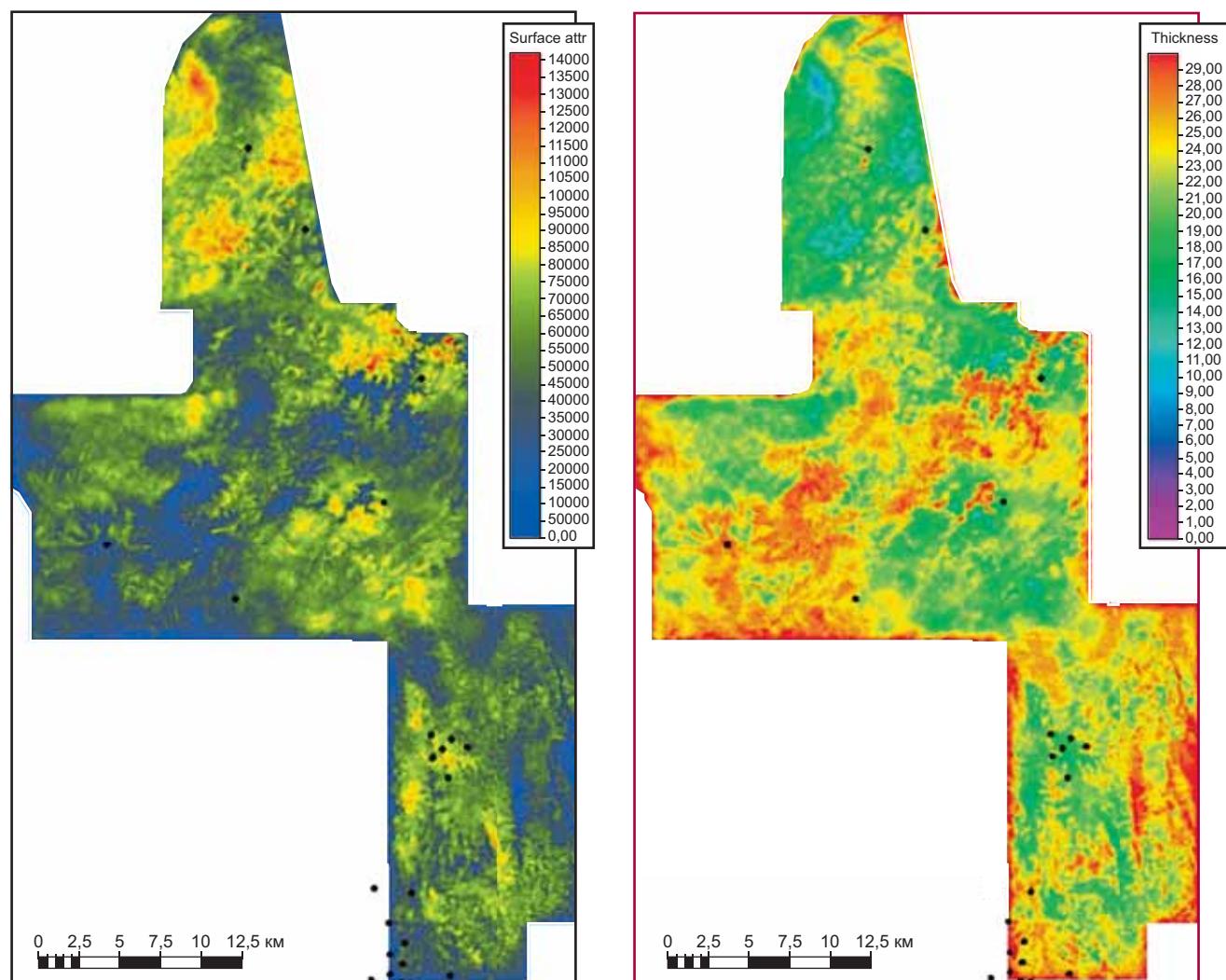


Рис. 8. Атрибут Envelope в окне 40 мс (слева) и карта мощности коры выветривания (в м) на исследуемом участке, полученная по нему с использованием зависимости на рис. 7 (справа). Точками показано положение скважин

Для атрибута Envelope в окне 40 мс наиболее близкой аппроксимирующей линейной зависимостью оказалась следующая:

$$h(x) = -2338,6x + 965,96,$$

где h — значение мощности коры выветривания, x — значение атрибута. Квадрат коэффициента корреляции практически равен единице $R^2 = 0,9911$, что действительно говорит о возможности такой аппроксимации.

Для атрибута Instantaneous Bandwidth в окне 15 мс также хорошо подходит линейная зависимость:

$$h(x) = 122,5x - 242,48,$$

где h — значение мощности коры выветривания, x — значение атрибута, $R^2 = 0,9568$.

Далее была рассчитана карта первого атрибута в указанном интервале вдоль отражающего горизонта, связанного с КВ. По найденной выше корреляционной зависимости она была пересчитана в карту мощностей коры выветривания (рис. 8) на исследуемом участке. Предварительно потребова-

лось произвести нормировку карты атрибута, чтобы она по средним значениям совпадала со значением атрибута Envelope на синтетических сейсмограммах. В целом, прогнозная картина качественно совпадает с трендом значений толщины коры выветривания по пробуренным скважинам, однако среднеквадратическое отклонение прогнозных значений от измеренных в скважинах составляет 8,2 м, что не так и мало при интервале изменения данной величины от 0 до 58 м по всем скважинам. Причина в том, что исходный атрибут Envelope, который принят основным по результатам моделирования, характеризуется весьма контрастными изменениями на площасти исследований, и его линейная аппроксимация не вполне этому соответствует.

Проводимые далее исследования с помощью нейросетевых алгоритмов, свободных от линейных ограничений, показывают более адекватные результаты, но этому посвящена отдельная статья [Ампилов и др., 2025].

Традиционно для решения подобных задач в сейсморазведке используются различные методы

инверсии [Ампилов и др., 2008, 2009; Яковлев и др., 2011], однако в данном случае приемлемый результат получен на основе простых атрибутов, но впервые с предварительным их подбором на основе полноволнового моделирования.

Заключение. В процессе достижения поставленной в работе цели решены следующие прикладные задачи:

- детально исследованы сейсмические эффекты от изменения коллекторских свойств пород доюрского комплекса Западной Сибири различными методами моделирования;

- установлено, что наиболее объективные результаты дают методы полноволнового моделирования на основе МСЭ;

- предложена и опробована методология оценки толщины коры выветривания в кровле ДЮК на основе

в моделирования интерференционного волнового поля от ее кровли и подошвы;

- построена прогнозная карта толщины коры выветривания в межскважинном пространстве на площади, покрытой данными 3D сейсморазведки.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках бюджетной темы «Разработка теории и технологии комплексных геофизических исследований приповерхностной части разреза естественных и техногенных сред» (номер ЦИТИС: АААА-А16-116033010107-1), а также при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00110) в части разработки математической модели и проведения численного моделирования в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аки К., Ричардс П. Количествоенная сейсмология: Теория и методы. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 520 с., ил.

Ампилов Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. М.: ООО «Центральное издательство геофизической литературы» — «Спектр», 2008. 384 с.

Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М., Недра, 1992, 140 с.

Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. и др. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16.

Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Левин В.А. и др. Полноволновое моделирование в сейсморазведке на основе цифровой геологической модели с использованием метода спектральных элементов // Геология и геофизика, издательство СО РАН, 2024. DOI: 10.15372/GiG2024115

Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 42–65; DOI: 10.21455/si2018.4-4

Ампилов Ю.П., Облогина Т.И. Метод определения поглощения по рефрактированным волнам // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. № 10. С. 31–41.

Ампилов Ю.П., Сафуанова К.Р., Штейн Я.И. Сопоставление методов количественного атрибутного анализа для прогноза толщин коллекторов по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025.

Ахиярова Е.Р. Методика динамического анализа сейсмических данных для изучения строения доюрского комплекса Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири: Автореф. дисс. ... канд. техн. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023.

Левин В.А., Вершинин А.В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ Т. 2 // Нелинейная вычисли-

тельная механика прочности. Цикл монографий в 5 томах под ред. В.А. Левина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 544 с.

Лисица В.В., Чеверда В.А. Комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей для учета сложного строения верхней части разреза при численном моделировании сейсмических полей // Технологии сейсморазведки. 2014. № 4. С. 60–67.

Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.

Ampilov Yu.P From Seismic Interpretation to Modelling and Assessment of Oil and Gas Fields // EAGE Publ. 2010. P. 1–274, doi: 10.3997/9789073781825

Ampilov Yu.P, Baturin D.G. Latest Marine Geophysical Technologies for Comprehensive Study of Natural Hydrocarbon Reservoirs and Monitoring of Production // Society of Petroleum Engineers — SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. 2012. P. 2056–2063.

Ampilov Yu.P, Vershinin A.V., Levin V.A., et al. Full-Waveform Seismic Modeling Based on Digital Geological Model Using Spectral Element Method: Applications to Seismic Exploration // Russian Geology and Geophysics, 2024, ELSEVIER SCIENCE BV, DOI: 10.2113/RGG20244728

Vershin A. Poroelastoplastic modeling of a borehole stability under small and finite strains using isoparametric spectral element method. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00161-022-01117-4>

Vershin A., Charara M. Modeling of acoustic logging in poroelastic media using spectral element method. AIP Conference Proceedings, (2310): 020347, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0034443>

Статья поступила в редакцию 21.08.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 28.02.2025

УЧРЕДИТЕЛИ

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
геологический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Н. ЕРЕМИН — главный редактор, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Р.Р. ГАБДУЛЛИН — ответственный секретарь, доктор геолого-минералогических наук, доцент
И.М. АРТЕМЬЕВА — профессор Университета Копенгагена, Дания
А.Б. БЕЛОНОЖКО — профессор Университета Стокгольма, Швеция
А.В. БОБРОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.В. БОРИСОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. БРУШКОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.А. БУЛЫЧЕВ — доктор физико-математических наук, профессор
Р.В. ВЕСЕЛОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.Л. ВЛАДОВ — доктор физико-математических наук, профессор
Е.А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Т.В. ГЕРЯ — профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
Д.Г. КОЩУГ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. КУВШИНОВ — доктор физико-математических наук, профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
А.В. ЛОПАТИН — доктор биологических наук, профессор
А.М. НИКИШИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.Р. ОГАНОВ — профессор Университета Стони-Брук, США
ПЕНДА ЧЖАО — академик Китайской академии наук, почетный академик Московского университета,
профессор Китайского университета наук о Земле
А.Л. ПЕРЧУК — доктор геолого-минералогических наук
С.П. ПОЗДНЯКОВ — доктор геолого-минералогических наук
Д.Ю. ПУЩАРОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН
Ю.В. РОСТОВЦЕВА — доктор геолого-минералогических наук, профессор
В.И. СТАРОСТИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. СТУПАКОВА — доктор геолого-минералогических наук, доцент
СЭНЖЕНГ ЛИ — профессор Университета океанологии Китая
В.Т. ТРОФИМОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Д.Р. ФОГЛЕР — профессор Даремского университета
И.В. ШПУРОВ — доктор технических наук

Адрес редакции:

e-mail: vmu_red@mail.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.

Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 25.03.2025. Формат 60 × 90^{1/8}.

Бумага офсетная. Гарнитура Minion Pro.

Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж экз.

Изд. № 13010. Заказ

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, 11)

Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupublishing.ru

ISSN 0201-7385
ISSN 0579-9406

ИНДЕКС 70995 (каталог «Роспечать»)
ИНДЕКС 34114 (каталог «Пресса России»)
