

## Научная, профессиональная, учебная и педагогическая практика

УДК 553.982: 546.027

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.4.165>

### Рb-изотопная систематика битумов, керогенов и нефтей: от изохронных и дискретных источников до протяженных трендов глобальных компонентов

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Т.А. Ясныгина<sup>1</sup>, И.С. Чувашова<sup>1</sup>,  
К.В. Колотилина<sup>2</sup>, А.А. Куроленко<sup>2</sup>, Т.В. Носкова<sup>2</sup>,  
В.О. Тукалова<sup>2</sup>, А.П. Опенышев<sup>2</sup>, С.М. Хромова<sup>2</sup>, Д.И. Парфенов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

**Аннотация.** Приводится обзор Рb-изотопных данных по битумам, керогенам и нефтям. На диаграммах изотопов Рb различаются изохронные семейства, дискретные кластеры и непрерывные протяженные тренды фигуративных точек. Приводятся аргументы, свидетельствующие в пользу изотопной гомогенизации Рb с выходом на изохронные Рb-Рb датировки в гидротермальных условиях при отделении свинца от урана в рудные минералы одновременно с обогащением ураном битумов. По семействам фигуративных точек нефтей и керогена на диаграммах изотопов Рb выявляется дискретность компонентов источников, не претерпевших общую изотопную гомогенизацию Рb в условиях катагенеза. Определяются непрерывные протяженные тренды изотопов Рb, которые интерпретируются в терминах глобальной эволюции мантии и коры Земли. Для нефтей Европы и сопредельных морских акваторий определяется смешение Рb-изотопных компонентов. На примере углеводородов Северного моря устанавливается протяженный тренд смешения изотопов Рb докембрийских пород фундамента и юрских черных сланцев, которые дают общий европейский компонент нефтей (СЕОС) с высоким  $\mu$  ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) – NIMU и существенно отличающийся от общего мантийного резервуара (CMR) внутриплитных вулканических пород Европы с сопредельной Африкой и Аравией. В отличие от такого соотношения компонентов, протяженные тренды нефтей поля Ляохе Северо-Востока Китая сопоставляются с трендами компонентов ELMU и LOMU кайнозойских вулканических пород Азии. Предполагается образование битумов, керогенов и нефтей этого поля под воздействием глубинных мантийных флюидных потоков. Обзор выполнен в рамках интерактивной подготовки статьи с магистрантами геологического факультета ИГУ.

**Ключевые слова:** битум, кероген, нефть,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

### Pb-isotope Systematics of Bitumens, Kerogens, and Oils: from Isochronous and Discrete Sources to Extended Trends of Global Components

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, T.A. Yasnygina<sup>1</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1</sup>, K.V. Kolotilina<sup>2</sup>, A.A. Kurolenko<sup>2</sup>, T.V. Noskova<sup>2</sup>, V.O. Tkalova<sup>2</sup>, A.P. Openyshev<sup>2</sup>, S.M. Khromova<sup>2</sup>, D.I. Parfenov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The paper presents a review of Pb isotope data on bitumens, kerogens, and oils. The diagrams of Pb isotopes distinguish isochron families, discrete clusters, and continuous extended trends of

data points. Arguments are given in favor of Pb isotopic homogenization with the output of isochron Pb–Pb dating under hydrothermal conditions during lead separation from uranium into ore minerals simultaneously with the enrichment of bitumen with uranium. From families of data points of oils and kerogen, the Pb isotope diagrams reveal discreteness of source components that have not undergone general Pb isotopic homogenization under catagenesis conditions. Continuous, extended trends in Pb isotopes are identified and interpreted in terms of the global evolution of the Earth's mantle and crust. For oils from Europe and adjacent marine areas, Pb-isotope mixture of components is determined. In North Sea, mixing between Precambrian basement rocks and Jurassic black shales is traced that demonstrates a common European oil component (CEOC) that has a high  $\mu$  ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) – HIMU and significantly different from the common mantle reservoir (CMR) of intraplate volcanic rocks from Europe with adjacent Africa and Arabia. In contrast to this relationship between components, extended trends of oils from the Liaohe field of Northeast China are similar to those of the ELMU and LOMU mantle components of the Cenozoic volcanic rocks from Asia. It is suggested that bitumen, kerogens, and oils of this field are generated by deep mantle fluid flows. The review was done in frame of the interactive preparation of a paper with master's students of the Geological Faculty of Irkutsk State University.

**Keywords:** bitumen, kerogen, oil,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

### Вступление

Углеводороды распространены в Солнечной системе. Они присутствуют во флюидах мантии Земли (Зубков, 2009). По данным радарной съемки с орбиты и межпланетной миссии "Кассини-Гюйгенс" на Титане (спутнике Сатурна) обнаружено значительно больше углеводородов, чем на планете Земля, на которой с углеводородами связана эволюция живой материи (Ксанфомалити, 2005). Нефти образуются в результате преобразования углеводородов, присутствующих в материнских породах и, предположительно, мигрирующих на значительные расстояния с концентрированием в коллекторах.

Для определения генезиса нефтей часто применяются методы органической геохимии и стабильных изотопов C, S и O, в то время как по неорганическим компонентам нефтей работы крайне ограничены. В аналитических данных о концентрациях металлов в нефтях имеются существенные расхождения при слабой воспроизводимости результатов разными методами анализа (Ventura et al., 2015). Большие диапазоны содержаний металлов в нефтях могут быть следствием преимущественного растворения металлов в воде и несмесимости воды и углеводородов при низкой температуре (Maczyski et al., 2004).

В учебниках и монографиях по применению радиогенных изотопов в геологии (Фоп, 1989; Geyh, Schleicher, 1990; Dickin,

2005; Allègre, 2008; White, 2015) отсутствуют специальные разделы по использованию радиогенных изотопов в исследованиях нефтей. Нет такого раздела и в учебном пособии по радиоизотопным методам хронологии геологических процессов (Рассказов, Чувашова, 2012). Это – прямое следствие неопределенностей, существующих в интерпретации геологических процессов, обуславливающих распределение изотопов в нефтях.

Для датирования геологических процессов по радиогенным изотомам обычно требуется определение концентраций элементов. Например, для того чтобы рассчитать возраст с использованием изотопных отношений  $^{187}\text{Rb}/^{188}\text{Os}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  требуется знать, соответственно, концентрации Os, Sr и Nd. Поскольку поведение элементов в нефтях непредсказуемо, корректность результатов для этих изотопных систем сомнительна. Так, для нефтей Западно-Канадского осадочного бассейна приведены кажущиеся Re–Os изохроны, соответствующие возрастному интервалу 111–121 млн лет (Selby et al., 2005). Этот пример вошел в учебник (White, 2015), но возрастная интерпретация Re–Os изотопных данных пока не подтверждена другими методами датирования. Скептическое отношение к изохронам Re–Os изотопной системы возрастает в связи с экспериментально выявленными изменениями компонентов при

смешении нефтей и воды (Mahdaoui et al., 2015; DiMarzio et al., 2018; Hurtig et al., 2019).

С учетом существующих ограничений в информативности изотопов и элементов нефтей, настоящая работа концентрируется на обзоре Pb-изотопных данных, которые имеют важное преимущество в получении однозначных геохронометрических выводов и поэтому дают надежную систематику углеводородов с выходом на генетические построения. Цель статьи – обозначить возможности применения изотопов Pb для систематики битумов, керогенов и нефтей.

### **Общие замечания о подходах к интерпретации изотопов Pb**

Основное предназначение изотопов в геологии – получение информации о возрасте геологических процессов. Изотопные отношения  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  отражают радиоактивный распад урана. Изотопное отношение  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$  в природе практически постоянно. При расчете возраста в U–Pb изотопной системе по уравнениям радиоактивного распада из отношений  $^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  изотопы урана исключаются путем алгебраических преобразований и остаются только изотопные отношения свинца (Doe, 1970; Фор, 1989). Для расчета возраста геологических процессов без определения концентраций U и Pb применяется диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Благодаря этому преимуществу ураногенных изотопных отношений свинца датируются осадочные, магматические и метаморфические процессы Земли.

Изотопы свинца керогенов, битумов и сырых нефтей месторождений предоставляют собой чувствительную к возрасту генетическую информацию, играющую ключевую роль для решения вопросов, связанных с их образованием. Кероген – органическое вещество, служащее в качестве исходного материала для образования нефти, – может изначально иметь различное происхождение и изотопный состав Pb. Для керогена осадочных отложений в континентальном бассейне можно

ожидать широкий диапазон изотопов Pb за счет неоднородности накапливающегося материала. С погружением ложа бассейна на стадии катагенеза органическое вещество осадка преобразуется в битум, нефть или газ. Битум может образоваться в результате гидротермальной деятельности. В зависимости от U–Pb отношений, в битумах, керогенах и нефтях накапливаются радиогенные изотопы Pb.

При изохронном датировании геологических процессов обычно возникает главный вопрос – выражается ли датируемый процесс гомогенизацией изотопной системы настолько, чтобы новообразованные продукты этого процесса приобрели однородный изотопный состав, который должен служить для последующей изохронной (замкнутой) эволюции изотопной системы. В случае, если кероген разных образцов имеет одинаковый начальный изотопный состав Pb, на диаграмме изотопных отношений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  фигуративные точки образцов битумов и/или нефтей выстраиваются в линию, которая характеризуется как изохрона. Линейность точек может быть нарушена наложенными процессами. Материал из разных источников может смешиваться. Для материала керогенов необходимо дополнительное тестирование изохронности точек U/Pb-изотопной системы.

С одной стороны, залежи углеводородов могут находиться в осадочных толщах карбонатов, которые датируются с использованием U–Pb-изотопной системы. Процедура выбора образцов для датирования предполагает использование геохимических параметров, по которым определяются компоненты карбонатов, образовавшихся в виде первичного хемогенного и/или органического осадка из воды континентального или морского водоема в ограниченном временном интервале. Образцы для изотопного анализа отбираются из наименее метаморфизованных разновидностей пород, без кальцитовых прожилков и признаков ожелезнения и выветривания. Определяются содержание Ca, Mg, Mn, Fe и Sr в карбонатной фракции и

изотопный состав Sr и С. С другой стороны, вмещающие породы залежей углеводородов могут иметь силикатный состав (песчаники или даже трещиноватые граниты, как, например, в месторождении Белый Тигр во Вьетнаме). В U–Pb-изотопной системе можно ожидать соответствия возраста керогена и нефти возрасту карбонатов и существенного расхождения датировок керогена и нефти с оценками возраста силикатных пород, поскольку эти вмещающие породы будут содержать Pb-изотопный компонент источника обломочного материала или трещиноватых гранитов.

Если линейное распределение фигуративных точек нефтей на диаграммах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  интерпретируется как результат смешения материала из разновозрастных источников, непосредственная возрастная информация из семейств точек не получается, но извлекается информация о компонентах, участвующих в смешении. Возможны различные варианты соотношений смешивающихся компонентов. Компоненты могут различаться, если разновозрастные нефти в источниках имеют различные значения  $\mu$  (т.е. отношения  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ). Компонент смеси с более радиогенным составом Pb может иметь более молодой возраст, чем ее компонент с менее радиогенным составом Pb. Наконец, отношение  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  компонента на радиогенном конце тренда может возрастать, что свидетельствует об его относительном удревнении. Иными словами, чем круче линия, аппроксимирующая точки трендов компонентов, тем древнее возраст компонента на радиогенном конце тренда.

Протяженные тренды нефтей, по аналогии с трендами вулканических пород океанов и континентов, могут рассматриваться в терминах глобальных конечных компонентов Земли, обозначенных для источников вулканических пород океанов с разным  $\mu$ : HIMU (high  $\mu$ , высокое  $\mu$ ), ELMU (elevated  $\mu$ , повышенное  $\mu$ ) и LOMU (low  $\mu$ , низкое  $\mu$ ). Конечный компонент HIMU выделен в океанических базальтах как состав с высоким отношением

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (21–22) (Zindler, Hart, 1986). Образование этого компонента связывалось с процессами секвестирования Pb с сульфидами из мантии в ядро Земли около 2 млрд лет назад (Hart, Gaetani, 2006). Этот компонент может служить показателем глубинного поступления плюмового материала, пространственно связанного с Южно-Тихоокеанской и Африканской глобальными аномалиями низких скоростей нижней мантии (на границе ядро–мантия) (Jackson et al., 2018). Первая из них получила название SOPITA (South Pacific Thermal Isotopic Anomaly) (Staudigel et al., 1991), вторая, по аналогии с первой, – название AFITA (African Thermal Isotopic Anomaly) (Чувашова и др., 2022). Африканская аномалия протягивается с юга Африки до Европы. В Европе с сопредельной Африкой и Аравией компонент HIMU имеет Pb-изотопные отношения компонента Общего Мантийного Резервуара (CMR:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.95\text{--}19.85$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.55\text{--}15.65$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.80\text{--}39.60$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.78\text{--}0.84$ ;  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 1.99\text{--}2.05$  (Lustrino, Wilson, 2007). Для вулканических пород позднего фанерозоя Азии компонент HIMU не характерен. По Pb-изотопным трендам вулканических пород территорий Азии различались компоненты ELMU и LOMU, происхождение которых связывается с глобальной аномалией высоких скоростей нижней мантии ASITA (Rasskazov et al., 2020; Чувашова и др., 2022).

Обозначался также состав Валовой Силикатной Земли (Bulk Silicate Earth) с низким отношением  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (17.6–18.2) при повышенном отношении  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (15.55–15.70) (Zindler, Hart, 1986). Особый состав изотопов Pb определялся для примитивной мантии Северного Китая:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.37$ ;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.34$  (Zhu et al., 2001).

### **Совершенствование методик определения изотопов Pb**

Основные трудности при анализе нефтей и битумов как на микроэлементы,



так и на радиогенные изотопы связаны со сравнительно низкими содержаниями металлов в большинстве типов нефтей, недостатком и дороговизной стандартных образцов, особенностями, а иногда и уникальностью, общего состава (матрицы) анализируемого материала.

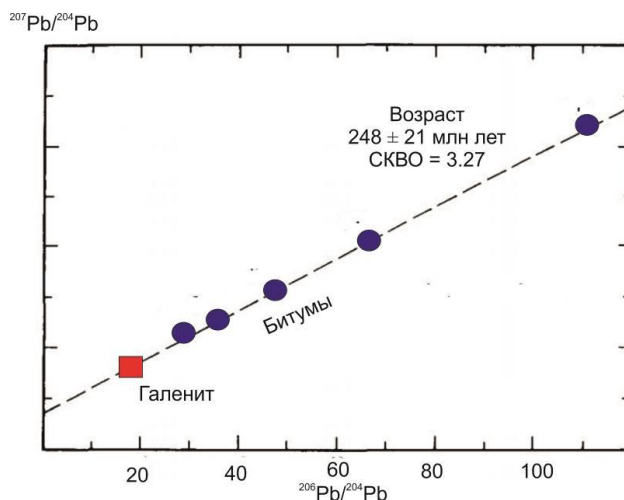
В 1990–2000-х гг. для определения изотопного состава Pb в нефтях использовались, в основном, мультиколлекторные масс-спектрометры с термальной ионизацией (Готтих и др., 2000; 2005; Zhu et al., 2001; Hurst, 2002; Selby et al., 2007). В настоящее время изотопный состав Pb определяется на мультиколлекторных спектрометрах с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS), имеющих лучшее разрешение, чем сканирующие. Инструментальная погрешность измерений снизилась на 1–2 порядка (Dreyfus et al., 2007; Ortega et al., 2012; Fetter et al., 2019).

#### **$^{207}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}$ изохроны битумов**

Pb–Pb отношения измерялись в битумах для определения времени миграции углеводородов в залежь медной руды (Parnell, Swainbank, 1990). Использовалось пять образцов битумов из месторождения Тай Гвин (Северный Уэльс,

Великобритания). Полученная датировка  $248 \pm 21$  млн лет обозначила время ранне-триасового осаднения урана, совпавшего с затвердеванием битума. Предполагалось, что в раннем триасе углеводороды мигрировали вверх из глубоко залегающих сланцев каменноугольного периода в прибрежной зоне Ирландского моря. По истории осадконакопления в 5 км севернее месторождения Тай Гвин, в газовом месторождении Моркамб, реконструировано начало генерации углеводородов в поздне-триасовое-раннеюрское время, что согласуется с датировкой, полученной для образцов битума.

Отношение  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в образцах битумов из месторождения Тай Гвин менялось в широком диапазоне – от 31 до 112. Такой интервал отношений отражает обогащение битумов ураном. Кроме Pb–Pb отношений битумов, получено отношение  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для галенита (около 20). Оно находится в диапазоне значений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  мантийных вулканических пород. Попадание фигуративной точки на изохронную линию точек битумов свидетельствует о когенетичности галенита и битумов. Галенит сохранил начальный изотопный состав Pb, отторженного во время Pb-изотопной гомогенизации битумов, сопровождавшейся обогащением ураном.



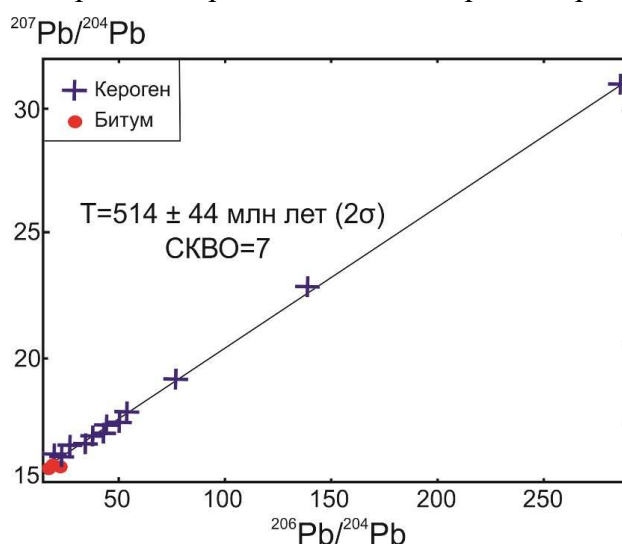
**Рис. 1.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для пяти образцов битума из месторождения Тай Гвин (TG) и галенита из Халкына (Parnell, Swainbank, 1990). Возраст определен по наклону линии наименьших квадратов для образцов битума. Хорошее соответствие данных прямой линии (малое среднеквадратичное взвешенное отклонение (СКВО) = 3.27) свидетельствует о надежности датировки.

**Fig. 1.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  isotope ratios for five bitumen samples from Ty Gwyn (TG) and galena from Halkyn (Parnell, Swainbank, 1990). The age determined from slope of line of least squares fit from bitumen samples. The good fit of the data to a straight

line (low mean square weighted deviation (MSWD) = 3.27) suggests that the dating is reliable.

На диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для керогена из кембрийских отложений Гуйчжоу (Юго-Восточный Китай) получена Pb эррохрона  $514 \pm 44$  млн лет (Zhu et al., 2001). Так же как для битумов месторождения Тай Гвин, образцы керогена

Гуйчжоу дают большой диапазон изотопных отношений Pb. Несмотря на некоторую дисперсию точек (СКВО = 7), достигнуто соответствие полученной датировки с геологическим (кембрийским) определением возраста керогенов и битумов.



**Рис. 2.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для керогена из кембрийских отложений и битумов нефтяного поля, район Гуйджоу, Китай (Zhu et al., 2001).

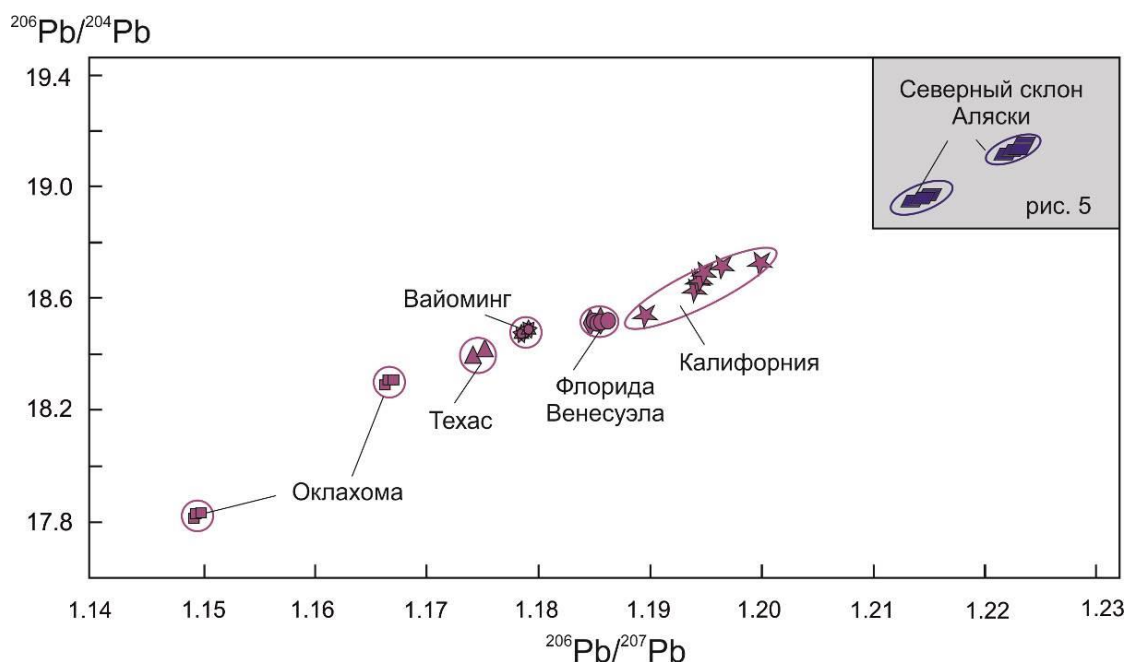
**Fig. 2.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for kerogen from Cambrian sediments and bitumen of oil field, Guizhou area, China (Zhu et al., 2001).

### Дискретные Pb-изотопные составы нефтей и битумов

Изотопные отношения  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в сырых нефтях и битумах в общем систематически возрастают с уменьшением геологического возраста в соответствии с моделью роста свинца в земной коре. Эволюция изотопов свинца в сырых нефтях и битумах следует той же систематике, что и его эволюция в породах земной коры. Радиогенный свинец накапливается посредством распада радиоактивного урана с возрастанием Pb-изотопных отношений.

На рис. 3 приведена подборка дискретных групп точек нефтей Северной и Южной

Америк (Hurst, 2002). В дискретной изотопной систематике Pb представляет интерес сравнительный анализ изотопных отношений Pb в керогене и нефтях. В работе Р. Хюрста представлены результаты изотопного анализа Pb 27 образцов сырых нефтей и 12 образцов керогена. Им подчеркивается специфика отбора образцов; в исследование не вовлекались образцы из областей со сложной геологической историей (например, из областей метаморфизма и деградации нефтей). Для аргументации тесной генетической связи керогена и сырой нефти привлечены данные органической геохимии, сходство которых служило показателем того, что сырая нефть является производной керогена.



**Рис. 3.** Диаграмма  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  дискретного распределения фигуративных точек для сырых нефтей Северной и Южной Америки. Построена на основе диаграмм из работы (Hurst, 2002) с изменениями. В правом верхнем углу затушеван прямоугольник кластеров нефтей Северного склона Аляски.

**Fig. 3.** Diagram  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  of discrete distribution of data points for crude oils of North and South America. Compiled on the basis of diagrams from (Hurst, 2002) with modifications. In the upper right corner, the rectangle of Alaska North Slope oil clusters is shaded.

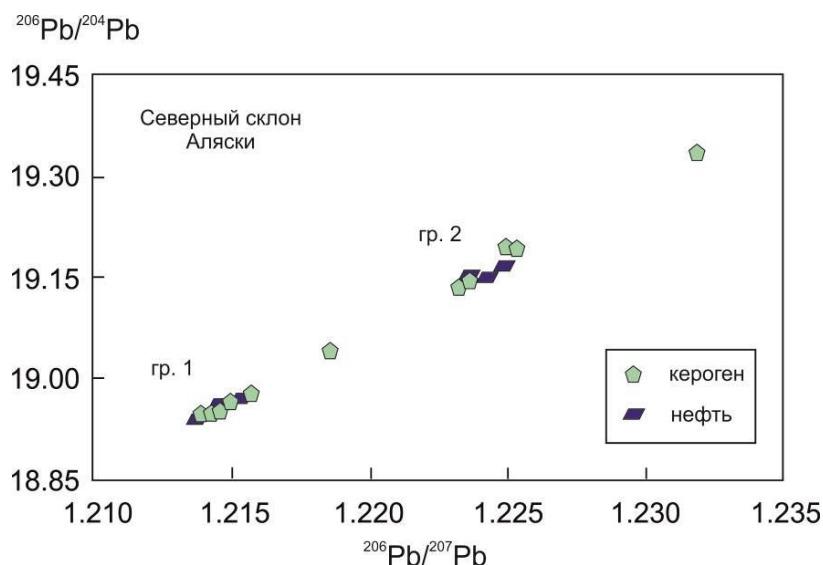


**Рис. 4.** Террейн Северного склона Аляски (Thomas et al., 2009). На карте показан регион Арктической Аляски к северу от хребта Брукса, простирающийся от канадской границы на востоке до Чукотского моря на западе. Этот регион включает в себя Национальный заповедник дикой природы Аляски (ANWR), Центральную Арктику (территория между реками Колвилл и Каннинг), Национальный нефтяной резерв Аляски (NPR), Внешний континентальный шельф моря Бофорта (OCS) и Чукотское море (OCS). Нефтяные месторождения показаны светло-зеленым цветом, а газовые – розовым.

**Fig. 4.** Террейн Северного склона Аляски (Thomas et al., 2009). На карте показан регион Арктической Аляски к северу от хребта Брукса, простирающийся от канадской границы на востоке до Чукотского моря на западе. Этот регион включает в себя Национальный заповедник дикой природы Аляски (ANWR), Центральную Арктику

(территория между реками Колвилл и Каннинг), Национальный нефтяной резерв Аляски (NPR), Внешний континентальный шельф моря Бофорта (OCS) и Чукотское море (OCS). Нефтяные месторождения показаны светло-зеленым цветом, а газовые – розовым.

В месторождениях бассейнов Северного склона Аляски определены общие интервалы изотопных отношений Pb керогена и нефтей (рис. 4, 5). Углеводородное сырье этой территории представляет значительный экономический интерес. Добыча нефти и сжиженного природного газа началась здесь в 1977 году и увеличилась до 2.2 млн баррелей в день к 1988 году, что составляло 25 % от внутреннего производства США (Thomas et al., 2009).



**Рис. 5.** Диаграмма изотопов свинца для керогена и сырой нефти Северного склона Аляски с дискретными группами фигуративных точек. По работе (Hurst, 2002) с упрощениями. Автором предполагалось, что изотопные отношения свинца соответствуют меловому возрасту нефтематеринских осадочных толщ – промежуточному между раннеюрской и среднеэоценовой эпохами рудообразования, определенными для рудного Pb территории (Alldrick et al, 1993). Однако, точки свинца для керогена и сырой нефти месторождений Северного склона Аляски сдвинуты относительно серии дискретных точек сырых нефтей Северной и Южной Америк в правую часть диаграммы рис. 3.

**Fig. 5.** Lead isotope diagram for kerogen and crude oil from the Alaska North Slope with discrete groups of data points. Simplified after (Hurst, 2002). The author assumed that the lead isotope ratios correspond to the Cretaceous age of the oil source sedimentary strata – intermediate between the Early Jurassic and Middle Eocene ore formation epochs determined for the Pb ore territory (Alldrick et al, 1993). However, the lead points for kerogen and crude oils from the Alaska North Slope basin fields are shifted relative to the series of discrete points for crude oils from North and South America to the right part of the diagram of Fig. 3.

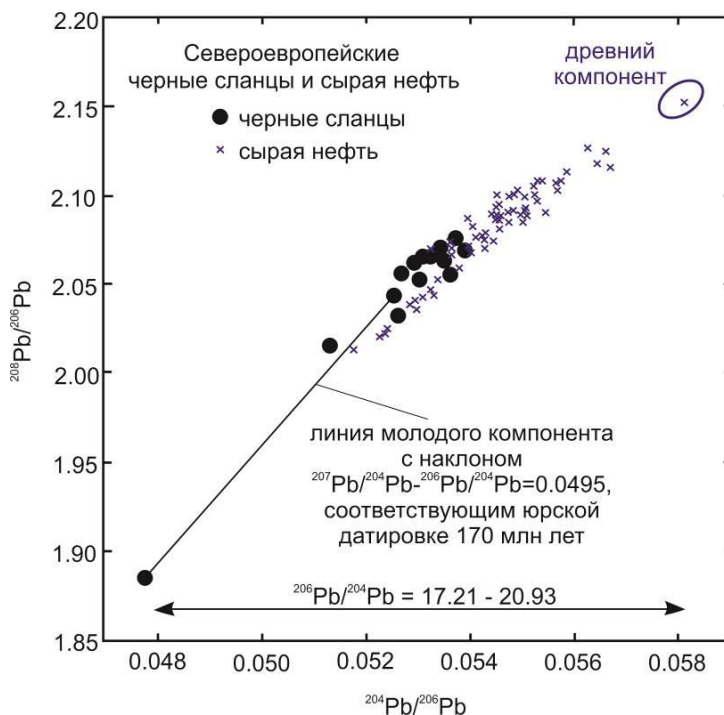


### **Pb-изотопные тренды и компоненты битумов, керогенов и нефтей**

*Европа и сопредельные акватории Северного и Баренцева морей*

На диаграмме рис. 6 приведены данные по черным сланцам и нефтям Северной Европы. Абсцисса ( $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) обозначает модельный  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст, в то время как

пересечение аппроксимирующей прямой с ординатой ( $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) дает оценку значения отношения Th/U. Изотопы Pb большинства черных сланцев лежат на продолжении тренда сырой нефти, на его радиогенном (молодом) конце. Материнские породы для сырой нефти имеют юрский возраст. Pb нефтей имеет менее радиогенный (древний) компонент, привнесенный подземными водами из докембрийских пород фундамента.

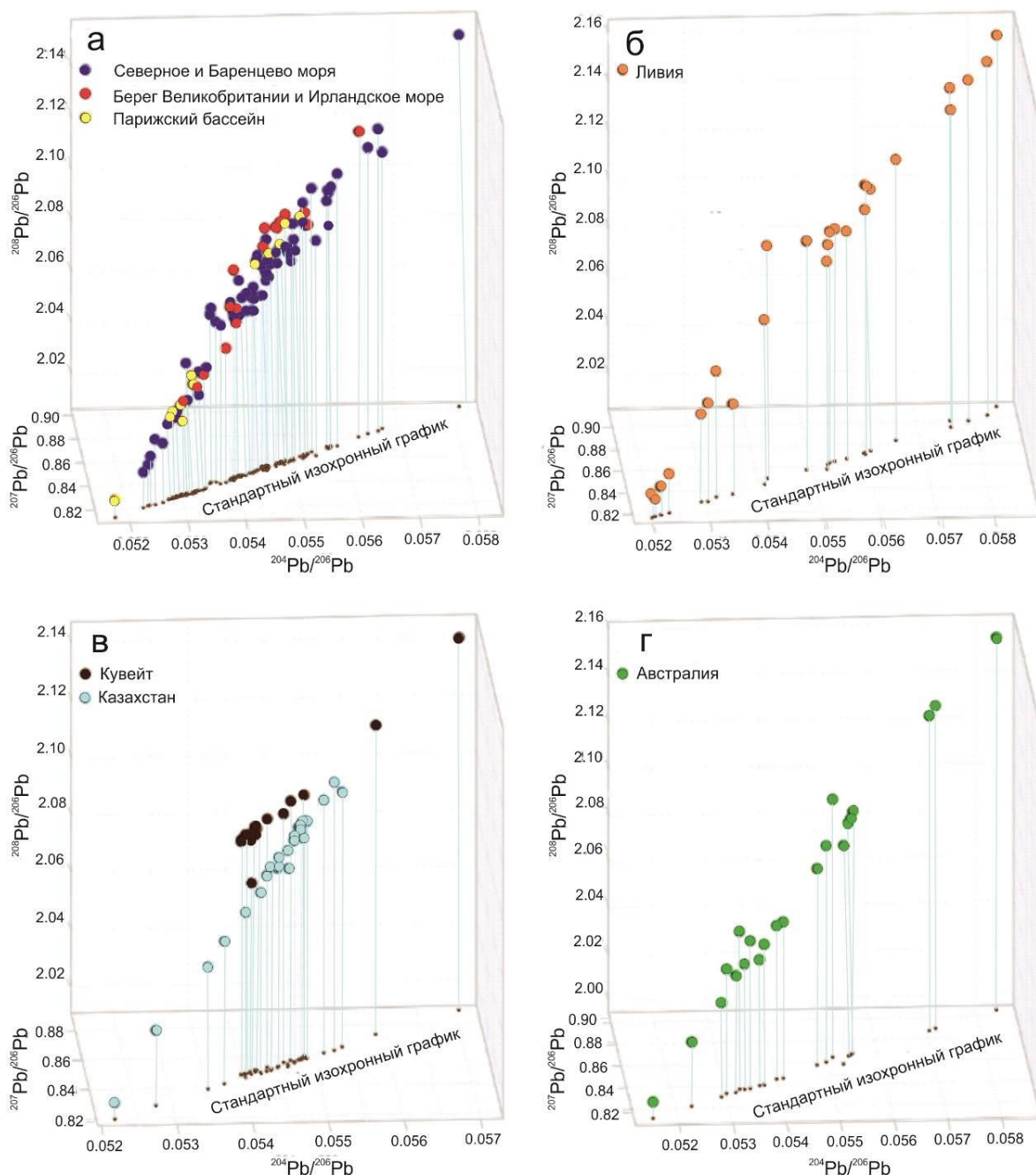


**Рис. 6.** Диаграмма  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  –  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  для черных сланцев Северной Европы и сырой нефти Северного моря (Fetter et al., 2019).

**Fig. 6.** Diagram  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  vs  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  for Northern European black shales and North Sea crude oils. Modified after (Fetter et al., 2019).

Н. Феттер и др. пришли к выводу о том, что протяженный тренд изотопов Pb (рис. 7а) нефтей Северного моря в основном образовался за счет материала юрских черных сланцев. Однако изотопы Pb этих нефтей явились результатом смешения конечных компонентов от кайнозойских до протерозойских и, таким образом, свинец в сырой нефти по большей части оказался чуждым его нефтематеринским породам. Такие же тренды наблюдались авторами в сырых нефтях

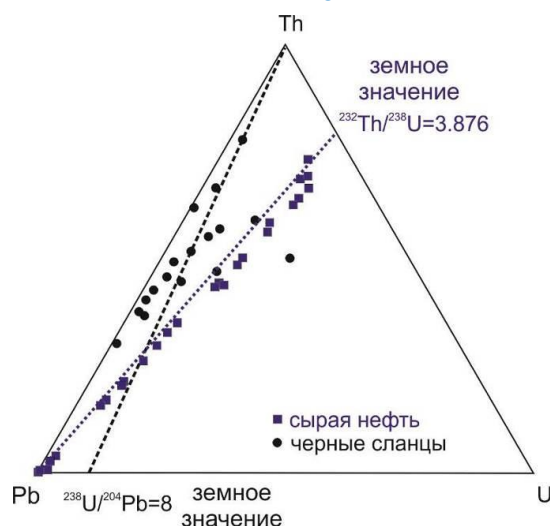
Парижского бассейна, Баренцева моря, Ливии, Кувейта, Казахстана и Австралии (рис. 7б–г). Интересно, что фигуративные точки нефтей Северного моря и Австралии на тройной диаграмме Pb–U–Th распределяются вдоль земных значений отношения  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 3.876$ , а фигуративные точки керогенов отклоняются к земным значениям отношения  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} = 8$  (рис. 8). В нефтях других регионов Мира подобных закономерностей не наблюдается.



**Рис. 7.** Изотопный состав Pb 192 образцов нефти из месторождений Северной Европы (панель а), Ливии (панель б), Среднего Востока (панель в) и Австралии (панель г) (Fetter et al., 2019). Ось абсцисс ( $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) гомологична модельному возрасту, рассчитанному по отношениям  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (Albarède et al., 2012). Проекция на нижнюю панель представляет собой изохронный график  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ , а проекция на заднюю панель представляет собой диаграмму  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Этот трехмерный график показывает, что изотопный состав Pb источника нефти определяется смесью по крайней мере трех конечных компонентов, имеющих разный возраст, а также значения отношений U/Pb и Th/U.

**Fig. 7.** Three-dimensional representation of Pb isotope compositions for 192 crude oil samples from Northern Europe (top left-hand panel A), Libya (top right-hand panel B), the Middle East (bottom left-hand panel C), and Australia (bottom right-hand panel D) (Fetter et al., 2019). The x-axis ( $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) is homologous to the model age calculated from the  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios (Albarède et al., 2012). The projection onto the bottom panel represents the  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  isochron plot, while the projection onto the back panel represents  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . This 3-dimensional plot shows that Pb from the oil source is accounted for by a mixture of at least three end-members with different ages, U/Pb, and Th/U values.



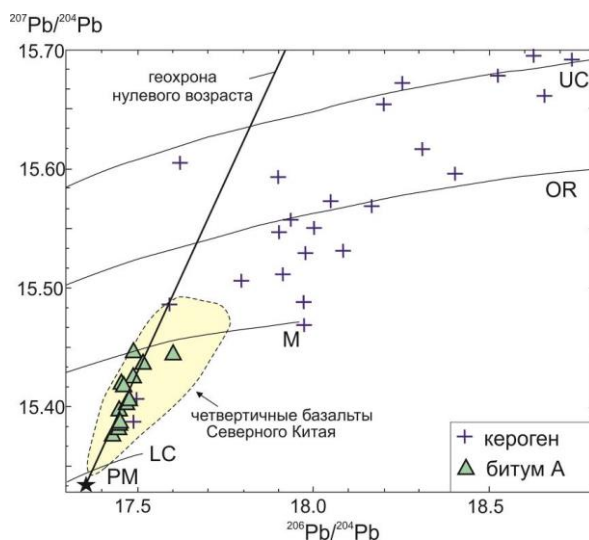
**Рис. 8.** Тройная диаграмма Pb–U–Th для 17 черных сланцев и 36 нефтей Северного моря и Австралии (Fetter et al., 2019). На диаграмме показаны линии земных значений U/Pb отношения ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}/70 = \mu/70$ ) и Th/U отношения ( $\omega = ^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ).

**Fig. 8.** Ternary diagram in Pb–U–Th space showing the U/Pb ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}/70 = \mu/70$ ) and Th/U ( $\omega = ^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ) values calculated for 17 black shales and 36 crude oils (Fetter et al., 2019). The dark blue dotted line and black dashed one indicate the terrestrial values of these ratios.

### Кумай

Протяженные Pb-изотопные тренды дают керогены и нефти Китая. В месторождениях Ляохэ, Тарим и Гуйчжоу выявляются заметные различия в изотопах Pb между битумом и керогеном из одних и тех же слоев. Предполагается, что нефть образовалась в породах с керогеном в результате активности флюидов глубинных (мантийных) источников. Отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в них составляют, соответственно, 17.25–18.78, 15.37–15.62 и 37.3–38.3. На диаграмме

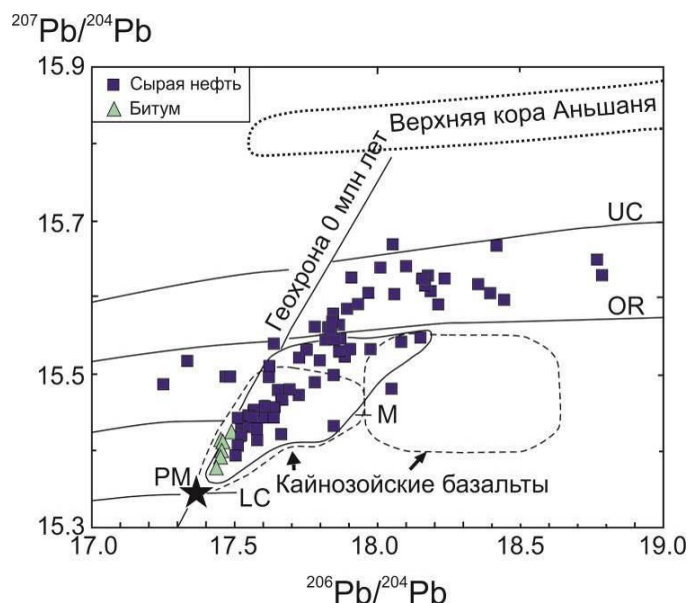
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  китайские геологи (Zhu et al., 2001) интерпретируют поле фигуративных точек керогенов как тренд рассеивания от примитивного состава мантии Китая до области составов верхней коры в плюмбо-тектонической модели (Zartman, Doe, 1981). Фигуративные точки растворимого органического вещества (битумов-А) соответствуют фигуративному полю четвертичных базальтов Северного Китая. На этом основании китайские геологи утверждают, что свинец в битуме А поступил из мантии недавно (рис. 9).



**Рис. 9.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  сопоставления растворимого органического вещества (битума А) и керогенов из одних и тех же слоев в нефтяном месторождении Ляохэ с четвертичными базальтами Северного Китая (Zhu et al., 2001). PM – примитивная мантия

Северо-Китайского блока. Линии плюмботектонической модели (Zartman, Doe, 1981): UC – верхняя кора, OR – орогенный пояс, M – мантия, LC – нижняя кора.

**Fig. 9.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for comparison of soluble organic matter (bitumen A) and kerogen from the same strata in the Liaohe oil field with Quaternary basalts from Northern China (Zhu et al., 2001). PM – primitive mantle of the North China block. Lines of the plumbotectonic model (Zartman, Doe, 1981): UC – upper crust, OR – orogenic belt, M – mantle, LC – lower crust.



**Рис. 10.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  для сырой нефти и битумов А нефтяного поля Ляохе с кайнозойскими базальтами территории (Zhu et al., 2001). PM – примитивная мантия Северо-Китайского блока. Линии плюмботектонической модели (Zartman, Doe, 1981): UC – верхняя кора, OR – орогенный пояс, M – мантия, LC – нижняя кора.

**Fig. 10.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for crude oil and bitumen A from the Liaohe oil field with Cenozoic basalts of the territory (Zhu et al., 2001). PM – primitive mantle of the North China block. Lines of the plumbotectonic model (Zartman, Doe, 1981): UC – upper crust, OR – orogenic belt, M – mantle, LC – lower crust.

Интервалы изотопных отношений Sr и Pb для керогена и растворимого органического вещества (битума А) поля Ляохе существенно различаются между собой; изотопный состав Pb керогена варьирует сильнее, что объясняется влиянием мантийного флюида (рис. 10). Предполагается, что кероген и битумы формировались в обстановке рифтовой впадины на окраине кратона или в зоне субдукции (Zhang et al., 1999).

### Обсуждение

В настоящий обзор включены случаи изотопных характеристик Pb 1) изохронных семейств битумов, 2) дискретных кластеров керогена и нефтей и 3) протяженных трендов битумов, керогенов и нефтей Европейского типа и 4) протяженных трендов битумов, керогенов и нефтей Восточно-Азиатского типа.

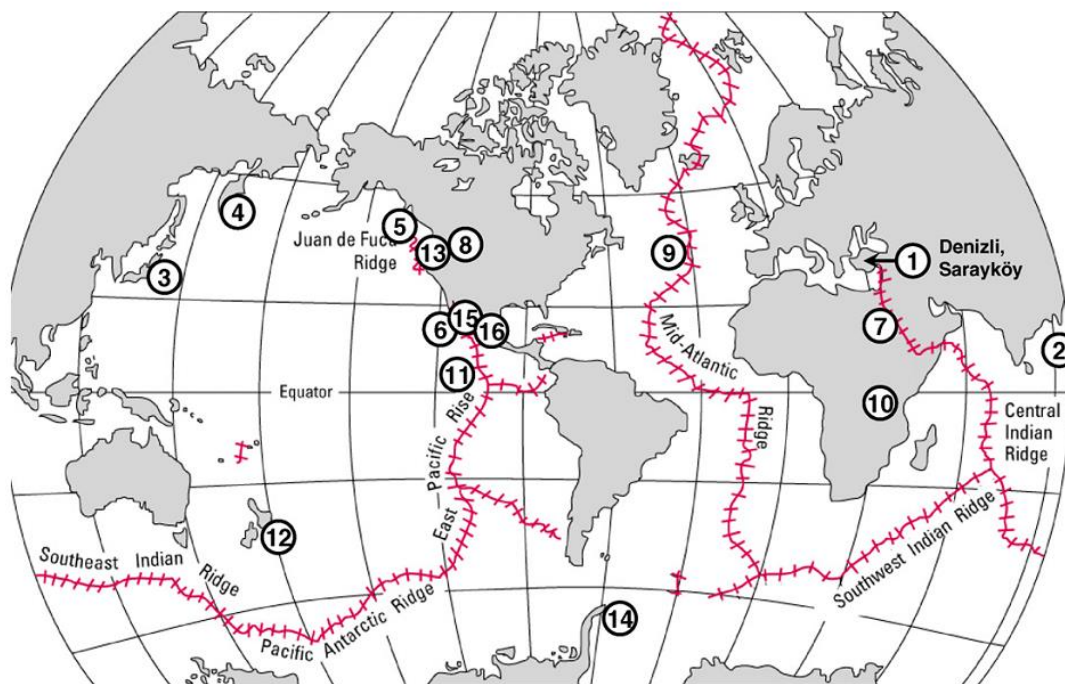
### Когенетические сульфиды, битумы и нефти: Pb–Pb изохроны и линии смешения

При построении изохрон на диаграммах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  начальное отношение изотопов Pb обычно не определяется. Такая возможность предоставляется, однако, в случае одновременной кристаллизации битумов и сульфидов. В литературе имеется пока единственный пример использования изотопов Pb для датирования сингенетических битумов и сульфидов гидротермальной системы (см. рис. 1). Этот пример свидетельствует о перспективности использования данных по изотомам Pb, отторженного от урана в галените, и изотопов Pb, соединенного с ураном в битумах, для получения надежного определения времени переноса углеводородов во флюидах гидротерм.



Органическое вещество участвует в процессе образования полиметаллических месторождений в карбонатных породах (Германов, 1965). Нефти, образующиеся на Земле в высокотемпературных условиях относятся к гидротермальному типу нефтей, которые отличаются от обычных нефтей, образующихся в условиях катагенеза при меньших температурах. Широко используется термин «гидротермальная нефть» (Simoneit, Lonsdale, 1982; Simoneit 1985; Kvenvolden, Simoneit, 1990; Bazhenova et al., 1998; Рокосова и др., 2001; Сорохтин и др., 2001; Gürgey et al., 2007;

Добрецов и др., 2015). Нефти и битумы неразстворимы в воде в обычных условиях, но растворимость существенно повышается при температурах 200 °С (нефть) и 330–350 °С (битумы) (Lewan, 1997; Баженова и др., 2012). Гидротермальные нефти имеют особые геохимические характеристики. Они содержат больше полициклических ароматических соединений, N-S-O соединений и незрелых биомаркеров. Известны многочисленные современные месторождения гидротермальных нефтей (рис. 11).



**Рис. 11.** Распространение современных гидротермальных нефтяных проявлений на Земле (Gürgey et al., 2007). (1) С – Денизли – Сарайкой, западнотурецкие грабеновые системы, (2) М – Андаманский задуговой бассейн, Индийский океан, (3) М – кальдера Варамико, Япония, (4) С – кальдера Узон, Россия, (5) М – Средняя долина, (6) М – Восточно-Тихоокеанское поднятие 21 с.ш., (7) М – впадина Кебрит, Красное море, (8) С – Йеллоустонский национальный парк, США, (9) М – Срединно-Атлантический хребет 26 с.ш., (10) С – озеро Танганьика, Восточно-Африканский разлом, (11) М – Восточно-Тихоокеанское поднятие 13 с.ш., (12) С – Вайотапу, Новая Зеландия, (13) М – впадина Эсканаба, (14) М – пролив Брансфилд, (15) М – котловина Гуаймас, Калифорнийский залив и (16) С – озеро Чапала, рифт Читала, Мексика. Большинство гидротермальных нефтяных проявлений расположено вдоль центров спрединга на дивергентных окраинах. С – континентальная обстановка. М – морская обстановка.

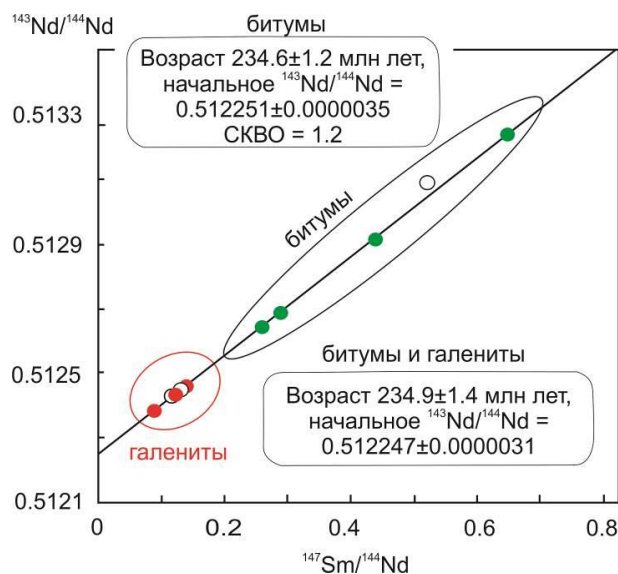
**Fig. 11.** Worldwide distribution of existing hydrothermal petroleum occurrences (Gürgey et al., 2007). (1) C – Denizli – Sarayköy, western Turkey graben systems (this study), (2) M – Andaman Backarc Basin, Indian Ocean, (3) M – Waramiko Caldera, Japan, (4) C – Uzon Caldera, Russia, (5) M – Middle Valley, (6) M – East Pacific Rise 21 N, (7) M – Kebrit Deep, Red Sea, (8) C – Yellowstone National Park, USA, (9) M – Mid Atlantic Ridge 26 N, (10) C – Lake Tanganyika, East African Rift, (11) M – East Pacific Rise 13 N, (12) C – Waiotapu, New Zealand, (13) M – Escanaba Trough, (14) M – Bransfield Strait, (15) M – Guaymas Basin, Gulf of California, and (16) C – Lake Chapala, Citala Rift, Mexico. Most of the hydrothermal petroleum manifestations are along the divergent margins spreading centers. C – continental setting. M – marine setting.



В фумаролах современных вулканов Японских и Курильских о-вов идентифицируется метан (Kiyosu, Asada, 1995; Шакиров, 2014). Вместе с метаном находятся этан, пропан и бутан. Углеводородные газы о. Кунашир относятся к газам термогенного и метаморфогенного типов. Термогенные газы считаются продуктом высокотемпературной переработки органического вещества захороненных осадков. Сейсмическая активность разломов обозначается не только аномалиями гелия и водорода, но и аномалиями метана (Syrbu et al., 2020; Холмогоров и др., 2022).

Соотношения проявлений битумов и гидротермальных нефтей и рудной минерализации должны оцениваться в терминах

изотопной систематики источников, но примеры работ такой направленности пока единичны. Интересен результат датирования битумов на Ag-Pb-Zn месторождении Эрдаокан в Северо-Восточном Китае Sm-Nd методом (Yuan et al., 2021). Четыре образца битумов дают возраст 234.6 млн лет при СКВО, близком к 1. Точки галенитов хорошо согласуются с этим возрастом (три из пяти). Такое согласование характеризует отторжение в галените не только Pb (от U), но и консервацию Nd (его отделение от Sm). Отношение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  на пересечении изохронной линии с ординатой (т.е. начальное для Sm-Nd изотопной системы) получается ниже этого изотопного отношения в галенитах (рис. 12).



**Рис. 12.** Диаграмма  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  для битумов и галенитов из месторождения Ag-Pb-Zn Эрдаокан, северо-восточный Китай. Диаграмма (Yuan et al., 2021) модифицирована.

**Fig. 12.** Diagram  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  for bitumens and galenas from the Erdaokan Ag-Pb-Zn deposit, NE China. The diagram is modified after (Yuan et al., 2021).

Имеется опыт Pb-изотопного датирования рудных минералов (аутигенных сульфидов) в сочетании с девонскими карбонатными отложениями кораллов Онтарио *Heliophyllum* (Smith, Farquhar, 1989). Восемь образцов кораллов этого вида вместе с аутигенным пиритом, отобранном из одного из образцов, дают линейный массив фигуративных точек на изохронной диаграмме  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} -$

$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ . На ней используется только радиоактивный переход  $^{238}\text{U}$  в  $^{206}\text{Pb}$ . Фигуративные точки кораллов образуют эррохрону (СКВО = 4.7) с оценкой возраста  $376 \pm 10$  млн лет ( $2\sigma$ ), согласующейся с их стратиграфическим положением около 375–385 млн лет. Pb, отторженный от U в пирите, обозначает начальное отношение  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  около 18.5 (рис. 13).

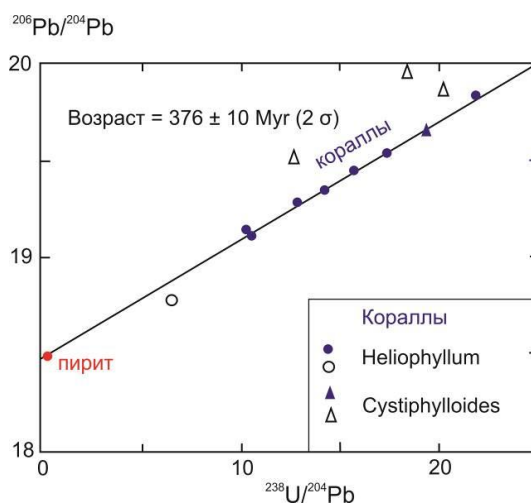


Рис. 13. Изохронная диаграмма U–Pb для девонских кораллов из юго-западного Онтарио, Канада. Открытые символы были исключены из регрессии. Из работы (Smith, Farquhar, 1989).

Fig. 13. U–Pb isochron diagram for Devonian corals from SW Ontario, Canada. Open symbols were omitted from the regression. After Smith and Farquhar (1989).

Показателен пример Pb-изотопного датирования метариолитов, вмещающих Cu–Zn сульфидные месторождения Норанда (Квебек, Канада). В данном случае сульфиды не ассоциируются с битумами или карбонатными породами. Начальные Pb-изотопные отношения ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) получены ниже значений Pb-изотопных отношений метариолитов для галенита из рудных месторождения (рис. 14). Предполагалось, что исходный изотопный состав Pb

соответствует значениям  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в области мантийных источников для пород зеленокаменного пояса Абитибиде. Pb–Pb датировки массивов (около 2692 млн лет) связывались с гомогенизацией изотопов Pb в породах примерно через 100 млн лет после их образования. Поздняя гомогенизация Pb могла быть следствием всепроникающей крупномасштабной циркуляции гидротермальных растворов через 50–150 млн лет после образования коры.

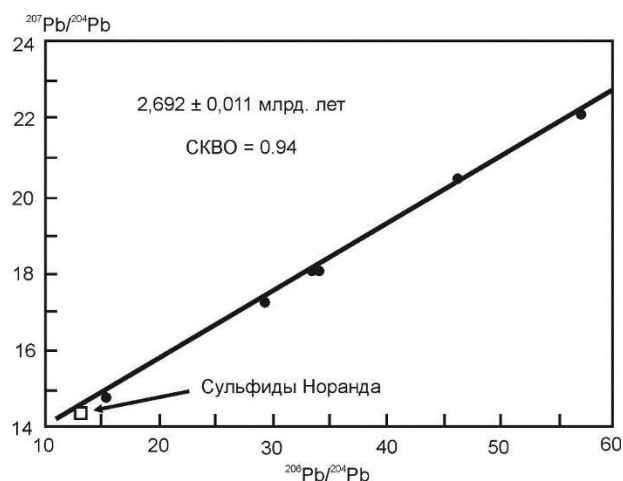


Рис. 14. Диаграмма Pb–Pb изохроны вулканических пород, вмещающих Cu–Zn сульфидное месторождение Норанда (Квебек). Из работы (Vervoort et al., 1993). Точка отторженного Pb дает начальное отношение сульфидов. Она слегка смещена ниже линии, аппроксимирующей совокупность точек метариолитов.

Fig. 14. Diagram of Pb–Pb isochron for volcanic rocks hosting the Noranda Cu–Zn sulfide deposit (Québec). From (Vervoort et al., 1993). The point of separated Pb yields the initial ratio of sulfides. It is slightly shifted below the line, approximating a family of the metarhyolite data points.

Нефти играют особую роль в образовании месторождений типа Миссисипи Вэлли, представляющих собой эпигенетические стратифицированные карбонатные сульфидные тела, составляющие примерно 25 процентов мировых запасов свинца и цинка. Они получили название по классическому району месторождений в бассейне р. Миссисипи, центральной части США. Цинк и свинец в карбонатных сульфидных телах находятся в сфалерите и галените (Paradis et al., 2007). Подобные Pb–Zn месторождения Кавказа связывались с вовлечением в рудообразование органического материала карбонатов (Германов, 1965).

Месторождения образуются из соленых бассейновых металлоносных флюидов в температурном диапазоне 75–200 °С. Крупные гидротермальные системы воздействуют на породы, содержащие рассеянную сырую (жидкую) нефть. Предполагается, что металлы месторождений этого типа в основном выщелачиваются из пород фундамента и их обломочных эрозионных продуктов и переносятся окисленными бассейновыми гидротермальными флюидами в виде хлоридных комплексов. Сульфиды осаждаются, когда бассейновые рассолы взаимодействуют с флюидами, обогащенными восстановленной серой, образовавшейся в основном за счет термохимического восстановления сульфата углеводородами (Saintilan et al., 2019).

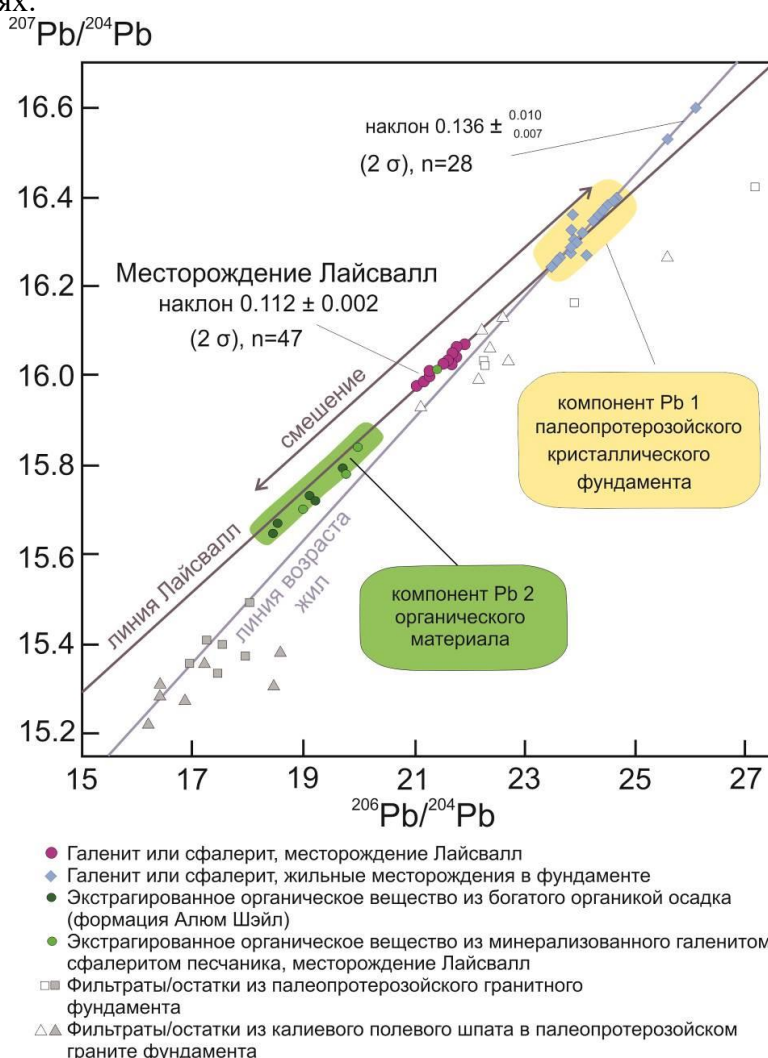
На основе данных органической геохимии и изотопов Pb обосновывается гипотеза о ключевой роли нефти и сопутствующей воды в формировании сульфидной минерализации в месторождении Лайсвалл (Скандинавский п-ов). В месторождение привносится не только восстановленная сера, но и значительное количество металлов. Свинец, первоначально содержащийся в битуме формации Алум Шейл, переносится жидкой нефтью и ассоциирующей водой к месту сульфидной минерализации в обстановке коллизии дуги и континента. Термохимическое восстановление сульфата нефтью способствует его осаждению в виде сульфида. Связанный с нефтью Pb составляет от 40 до 60 % бюджета металлов этого месторождения. Остальной Pb поступает из пород фундамента.

На диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 15) иллюстрируется различие наклонов линий, аппроксимирующих возраст жил (наклон 0.136, соответствующий возрасту 2.18 млрд лет) и смешение компонентов Pb1 палеопротерозойского кристаллического фундамента и Pb2 органического материала (наклон 0.112, не имеющий возрастного значения). Смешение сопровождалось концентрацией металлов с формированием месторождения Лайсвалл. Органический материал, экстрагированный из пород формации Алум Шейл (кероген) не может быть когенетичным галенитам и сфалеритам жильных образований в фундаменте, поскольку изотопы Pb характеризуются менее радиогенным составом, чем в этих сульфидах.

#### *Интерпретация Pb-изотопных кластеров*

Подборка дискретных групп точек нефтей, приведенная на рис. 3, обозначена в работе (Hurst, 2002) от Оклахомы до Калифорнии датировками от 427 до 5 млн лет по модели эволюции обыкновенного (отторженного от урана) свинца в земной коре (Stasey, Kramers, 1975). Модель, по мнению автора, дает оценку возраста нефтей. Однако, во-первых, эта модель может дать только приблизительную кажущуюся оценку отторжения Pb типа В (Barberton) на качественном уровне по упрощенной двухстадийной модели эволюции U–Pb-изотопной системы. В модели не учитываются вариации изотопов Pb, обусловленные процессами солидификации магматического океана ранней Земли. Наиболее значительная погрешность в оценке возраста получается для свинцов типа J (Joplin), точки которых смещаются правее метеоритной геохроны (Rasskazov et al., 2010). В модели (Stasey, Kramers, 1975) для таких точек получается возраст будущего (точки нефтей Северного склона Аляски на рис. 3). Во-вторых, нефти и битумы содержат уран, поэтому использование модели отторженных свинцов для оценки их возраста не корректно или, по крайней мере, требует дополнительного обоснования, которое убедило бы читателя в том, что Pb нефтей имеет отторженное происхождение при отсутствии радиогенной

составляющей, производной от урана, содержащегося в нефтях.

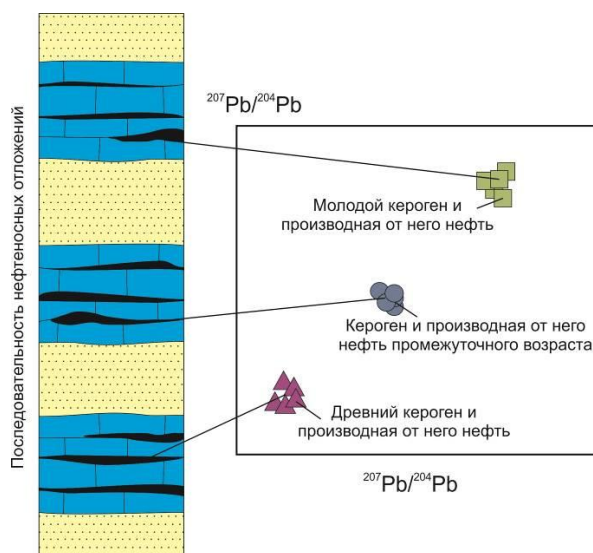


**Рис. 15.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (Saintilan et al., 2019). Изотопные составы: сульфидов Pb–Zn из месторождения Лайсвалл и кальцит–галенитовых жил в фундаменте (районы Сторуман и Окерландет); фракций фильтратов и остатков после выщелачивания из образцов гранитного фундамента района Лайсвалл и соответствующих им аликвот калиевого полевого шпата; экстрагированного органического вещества из сланцевых углеводородных материнских пород формации Алум Шейл и из двух горизонтов минерализованных песчаников в месторождении Лайсвалл.

**Fig. 15.**  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  plot (Saintilan et al., 2019). Isotopic compositions: Pb–Zn sulphides from the Laisvall deposit and in basement-hosted calcite-galena vein occurrences (Storuman and Åkerlandet districts); residue and leachate fractions from granite basement samples from the Laisvall area and their corresponding K-feldspar aliquots; extractable organic matter from shale hydrocarbon source rocks of the Alum Shale Formation and from the two mineralized sandstone horizons in the Laisvall deposit.

Обычно параметры материнской U–Pb изотопной системы исследователю не известны. Он вынужден пользоваться уравнением Холмса–Хаутерманса, чтобы получить приблизительное представление об относительной смене возраста в рамках условно принятых модельных параметров. Если источник углеводородов с течением времени не

менялся, в первом приближении получается последовательность Pb–Pb датировок, которая может служить для ориентировки в возрастных интервалах, разделяющих нефтеносные горизонты, дающие кластеры точек на диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 16).



**Рис. 16.** Схема образования кластеров фигуративных точек на диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  как результата поступления нефтей из слоев с разновозрастным керогеном при условии, если источник углеводородов с течением времени не менялся.

**Fig. 16.** Scheme of formation of data point clusters on diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  resulted from supply of oils from layers with kerogens of different ages, when hydrocarbon sources had not changed over time.

Для керогена и сырой нефти месторождений впадин Северного склона Аляски в работе (Hurst, 2002) был принят меловой возраст. В качестве независимой оценки возраста использовалась юрско-третичная эволюция рудного свинца (Alldrick et al., 1993), в которой по соотношению изотопов свинца галенита из разных месторождений региона было выявлено два основных события минерализации: раннеюрское и среднеэоценовое. Предполагалось, что обе металлогенические эпохи были короткими и проявились в региональном масштабе. Некоторые месторождения молодого эпизода минерализации были размещены рядом или наложены на более древние месторождения. По результатам полевых и лабораторных исследований для двух металлогенических эпох были определены разные ассоциации цветных и благородных металлов: для раннеюрской – золото-серебро-цинк-свинец-медная и для среднеэоценовой – серебро-свинец-цинковая.

На диаграмме  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  (см. рис. 5) для образцов керогена и сырой нефти определены два преобладающих кластера с приблизительно отношениями  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  1.215 и 1.225. Тот факт, что средние изотопные отношения свинца керогена по сравнению с сырой нефтью в пределах каждого кластера идентичны, свидетельствует о том, что изотопное равновесие свинца устанавливалось между керогенами и сырыми нефтями

во время катагенеза, то есть изотопное отношение свинца консервативно переносилось из керогена в сырую нефть. Р. Хюрстом предполагалось, что отношения  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  двух выделенных групп сырой нефти и керогена Северного склона Аляски соответствуют определению мелового периода по эволюции изотопов свинца земной коры, обозначенной в работе (Alldrick et al., 1993). Т.е. в керогене (и нефтях) система изотопов Pb не содержала U. Но в тексте статьи говорится о возрастании изотопных отношений Pb в керогене (и, следовательно, в производных от него сырых нефтях) в связи с относительным повышением содержания урана в керогене 1 до 21 мкг/г (концентрация Pb не приводится).

Очевидно, что речь не может идти об отторжении Pb. Радиогенный свинец накапливается в урансодержащей системе. Более высокая концентрация урана выражается с течением времени в более высоком (более радиогенном) изотопном отношении Pb. Концентрация урана в керогене увеличивается от 1–3 мкг/г в группе с наименее радиогенным Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  около 1.215, группа 1) до 5–9 мкг/г в группе с более радиогенным Pb ( $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  около 1.225, группа 2). Отдельная фигуративная точка керогена с наиболее радиогенным Pb, содержит больше всего урана (21 мкг/г). Статистически значимая корреляция ( $R^2 = 0.987$ ) между концентрацией урана

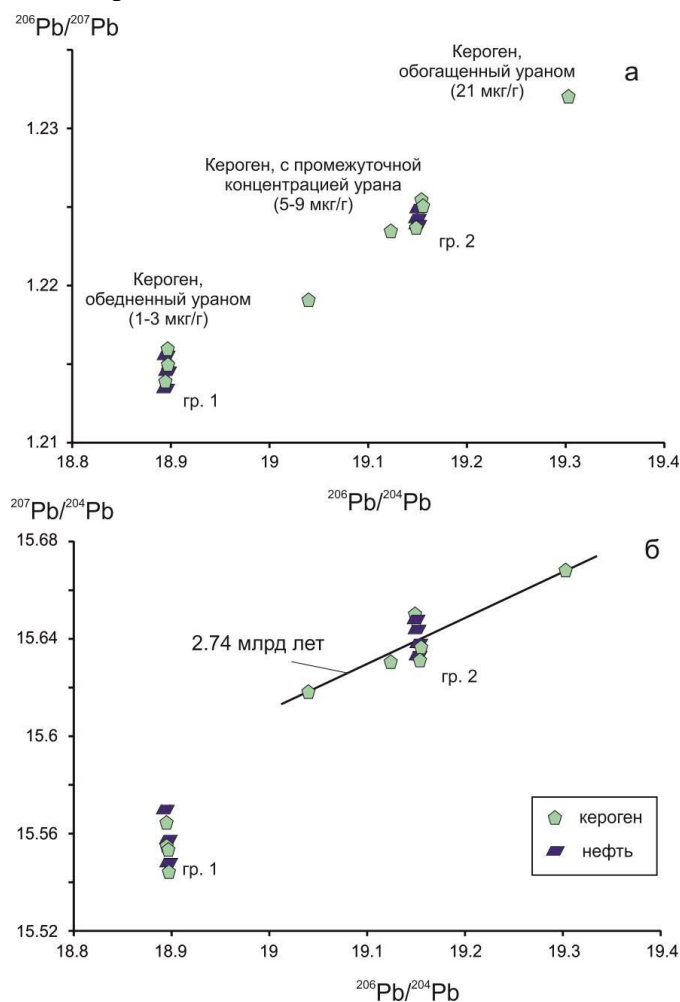


и отношением  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  в керогене свидетельствует о радиогенном происхождении свинца и его присутствии в структуре керогена. Эти данные интерпретируются как показатель того, что сырая нефть, полученная из исходных пород разного геологического возраста, имеет разные, чувствительные к возрасту, изотопные отношения свинца, которые можно использовать для корреляции сырой нефти с исходной породой и определения ее геологического возраста с применением моделей эволюции свинца в земной коре.

Диаграмма рис. 5 не содержит данных, опубликованных в работе (Alldrick et al, 1993). Эта работа оказалась недоступной, поэтому мы не имеем возможности дополнить недостающие данные, которые должны показать составы Pb галенитов в левом нижнем и правом верхнем углах диаграммы. Если генетическая Pb-изотопная общность керогенов и нефтей с рудным Pb действительно выстраивается в провинции Северного Склона

Аляски, можно ожидать распределение всех точек вдоль единой линии смешения. В этом случае неясно происхождение дискретности фигуративных точек.

Для удобства восприятия Pb-изотопных данных мы также перестроили диаграмму рис. 5 с взаимной заменой осей ординаты и абсциссы (рис. 17а). Для оценки возраста керогена и сырых нефтей месторождений впадин Северного склона Аляски в урансодержащей системе по изотопам Pb, для каждой фигуративной точки рис. 5 мы графически получили значения  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и построили диаграмму  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 17б). На этой диаграмме фигуративные точки нефтей гр. 2 вместе с точкой керогена, обогащенного ураном, располагаются вдоль линии, наклон которой соответствует датировке 2.74 млн лет, которая существенно превышает мезозойско-среднекайнозойские оценки возраста керогена и нефтей, принятые в работе (Hurst, 2002).



**Рис. 17.** Диаграммы  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (а) и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (б), перестроенные по диаграмме рис. 5. Линейность распределения точек на диаграмме панели а дополняется оценкой наклона линии точек гр. 2 вместе с керогеном, обогащенным U.

**Fig. 17.** Diagrams  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b), reconstructed from the diagram of Fig. 5. The linearity of point distribution on the diagram of panel a is supplemented by an estimate of the slope of the line of points of group 2 together with kerogen enriched in U.

Кероген гр. 2 содержит компонент, обогащенный ураном в архее. Смещение фигуративных точек Pb в правую часть диаграммы на рис. 3 свидетельствует о более высоком  $\mu$  (т.е.  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) керогена и нефтей Северного склона Аляски, по сравнению с керогеном и сырыми нефтями расположенных южнее месторождений Северной и Южной Америк. Свинец этой территории, возможно, был производным процессов, которые привели к генерации аномального рудного свинца типа J в разломе Тинтина, расположенном на сопредельной с Аляской территории Канады (Дое, 1970).

В работе Р. Хюрста подчеркивается факт соответствия изотопных отношений Pb в неэтилированном бензине, полученном разными производителями из сырья сырой нефти Северного склона Аляски в том же изотопном диапазоне. Подобный результат получен для неэтилированных бензинов и сырых нефтей Калифорнии. В обоих случаях данные указывают на то, что изотопные отношения свинца в сырой нефти передаются от керогена к сырой нефти во время катагенеза и от сырой нефти к бензину во время ее переработки.

#### *Интерпретация Pb-изотопных трендов Европейского типа*

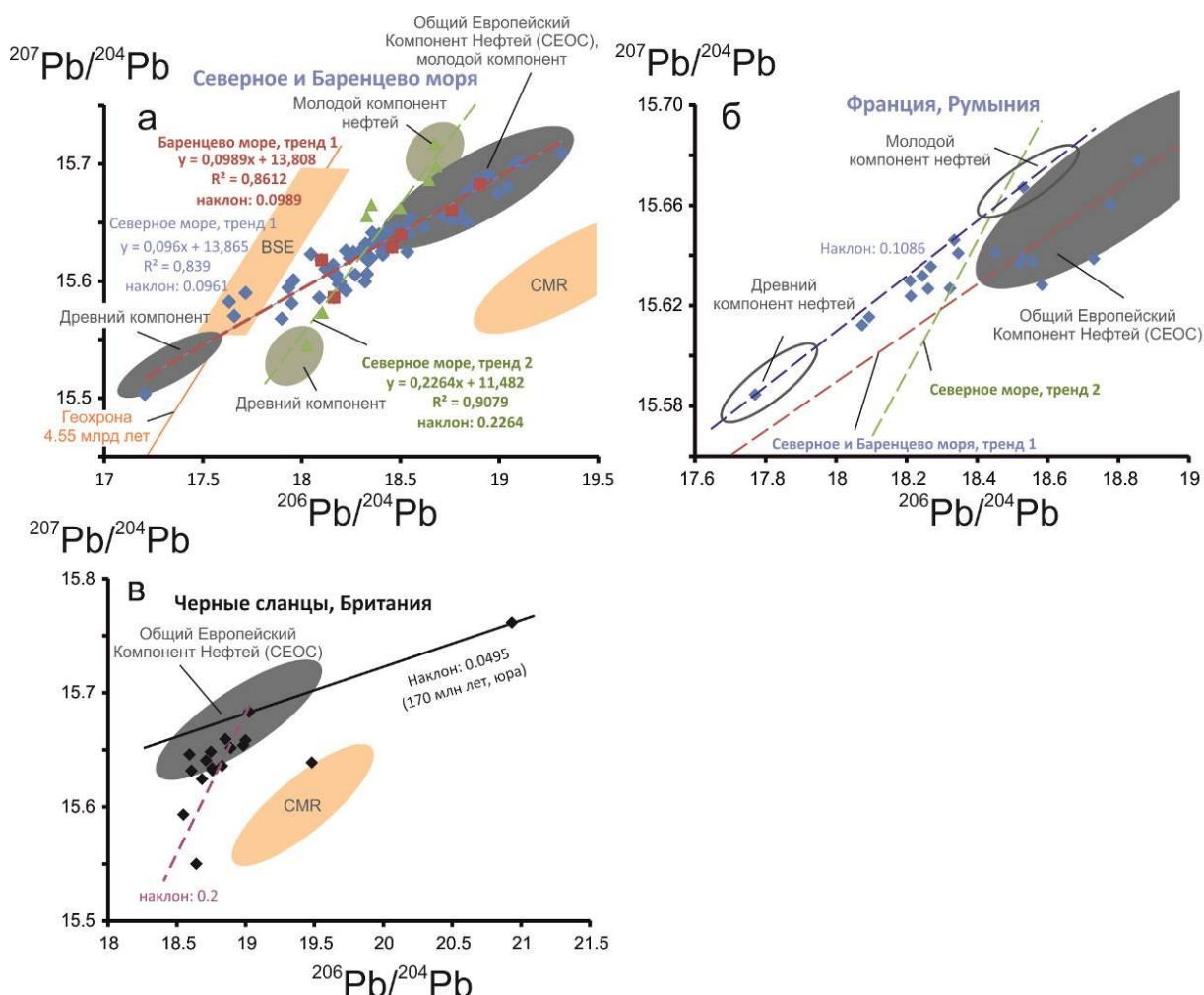
На диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 18а) основные тренды нефтей Баренцева и Северного морей образуют близкий наклон (соответственно, 0.0989 и 0.0961). Часть точек нефтей Северного моря выделяются в самостоятельный тренд, занимающий секующее положение относительно основного тренда. Эта совокупность нефтей характеризуется компонентами, отличающимися от компонентов нефтей основного тренда Баренцева и Северного морей.

Поскольку в качестве материнских пород нефтей Северного моря принимаются черные сланцы юрского возраста (Fetter et al., 2019), две фигуративные точки керогена,

расположенные на линии с наклоном 0.0495, соответствующим юрской датировке 170 млн лет, можно считать согласующимися с геологическим определением возраста черных сланцев. Одна из этих точек, имеющая более радиогенный состав Pb, отражает обогащение сланцев ураном, другая точка с менее радиогенным составом Pb попадает в центр поля общего европейского компонента нефтей (СЕОС – Common European Oil Component). Другие фигуративные точки черных сланцев Северного моря образуют тренд, протягивающийся с большим наклоном (0.2) в левую нижнюю часть диаграммы  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Pb изотопы материала черных сланцев могут характеризовать обломочный материал с древним Pb, модифицированным в юрское время.

Точки нефтей Франции и Румынии выстраиваются в виде цепочки вдоль линии при низких значениях  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и образуют разброс значений  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  на радиогенном окончании тренда (рис. 18б). Линия ограничивает всю совокупность точек сверху. Ее наклон (0.1086) больше наклона основного европейского тренда Pb. Смещение точек от этой линии вправо может быть следствием примеси общего компонента нефтей Европы (СЕОС). Этот компонент по изотопным отношениям Pb подобен материалу современных морских отложений и верхней части континентальной коры (Hemming, McLennan, 2001; Paul et al., 2002). Линия нефтей Франции и Румынии с наклоном 0.1086 характеризует локальные компоненты.

В Европе широко распространен внутримитный кайнозойский вулканизм, характеризующийся составом Общего Мантийного Резервуара (CMR) (Lustrino, Wilson, 2007). Состав СЕОС нефтей существенно отличается от состава CMR вулканических пород, хотя в обоих случаях эти компоненты имеют высокое отношение  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  (рис. 18).

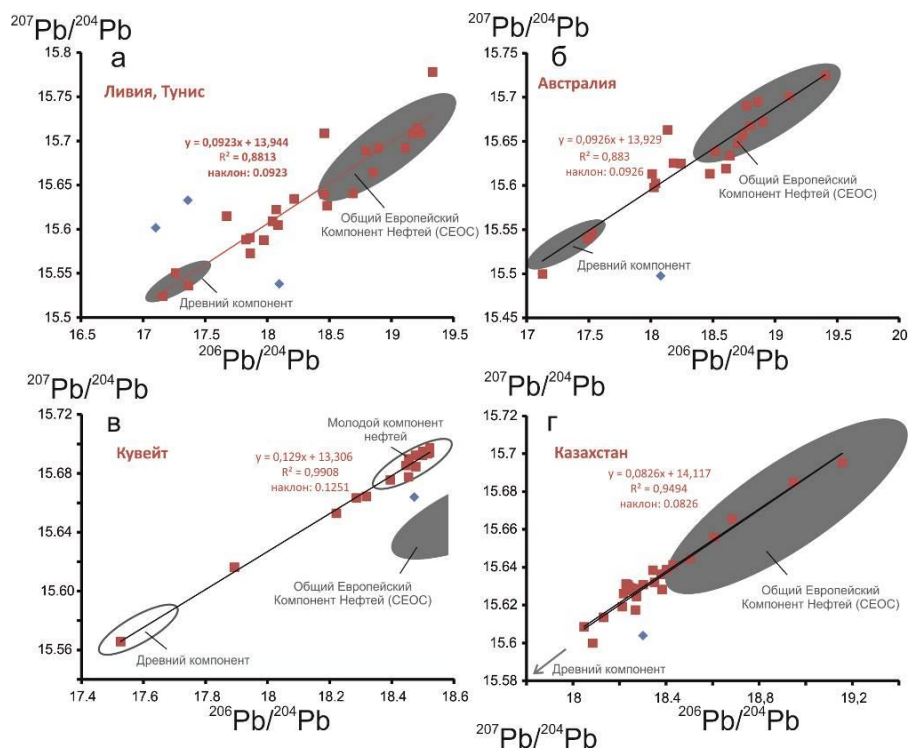


**Рис. 18.** Диаграммы  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  компонентов нефтей Северного и Баренцева морей (а), Франции и Румынии (б) и черных сланцев Британии (в). Использованы данные (Fetter et al., 2019). Для сопоставления на диаграммах а и в показано фигуративное поле CMR (Common Mantle Reservoir), выделенное для вулканических пород Европы и сопредельной Африки и Аравии (Lustrino, Wilson, 2007).

**Fig. 18.** Diagrams  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  of oil components from the North and Barents Seas (a), France and Romania (b), and British black shales (c). Data are from (Fetter et al., 2019). For comparison, the diagrams a and c show the CMR (Common Mantle Reservoir) data field allocated for volcanic rocks of Europe and adjacent Africa and Arabia (Lustrino, Wilson, 2007).

Тренд изотопов Pb нефтей Ливии и Туниса имеет сходство с основным трендом изотопов Pb Северного и Баренцева морей (наклон 0.0923 слегка меньше наклонов 0.0989 и 0.0961) (рис. 19а). Такой же тренд с таким же наклоном (0.0926) имеют нефти Австралии (рис. 19б). Такое сходство компонентов может отражать глобальную общность глубинных флюидов регионов SOPITA и AFITA.

Тренды фигуративных точек на Pb-изотопных диаграммах нефтей Кувейта и Казахстана смещаются вверх относительно основного тренда Европы, располагаясь в целом почти параллельно этому тренду. Наклон тренда Кувейта слегка возрастает (0.1251), а наклон тренда Казахстана, наоборот, слегка уменьшается (0.0826) (рис. 19в,г).

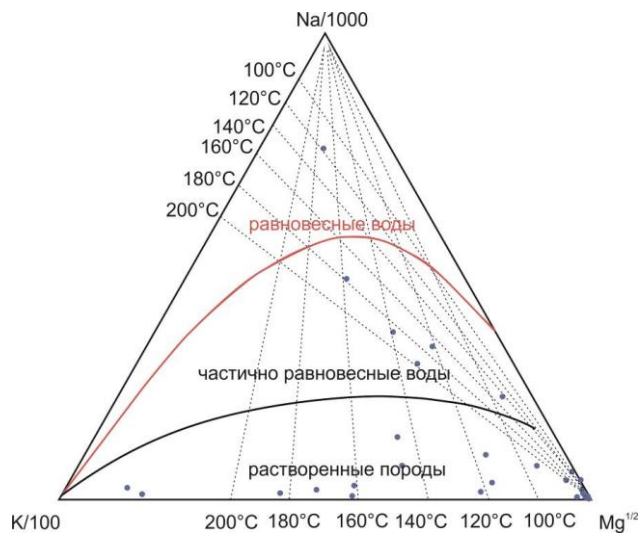


**Рис. 19.** Диаграммы  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  компонентов нефтей Ливии и Туниса (а), Австралии (б), Кувейта (в) и Казахстана (г). Отдельные отскочившие точки показаны синими ромбами. Использованы данные (Fetter et al., 2019).

**Fig. 19.** Diagrams  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for components of oils from Libya and Tunisia (a), Australia (b), Kuwait (c) and Kazakhstan (d). Individual outliers are shown as blue diamonds. Data are from (Fetter et al., 2019).

В Европе и сопредельных морских акваториях изотопный состав Pb существенно отличается от изотопного состава Pb внутриплитных вулканических пород. Поскольку залежи углеводородов находятся в верхней части коры, априори предполагается, что источники углеводородов также должны находиться в коре, в ее верхнем (осадочном) слое.

Такая гипотеза разрабатывается с использованием изотопов Pb для объяснения образования нефтяных месторождений в акватории Северного моря (см. рис. 18). Предполагается, что Pb приносится из пород коры в нефти горячей водой. По K–Na–Mg геотермометру для нефтей оцениваются температуры равновесия около 100–180°C (рис. 20).



**Рис. 20.** Диаграмма K/100 – Na/1000 –  $\text{Mg}^{1/2}$ , представляющая K–Na и K–Mg геотермометры (Giggenbach, 1988). Предполагается, что вода и растворенные в ней компоненты

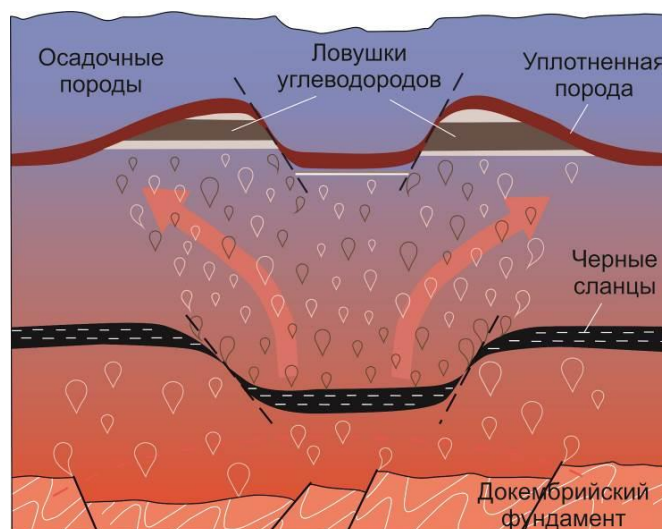


были захвачены нефтью в виде микроэмульсий и растворились в нефти, и что измеренные относительные содержания K, Na и Mg в кислотных экстрактах (синие точки) соответствуют содержаниям в захваченной воде. Равновесие между водой и изолированной нефтью полностью не достигалось, но температуры 100–180°C, вероятно, представляющие условия вторичной миграции и захвата нефти, согласуются с данными по флюидным включениям.

**Fig. 20.** Diagram  $K/100 - Na/1000 - Mg^{1/2}$  representing the K–Na and K–Mg geothermometers (Giggenbach, 1988). The assumption made here is that water and its solutes were trapped in oil as micro-emulsions and eventually dissolved into oil, and that present relative abundances of K, Na, and Mg in acid extracts (blue dots) reflect those of the trapped waters. Equilibration between water and sequestered oil was never fully achieved but temperatures of 100–180 °C, likely representing the conditions of secondary oil migration and entrapment, are consistent with fluid inclusion evidence.

Модель переноса Pb термальными водами предполагает, что нижний пограничный слой содержит избыточное тепло, которое создает плавучесть материала и вызывает образование горячих струй. Присутствие древнего Pb в нефти, требует, чтобы нижний граничный слой доходил до фундамента. В верхнем

граничном слое распределение температуры определяется локальным геотермическим градиентом. Горячие жидкости, попадающие в верхний граничный слой, эффективно охлаждаются, что приводит к разделению нефти и воды (рис. 21).



**Рис. 21.** Схема образования нефтяного поля (Fetter et al., 2019). Вода со свинцом (контуры белых капель) просачивается из докембрийского фундамента (нижний слой со складчатой структурой) сквозь поры вышележащей осадочной толщи. Горячие воды растворяют органический материал при прохождении через богатые углеродом черные сланцы (черный слой с субгоризонтальными белыми мелко-штриховыми линиями), возможно, вдоль разломов (наклоненные крупно-штриховые линии). Вода высвобождает углеводородные компоненты (контуры серых капель) по мере того, как флюиды мигрируют вверх и вбок через пористые осадочные слои (бежевые стрелки), а растворимость нефти в воде экспоненциально падает с температурой. И вода, и нефть захватываются в ловушки под слоем уплотненной породы (показан темно-коричневым цветом).

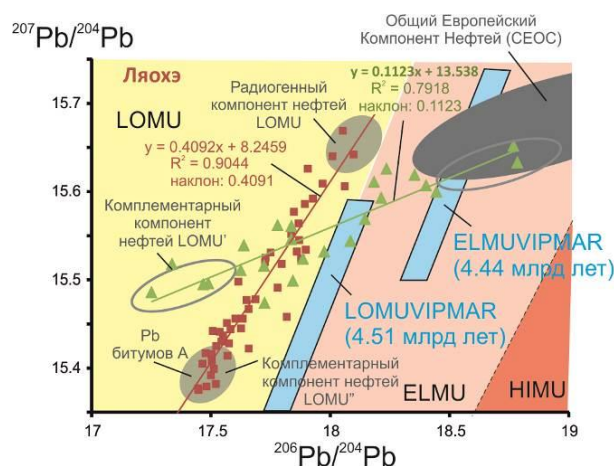
**Fig. 21.** Cartoon of oil field genesis (Fetter et al., 2019). Water containing Pb (white droplet outlines) percolates from the Precambrian basement (the folded bottom layer) through the overlying sedimentary strata. The hot waters dissolve organic material as it forms through carbon-rich black shales (black layer with subhorizontal white fine-dashed lines), possibly along faults (tilted coarse-dashed lines). The water liberates hydrocarbon components (gray droplet outlines) as the fluids migrate upward and sideways through the porous sedimentary layers (beige arrows), the solubility of oil in water decreasing exponentially with temperature. Both water and oil become trapped beneath a layer of seal rock (shown in dark brown).



### Интерпретация Pb-изотопных трендов Восточно-Азиатского типа

Фигуративные точки изотопов Pb нефтей Ляохэ разделяются на два тренда. Один тренд изотопов Pb нефтей Ляохэ имеет сходство с основным трендом изотопов Pb нефтей Северного и Баренцева морей (наклон нефтей Ляохэ 0.1123 слегка больше наклонов 0.0989 и 0.0961). В распределении точек этого тренда проявляется тенденция их смещения вниз относительно основного европейского

тренда. На верхнем (радиогенном) окончании этого тренда находится конечный компонент ELMU, на нижнем – комплементарный ему конечный компонент тренда LOMU'. Другой тренд имеет крутой наклон (0.4091). На верхнем (радиогенном) окончании этого тренда находится конечный компонент LOMU, на нижнем – комплементарный ему конечный компонент тренда LOMU''. Пологий тренд нефтей Ляохэ протягивается из области ELMU в область LOMU (рис. 22).



**Рис. 22.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  компонентов нефтей Ляохэ, образующих два тренда. Один тренд подобен по наклону (0.1123) основному европейскому тренду нефтей, другой пересекает первый тренд и имеет весьма крутой наклон (0.4091). Используются данные (Zhu et al., 2001), представленные на диаграмме рис. 10. Мантийные резервуары Азии: LOMUVIPMAR – LOMU Viscous Protomantle Reservoir, резервуар вязкой протомантии закристаллизовавшегося магматического океана с низким  $\mu$ , соответствующий геохроно 4.51 млрд лет; ELMUVIPMAR – ELMU Viscous Protomantle Reservoir, резервуар вязкой протомантии закристаллизовавшегося магматического океана с повышенным  $\mu$ , соответствующий геохроно 4.44 млрд лет (Rasskazov et al., 2020).

**Fig. 22.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  for components of the Liaohe oils, forming two trends. One is similar in slope to the main trend of European oils, the another intersects the former trend and has a steep slope. The data set (Zhu et al., 2001) presented in the diagram of Fig. 10 is used. Mantle reservoirs of Asia: LOMUVIPMAR – LOMU Viscous Protomantle Reservoir, a reservoir of viscous protomantle of a crystallized magma ocean with low  $\mu$ , corresponding to a geochron of 4.51 Ga; ELMUVIPMAR – ELMU Viscous Protomantle Reservoir, a reservoir of viscous protomantle of a crystallized magma ocean with elevated  $\mu$ , corresponding to a geochron of 4.44 Ga (Rasskazov et al., 2020).

В Восточной Азии Pb-изотопные тренды битумов, керогенов и нефтей содержат мантийные Pb-изотопные компоненты, маркированные четвертичными внутриплитными вулканическими породами. Более того, тренды битумов, керогенов и нефтей имеют разный наклон, взаимно пересекаются и сопоставимы по протяженности с трендами вулканических пород.

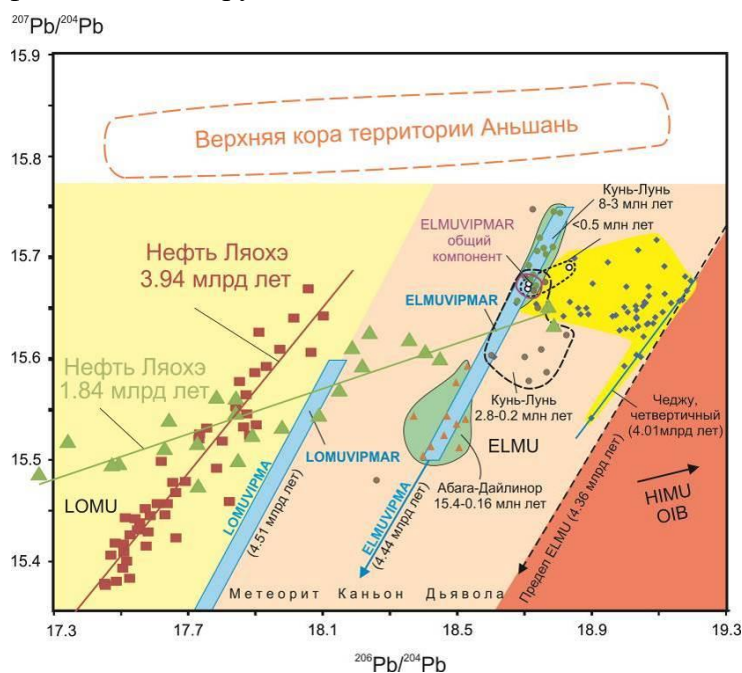
По наклону Pb-изотопных трендов внутриплитных базальтов и базальтоидов оценивается возраст протолитов источников,

вовлекающихся в плавление на разных уровнях мантии. Предполагается общий запуск плавления силикатной мантии от кристаллизации магматического океана Земли в интервале 4.54–4.44 млрд лет назад и дискретная во времени эволюция мантии с изотопной гомогенизацией порций протолитов с последующей U–Pb дифференциацией локальных резервуаров, отражающейся в Pb-изотопных трендах (Rasskazov et al., 2020; Чувашова и др., 2022).

Голоценовый вулканизм Восточной Азии характеризуется более высокой насыщенностью флюидами, чем вулканизм Центральной Азии, что влечет за собой возобновляющиеся извержения на окраине континента в последние 10 тыс. лет вплоть до настоящего времени, в отличие от короткого импульса, проявившегося, например, в Центральной Монголии, на вулкане Хорго, около 9 тыс. лет назад (Чувашова и др., 2007). Роль флюидов в кайнозойских вулканических извержениях возрастает с течением времени. В четвертичное время на поле Дариганга поступают флюиды мантии магматического океана, закристаллизовавшегося в гадее, около 4.47 млрд лет назад (Rasskazov et al., 2024).

Эти факты свидетельствуют о высокой синвулканической проницаемости мантии и коры для глубинных флюидов, возможно, поднимающихся с глубин нижней мантии. По-видимому, нефтяное поле Ляохэ (и другие нефтяные проявления Восточной Азии) формировались при участии глубинных мантийных флюидных потоков. Гипотеза о глубинных флюидах в нефти Ляохэ аргументируется развитием Pb-изотопных трендов с существенно более низким отношением  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в нефтях, чем в породах верхней коры территории нефтяного поля. Крутой Pb-

изотопный тренд нефтей Ляохэ с наклоном 0.4091, соответствующим возрасту материала предполагаемого флюидного потока 3.94 млрд лет, сопоставляется по возрасту с протолитом источника четвертичных базальтов о-ва Чеджу на юге Японского моря (возраст 4.01 млрд лет) ранней геодинамической эпохи Земли. Пологий Pb-изотопный тренд нефтей с наклоном 0.1123, соответствующим возрасту материала флюидного потока 1.84 млрд лет, сопоставляется по возрасту с протолитом источника Лаошантоу четвертичных лав поля Удаляньчи (возраст 1.87 млрд лет) и с другими близкими по возрасту протолитами вулканических пород Восточной Азии средней геодинамической эпохи Земли (Rasskazov et al., 2020). Высокорадиогенная часть пологого тренда нефтей Ляохэ приблизительно соответствует общему компоненту резервуара вязкой протомантии с повышенным  $\mu$  застывшего магматического океана. Однако, правый конец этого тренда также соответствует составам верхней коры, океанических отложений и СЕОС. Протолит такого состава мог испытать дифференциацию около 1.84 млрд лет назад и с течением времени дал тренд, протянувшийся в поле составов LOMU (рис. 22, 23).



**Рис. 23.** Диаграмма  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  –  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  сопоставления двух трендов нефтей Ляохэ с трендами и компонентами вулканических пород Восточной Азии и трендом пород верхней коры. Приведены тренды нефтей Ляохэ относительно мантийных резервуаров Азии (рис. 22), фигуративные поля точек вулканических полей Куньлуня, Абаги-Дайлинора и Чеджу (Rasskazov et al., 2020 и ссылки в этой работе) и фигуративное поле верхней коры территории Аньшаня (Zhu et al., 2001). Схема образования нефтяного поля Северного моря в данном случае не работает, поскольку в нефти Ляохэ отсутствуют компоненты верхней коры

территории нефтяного поля, а присутствуют мантийные компоненты. Для трендов нефтей Ляохэ приведены датировки материала протолита для предполагаемого флюидного потока.

**Fig. 23.** Diagram  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  comparing two trends of Liaohe oils with the trends and components of volcanic rocks from East Asia and the trend of upper crustal rocks. The trends of Liaohe oils relative to the mantle reservoirs of Asia (Fig. 22), the data fields of points of the Kunlun, Abaga-Dalinuoer, and Jeju volcanic fields (Rasskazov et al., 2020 and references therein), and the data field of the upper crust of the Anshan area (Zhu et al., 2001) are shown. The scheme of the formation of the North Sea oil field does not work in this case, since the Liaohe oil does not contain components of the upper crust of the oil field area, but does contain mantle components. For the Liaohe oil trends, the ages of the inferred fluid flow material are indicated.

### Заключение

Из сравнительного анализа Рb-изотопных характеристик углеводородов разных регионов Мира следует вывод об общем подразделении битумов, керогенов и нефтей на гидротермальные и обычные (катагенетические). В гидротермальных условиях достигается изотопная гомогенизация Рb с выходом на надежные изохронные Рb–Рb датировки, отражающие отделение свинца от урана в рудные минералы одновременно с обогащением ураном битумов. В условиях катагенеза изотопная гомогенизация Рb не достигается. По семействам фигуративных точек на диаграммах изотопов Рb выявляется дискретность компонентов источников, вероятно, имеющих различный возраст.

В систематике битумов, керогенов и нефтей различаются источники Рb-изотопных кластеров и непрерывных протяженных трендов. Кластеры изотопов Рb свойственны месторождениям углеводородов Северной и Южной Америк, протяженные тренды – месторождениям Евразии, Африки и Австралии. В кластерах наблюдается взаимное соответствие Рb-изотопных составов керогенов и нефтей, а также производных легких фракций бензинов. В протяженных трендах выявляется несоответствие между этими составами. Рb-изотопные кластеры обозначают месторождения углеводородов, образовавшиеся в результате катагенеза осадочных отложений в бассейнах погружения, протяженные Рb-изотопные тренды свидетельствуют о развитии более сложных процессов поступления и преобразования углеводородного материала.

Тренд Северного и Баренцева морей принимается в качестве типичного (преобладающего) протяженного тренда нефтей,

имеющего на диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  наклон около 0.09–0.10. На тренде обозначается общий европейский компонент нефтей (СЕОС), существенно отличающийся от состава Общего Мантийного Резервуара (СМР) Европы и сопредельной Африки и Аравии. Протяженные Рb-изотопные тренды других регионов меняют наклон от 0.08 до 0.23. В этом интервале находится наклон (0.1123) протяженного тренда нефтей поля Ляохэ Северо-Восточного Китая. Но здесь проявляется также крутой тренд с наклоном 0.4091.

Распределение изотопов Рb в углеводородах Северного моря интерпретируется как результат смешения древнего Рb, который переносится термальными водами из пород кристаллического фундамента, и молодого Рb, содержащегося в черных сланцах юрского возраста. Распределение изотопов Рb в битумах, керогенах и нефтях поля Ляохэ служит показателем их формирования в глубинных мантийных флюидных потоках, которые характеризуются протяженными трендами диаграммы  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , подобными трендам кайнозойских вулканических пород Азии.

Несмотря на развитие в России нефтедобывающей отрасли, Рb-изотопная систематика углеводородного сырья здесь остается неизученной. Определением изотопного состава Рb посвящена единственная работа (Готтих и др., 2012), в которой представлены данные по изотопам U и Рb в одном образце битума Западно-Соплесского газоконденсатного месторождения Тимано-Печорской провинции. Полученные значения отношений нуклидов U и Рb использовались авторами для ориентировочной оценки времени позднего поступления углеводородов в карбонатные отложения каменноугольного возраста.

Ими рассчитаны модельные значения датировок, близкие к конкордантным:  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  – 203.1 млн лет и  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  204.4 млн лет. По соотношению изотопов Pb получено несколько более древнее значение модельного возраста 219.5 млн лет. В битуминозной фазе включений в породах и в битумах определены равновесные отношения изотопов  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . Сделан вывод о том, что геохимическая замкнутость в отношении присутствующих урана и тория не нарушалась в течение, по крайней мере, последнего 1 млн лет. Эта работа, опубликованная в виде тезисов, имеет предварительный характер.

### **Образовательное значение статьи**

Лекционные теоретические курсы классического университета России дают общее знание по предметам, которое может долгое время оставаться не востребованным в практической деятельности молодого специалиста. В магистерских курсах нужно вводить приемы, которые заставят слушателей привести в движение их устремления и мысли. На старших курсах, после производственных практик бакалавриата и магистратуры, у студентов уже начинают вырабатываться профессиональные навыки, но у них еще недостаточно опыта оформления идеи в виде научной статьи.

В век компьютерных технологий общение между преподавателем и студентом предполагает сохранение информации между встречами и ее переработку в интерактивном режиме во время встреч. Студент магистерской подготовки должен видеть рождение научной статьи от начала до конца, наблюдать за тем, как преподаватель создает научную статью, как он выбирает новую актуальную тему для исследования, как он формулирует цель и задачи, выбирает методы для решения поставленных задач, получает фактические материалы с полным осознанием их качества, создает структуру статьи, наполняет ее содержанием и иллюстрациями. Студент должен улавливать малейшие неточности и грубые ошибки преподавателя, неизбежно проявляющиеся в процессе работы над содержанием рукописи, и вводить необходимые правки, чувствовать вместе с

преподавателем необходимость совершенствования структуры работы и корректировки выводов, которые следуют из каждого нового обсуждения полученного фактического материала. Наконец, у магистранта должно сформироваться понимание новизны выводов, полученных в результате проделанной коллективной работы преподавателя и активных слушателей, должно сложиться впечатление о дальнейших перспективах впервые предложенных решений.

На геологическом факультете ИГУ третий год проводятся занятия по дисциплине «Подготовка, оформление и представление результатов научно-исследовательских и научно-производственных работ». За два предшествующих учебных года во время занятий в интерактивном режиме подготовлены статьи (Олиферовский и др., 2022; Монгуш и др., 2023). Обе опубликованы в финальных (четвертых) выпусках журнала «Геология и окружающая среда» как отчетные документы магистрантов по пройденному курсу. Магистранты стали авторами статей и получили зачеты по дисциплине.

В процессе ознакомления с немногочисленными работами по химическим элементам и изотопам, полученным для нефтей с использованием современного аналитического оборудования, были рассмотрены разные интерпретации полученных данных. Стало очевидным, что назрела необходимость обзора и общей оценки опубликованных статей этого направления. В начале первого семестра 2024–2025 учебного года было принято решение подготовить в интерактивном режиме с магистрантами рукопись по теме: «Что могут дать методы элементного и изотопного анализа для выяснения происхождения нефтей?». В конечном итоге, в интерактивном режиме с магистрантами была подготовлена статья, в которой обозначились возможности применения изотопов Pb для систематики битумов, керогенов и нефтей.

### **Литература**

Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Изд-во МГУ, 2012. 432 с.



Германов А.И. Геохимическое значение органического вещества в гидротермальном процессе // Геохимия. 1965. № 7. С. 834–843.

Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Журавлев Д.З. Геохимические особенности пород, битумов и нефтей некоторых нефтегазоносных провинций: изотопные соотношения Nd и Sr // Доклады РАН. 2000. Т. 375. № 1. С. 85–88.

Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Пушкарев Ю.Д. Возможность использования U-Th-Pb и Pb-Pb систем для исследования нафтидов // Материалы 5-й Российской конференции по изотопной геохронологии «Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов», 4–6 июня 2012 г. Москва: ИГЕМ РАН. С. 112–114.

Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Нурғалиев Д.К., Журавлев Д.З. Некоторые генетические аспекты формирования Ромашкинского нефтяного м/р и его сателлитов // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 3–11.

Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Брянская А.В., Морозова В.В., Тикунова Н.В., Пельтек С.Е., Карпов Г.А., Таран О.П., Огородникова О.Л., Кириченко И.С., Розанов А.С., Бабкин И.В., Шуваева О.В., Чебыкин Е.П. Геологические, гидрогеохимические и микробиологические особенности нефтяной площадки кальдеры Узон (Камчатка) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 1–2. С. 56–88. doi: 10.15372/GiG20150103

Зубков В.С. Закономерности распределения и гипотезы происхождения конденсированных нафтидов в магматических породах различных геодинамических обстановок // Геохимия. 2009. № 8. С. 787–804.

Ксанфомалити Л. Экспедиция "Гюйгенс" к Титану, спутнику Сатурна // Наука и жизнь. 2005. № 3. <https://www.nkj.ru/archive/articles/827/>

Монгуш А.Р., Коваленко С.Н., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Саранина Е.В., Рассказов С.В. Сходство и различие состава среднеюрских и нижнеплиоценовых отложений на северо-западном берегу Байкала: Оценка вклада обломочного материала Приморского хребта в аллювий средней части долины Пра-Манзурки // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 4. С. 51–81. doi: 10.26516/2541-9641.2023.4.51

Олиферовский Р.В., Седунова Е.А., Шаметова И.Б., Башкирцев А.В., Данилин Д.А., Монгуш А.Р., Коваленко С.Н., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Саранина Е.В., Рассказов С.В. Источник

трахидацит-риолитовых галек среднеюрских конгломератов на северо-западном берегу Байкала: сопоставление галек с породами магматических комплексов верхнего палеозоя и мезозоя Забайкалья // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 4. С. 53–79. doi: 10.26516/2541-9641.2022.4.53

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Радиоизотопные методы хронологии геологических процессов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 300 с.

Рокосова Н.Н., Рокосов Ю.В., Усков С.И., Бодоев Н.В. Состав и образование гидротермальной нефти (обзор) // Нефтехимия. 2001. Т. 41, № 1. С. 3–16.

Сорохтин О.Г., Леин А.Ю., Баланюк И.Е. Термодинамика океанических гидротермальных систем и абиогенная генерация метана // Океанология. 2001. Т. 41. № 6. С. 898–909.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М: Мир, 1989. 590 с.

Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Шакиров Р.Б. Исследование изменчивости концентраций метана в поверхностном слое вод Японского моря в контексте сейсмических событий (по результатам экспедиционных исследований 2017–2018 гг.) // Геодинамика и тектонофизика. Т. 13, №. 3. 0642. doi: 10.5800/GT-2022-13-3-0642

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н. Голоценовый вулканизм в Центральной Монголии и Северо-Восточном Китае: асинхронное декомпрессионное и флюидное плавление мантии // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 19–45.

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Радиоизотопные исследования позднекайнозойских вулканических пород Азии и Северной Америки: источники вулканизма глобального, регионального и локального значения // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 3. С. 64–102. doi: 10.26516/2541-9641.2022.3.64

Шакиров Р.Б. Особенности химического и изотопного состава углеводородных газов вулканов Менделеева и Головнина (о. Кунашир) // Геохимия. 2014. № 3. С. 267–279.

Albarède F., Desaulty A.-M., Blichert-Toft J. A geological perspective on the use of Pb isotopes in archaeometry // Archaeometry. 2012. Vol. 54. P. 853–867.

- Alldrick D.J., Godwin C.I., Sinclair A.J. An exploration application for lead isotopes ratios, Stewart Mining Camp, northwestern British Columbia // *Exploration and Mining Geology*. 1993. Vol. 2. P. 121–128.
- Allègre C.J. *Isotope geology*; Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2008. 512 p.
- Bazhenova K.O., Arefiev A.O., Frolov B.E. Oil of the volcano Uzon caldera, Kamchatka // *Organic Geochemistry*. 1998. Vol. 29. P. 421–428.
- Dickin A.P. *Radiogenic isotope geology*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. 492 p.
- DiMarzio J.M., Georgiev S.V., Stein H.J., Hannah J.L. Residency of rhenium and osmium in heavy crude oil // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018. Vol. 220. P. 180–220. doi: 10.1016/j.gca.2017.09.038
- Doe B.R. *Lead isotopes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg-New York. 1970. 137 p.
- Dreyfus S., Pécheyran C., Lienemann C.P., Magnier C., Prinzhofer A., Donard O.F.X. Determination of lead isotope ratios in crude oils with Q-ICP/MS // *Journal of Analytic Atomic Spectrometry*. 2007. Vol. 22. P. 351–360.
- Fetter N., Blichert-Toft J., Ludden J., Lepland A., Borque J.S., Greenhalgh E., Garcia B., Edwards D., Tèlouk Ph., Albarède F. Lead isotopes as tracers of crude oil migration within deep crustal fluid systems // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. Vol. 525. P. 115747. doi: 10.1016/j.epsl.2019.115747
- Geyh M.A., Schleicher H. *Absolute age determination*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990. 503 p.
- Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria: derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. Vol. 52. P. 2749–2765.
- Gürgey K., Simoneit B.R.T., Batu Z., Karaman-deresi I.H., Varol B. Origin of petroliferous bitumen from the Büyük Menderes–Gediz geothermal graben system, Denizli – Sarayköy, western Turkey // *Applied Geochemistry*. 2007. Vol. 22. P. 1393–1415. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.01.006
- Hart S.R., Gaetani G.A. Mantle Pb paradoxes: the sulfide solution // *Contribution to mineralogy and petrology*. 2006. Vol. 152. P. 295–308 doi: 10.1007/s00410-006-0108-1
- Hemming S.R., McLennan S.M. Pb isotope compositions of modern deep sea turbidites // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 184. P. 489–503.
- Hurst R.W. Lead isotopes as age-sensitive, genetic markers in hydrocarbons: 2. Kerogens, crude oils, and unleaded gasoline // *Environmental Geosciences*. 2002. Vol. 9. P. 1–7.
- Hurtig N.C., Georgiev S.V., Stein H.J., Hannah J.L. Re-Os systematics in petroleum during water-oil interaction: The effects of oil chemistry // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. Vol. 247. P. 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.12.021>
- Jackson M.G., Becker T.W., Konter J.G. Evidence for a deep mantle source for EM and HIMU domains from integrated geochemical and geophysical constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 484. P. 154–167.
- Kiyosu Y., Asada N. Light hydrocarbons in volcanic gases from Japanese island Arc // *Geochemical Journal*. 1995. Vol. 29. P. 231–242.
- Kvenvolden K.A., Simoneit B.R.T. Hydrothermally derived petroleum: examples from Guaymas Basin, Gulf of California, and Escanaba Through, Northeast Pacific Ocean // *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1990. Vol. 74. P. 223–237.
- Lewan M.D. Experiments on the role of water in petroleum formation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61, No. 17, P. 3691–3723.
- Lustrino M., Wilson M. The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province // *Earth-Science Reviews*. 2007. Vol. 81 P. 1–65. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.09.002
- Maczyński A., Wiśniewska-Gocłowska B., Góral M. Recommended liquid–liquid equilibrium data, part 1: binary alkane–water systems // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2004. Vol. 33. P. 549–577.
- Mahdaoui F., Reisberg L., Michels R., Hautevelle Y., Poirier Y., Girard J.-P. Effect of the progressive precipitation of petroleum asphaltene on the Re-Os radioisotope system // *Chemical Geology*. 2013. Vol. 358. P. 90–100.
- Ortega G.S., Pécheyran Ch., Bérail S., Donard O.F.X. A fit-for purpose procedure for lead isotopic ratio determination in crude oil, asphaltene and kerosene samples by MC-ICPMS // *Journal of Analytic Atomic Spectrometry*. 2012. Vol. 27. P. 1447–1456. doi: 10.1039/c2ja30143a
- Paradis, S.; Hannigan, P.; Dewing, K. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits // *Geol. Assoc. Can.*

Miner. Depos. Div. Spec. Publ. 2007. Vol. 5. P. 185–203.

Parnell J., Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into a bitumen-bearing ore deposit, North Wales // *Geology*. 1990. Vol. 18, No. 10. P. 1028–1030.

Paul D., White W.M., Turcotte D.L. Modelling the isotopic evolution of the Earth // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2002. Vol. 360, No. 1800. P. 2433–2474. doi: 10.1098/rsta.2002.1076

Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, 2010. 306 p.

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals* 2020. Vol. 10, No. 9. P. 739; doi:10.3390/min10090739

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Late Cenozoic high and low temperature magma generation from primordial and age-modified mantle materials beneath Dariganga in Southeast Mongolia: Factors of mantle degassing and adiabatic upwelling // *Geosystems and Geoenvironment*. 2024. Vol. 3, No. 1. 100295. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100295

Saintilan N.J., Spangenberg J.E., Chiaradia M., Chelle-Michou C., Stephens M.B., Fontboté L. Petroleum as source and carrier of metals in epigenetic sediment-hosted mineralization // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 8283. doi.org/10.1038/s41598-019-44770-7

Selby D., Creaser R.A., Dewing K., Fowler M.G. Evaluation of bitumen as a  $^{187}\text{Re}$ – $^{187}\text{Os}$  geochronometer for hydrocarbon maturation and migration: A test case from the Polaris MVT deposit, Canada // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. Vol. 235. P. 1–15.

Selby D., Creaser R.A., Fowler M.G. Re–Os elemental and isotopic systematics in crude oils // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. Vol. 71. P. 378–386.

Simoneit B.R.T. Hydrothermal petroleum: genesis, migration, and deposition in Guaymas Basin, Gulf of California // *Can. J. Earth Sci.* 1985. Vol. 22. P. 1919–1929.

Simoneit B.R.T., Lonsdale P.F. Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of

Guaymas Basin // *Nature*. 1982. Vol. 295. P. 198–202.

Smith P.E., Farquhar R.M. Direct dating of Phanerozoic sediments by the  $^{238}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}$  method // *Nature*. 1989. Vol. 341. P. 518–521.

Stacey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. Vol. 26. P. 207–221.

Staudigel H., Park K.H., Pringle M., Rubenstone J.L., Smith W.H.F., Zindler A. The longevity of the South Pacific isotopic and thermal anomaly // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. Vol. 102. P. 24–44.

Syrbu N.S., Shakirov R.B., Anh Le Duc, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. Formation of abnormal gas-geochemical fields of methane, helium, and hydrogen in Northern Vietnam and its coastal and adjacent water areas // *Lithology and Mineral Resources*. 2020. Vol. 55, No. 6. P. 512–527. doi: 10.1134/S0024490220060097

Thomas C.P., Walter B., Doughty T.C., Hite D.M. Alaska North Slope oil and gas a promising future or an area in decline? // DOE/NETL-2009/1385 Addendum Report, 2009. 112 p.

Ventura G.T., Gall L., Siebert C., Prytulak J., Szatmari P., Hürlimann M., Halliday A.N. The stable isotope composition of vanadium, nickel, and molybdenum in crude oils // *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 59. P. 104–117.

Vervoort J.D., White W.M., Thorpe R.I., Franklin J.M. Postmagmatic thermal activity in the Abitibi Greenstone Belt, Noranda and Matagami Districts: evidence from whole rock Pb isotope data // *Economic Geology*. 1993. Vol. 88. P. 1598–1614.

White W.M. Isotope geochemistry. Wiley Blackwell, 2015. 495 p.

Yuan M-W., Li L., Li S-R., Santosh M., Li C-L., Alam M., Hou Z-Q. Bitumen Sm-Nd, pyrite Rb-Sr and zircon U-Pb isotopes constrain timing of ore formation and hydrocarbon deposition in the Erdaokan Ag-Pb-Zn deposit, NE China // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 134. P. 104161. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104161

Zartman R.E., Doe B.R. Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. Vol. 75. P. 135–162.

Zhang J., Zhu B., Cheng Y., Tu X., Chao Zh., Zhang Ch., Xiao Q., Li J., Piao M. Pb, Sr isotopes in organic matter of Lower Tertiary hydrocarbon source

rocks in Liaohe Fault Depression // Chinese Science Bulletin. 1999. Vol. 44, No. 23. P. 2192–2196.

Zhu B.-Q., Zhang J.-L., Tu X.-L., Chang X.-Y., Fan C.-Y., Liu Y., Liu J.-Y. Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their implications for petroleum generation and migration // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65, No. 15. P. 2555–2570.

Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1986. Vol. 14. P. 493–571.

## References

Albarède F., Desaulty A.-M., Blichert-Toft J. A geological perspective on the use of Pb isotopes in archaeometry // *Archaeometry*. 2012. Vol. 54. P. 853–867.

Alldrick D.J., Godwin C.I., Sinclair A.J. An exploration application for lead isotopes ratios, Stewart Mining Camp, northwestern British Columbia // *Exploration and Mining Geology*. 1993. Vol. 2. P. 121–128.

Allègre C.J. *Isotope geology*; Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2008. 512 p.

Bazhenova K.O., Arefiev A.O., Frolov B.E. Oil of the volcano Uzon caldera, Kamchatka // *Org. Geochem*. 1998. Vol. 29. P. 421–428.

Bazhenova O.K., Burlin Yu.K., Sokolov B.A., Khain V.E. *Geology and geochemistry of oil and gas*. Moscow: MSU Publ., 2012. 432 p. (In Russ.)

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Fefilov N.N. Holocene volcanism in Central Mongolia and Northeast China: Asynchronous decompressional and fluid melting of the mantle // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2007. Vol. 1, No. 6. P. 372–396. doi: 10.1134/S0742046307060024

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Radiogenic isotope studies of Late Cenozoic volcanic rocks from Asia and North America: Sources of volcanism of global, regional, and local significance // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 64–102. doi: 10.26516/2541-9641.2022.3.64 (In Russ.)

Dickin A.P. *Radiogenic isotope geology*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. 492 p.

DiMarzio J.M., Georgiev S.V., Stein H.J., Hannah J.L. Residency of rhenium and osmium in heavy crude oil // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018.

Vol. 220. P. 180–220. doi: 10.1016/j.gca.2017.09.038

Dobretsov N.L., Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Bryanskaya A.V., Morozova V.V., Tikunova N.V., Peltek S.E., Karpov G.A., Taran O.P., Ogorodnikova O.L., Kirichenko I.S., Rozanov A.S., Babkin I.V., Shuvaeva O.V., Chebykin E.P. Geological, hydrogeochemical, and microbiological characteristics of the Oil site of the Uzon caldera (Kamchatka) // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 56, No. 1. P. 39–63. doi: 10.1016/j.rgg.2015.01.003

Doe B.R. *Lead isotopes*. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York. 1970. 137 p.

Dreyfus S., Pécheyran C., Lienemann C.P., Magnier C., Prinzhofer A., Donard O.F.X. Determination of lead isotope ratios in crude oils with Q-ICP/MS // *Journal of Analytic Atomic Spectrometry*. 2007. Vol. 22. P. 351–360.

Faure G. *Principles of isotope geology*. New York: John Wiley&Sons, 1986.

Fetter N., Blichert-Toft J., Ludden J., Lepland A., Borque J.S., Greenhalgh E., Garcia B., Edwards D., Tèlouk Ph., Albarède F. Lead isotopes as tracers of crude oil migration within deep crustal fluid systems // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. Vol. 525. P. 115747. doi: 10.1016/j.epsl.2019.115747

Germanov A.I. Geochemical significance of organic matter in the hydrothermal process // *Geochemistry*. 1965. No. 7. P. 834–843.

Geyh M.A., Schleicher H. *Absolute age determination*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990. 503 p.

Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria: derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1988. Vol. 52. P. 2749–2765.

Gottikh R.P., Pisotsky B.I., Zhuravlev D.Z. Geochemical features of rocks, bitumens, and oils from some oil- and gas-bearing provinces: Evidence from Nd and Sr isotope ratios // *Doklady Earth Sciences*. 2000. Vol. 375. P. 1297–1300.

Gottikh R.P., Pisotsky B.I., Pushkarev Yu.D. Possibility of using U-Th-Pb and Pb-Pb systems for studying naphthides // *Proceedings of the 5th Russian Conference on Isotope Geochronology “Geochronometric isotope systems, methods of their study, chronology of geological processes”*, June 4–6, 2012. Moscow: IGEM RAS. P. 112–114.

Gottikh R.P., Pisotsky B.I., Nurgaliev D.K., Zhuravlev D.Z. Some genetic aspects of the formation of the Romashkino oil field and its satellites // *Domestic geology*. 2005. No. 3. P. 3–11.



- Gürgey K., Simoneit B.R.T., Batı Z, Karaman-deresi I.H., Varol B. Origin of petroliferous bitumen from the Büyük Menderes–Gediz geothermal graben system, Denizli – Sarayköy, western Turkey // *Applied Geochemistry*. 2007. Vol. 22. P. 1393–1415. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.01.006
- Hart S.R., Gaetani G.A. Mantle Pb paradoxes: the sulfide solution // *Contribution to mineralogy and petrology*. 2006. Vol. 152. P. 295–308 doi: 10.1007/s00410-006-0108-1
- Hemming S.R., McLennan S.M. Pb isotope compositions of modern deep sea turbidites // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 184. P. 489–503.
- Hurst R.W. Lead isotopes as age-sensitive, genetic markers in hydrocarbons: 2. Kerogens, crude oils, and unleaded gasoline // *Environmental Geosciences*. 2002. Vol. 9. P. 1–7.
- Hurtig N.C., Georgiev S.V., Stein H.J., Hannah J.L. Re-Os systematics in petroleum during water-oil interaction: The effects of oil chemistry // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. Vol. 247. P. 142–161. doi: 10.1016/j.gca.2018.12.021
- Jackson M.G., Becker T.W., Konter J.G. Evidence for a deep mantle source for EM and HIMU domains from integrated geochemical and geophysical constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. Vol. 484. P. 154–167.
- Kiyosu Y., Asada N. Light hydrocarbons in volcanic gases from Japanese island Arc // *Geochemical Journal*. 1995. Vol. 29. P. 231–242.
- Kholmogorov A.O., Syrбу N.S., Shakirov R.B. Study of methane concentration variability in the surface layer of the Sea of Japan in the context of seismic events (Based on the results of expedition studies in 2017–2018) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. Vol. 13, No. 3, 0642. doi: 10.5800/GT-2022-13-3-0642
- Ksanfomality L. The Huygens Expedition to Titan, Saturn's Satellite // *Science and Life*. 2005. No. 3. <https://www.nkj.ru/archive/articles/827/>
- Kvenvolden K.A. Simoneit B.R.T. Hydrothermally derived petroleum: examples from Guaymas Basin, Gulf of California, and Escanaba Through, Northeast Pacific Ocean // *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1990. Vol. 74. P. 223–237.
- Lewan M.D. Experiments on the role of water in petroleum formation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61, No. 17, P. 3691–3723.
- Lustrino M., Wilson M. The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province // *Earth Science Reviews*. 2007. Vol. 81 P. 1–65. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.09.002
- Maczyński A., Wiśniewska-Goćłowska B., Góral M. Recommended liquid–liquid equilibrium data, part 1: binary alkane–water systems // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2004. Vol. 33. P. 549–577.
- Mahdaoui F., Reisberg L., Michels R., Hautevelles Y., Poirier Y., Girard J.-P. Effect of the progressive precipitation of petroleum asphaltene on the Re-Os radioisotope system // *Chemical Geology*. 2013. Vol. 358. P. 90–100.
- Mongush A.R., Bokareva A.A., Podlinov A.N., Prokopchik V.V., Ritter V.S., Maksimov N.M., Kalinin V.S., Zaripov M.S., Dambaev S.A., Kovalenko S.N., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V., Rasskazov S.V. Similarities and differences in the composition of Middle Jurassic and Lower Pliocene sediments on the northwestern shore of Lake Baikal: Assessment of the contribution of clastic material from the Primorsky Range to the alluvium in the middle part of the Pra-Manzurka valley // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 51–81. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.51>
- Oliferovsky R.V., Sedunova E.A., Shametova I.B., Bashkirtsev A.V., Danilin D.A., Mongush A.R., Kovalenko S.N., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Saranina E.V., Rasskazov S.V. Source of trachydacite-rhyolite pebbles of Middle Jurassic conglomerates on the northwestern shore of Lake Baikal: comparison of the pebbles with rocks of Upper Paleozoic and Mesozoic igneous complexes from Transbaikalia // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 4. P. 53–79. doi: 10.26516/2541-9641.2022.4.53 (In Russ.)
- Ortega G.S., Pécheyran Ch., Bérail S., Donard O.F.X. A fit-for purpose procedure for lead isotopic ratio determination in crude oil, asphaltene and kerosene samples by MC-ICPMS // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2012. Vol. 27. P. 1447–1456. doi: 10.1039/c2ja30143a
- Paradis, S.; Hannigan, P.; Dewing, K. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits // *Geol. Assoc. Can. Miner. Depos. Div. Spec. Publ.* 2007. Vol. 5. P. 185–203.
- Parnell J., Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into a bitumen-bearing ore deposit, North Wales // *Geology*. 1990. Vol. 18, No. 10. P. 1028–1030.

- Paul D., White W.M., Turcotte D.L. Modelling the isotopic evolution of the Earth // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2002. Vol. 360, No. 1800. P. 2433–2474. doi: 10.1098/rsta.2002.1076
- Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, 2010. 306 p.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Radiogenic isotope methods for chronology of geological processes. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2012. 300 p.
- Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for Late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals* 2020. Vol. 10, No. 9. P. 739. doi: 10.3390/min10090739
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Late Cenozoic high and low temperature magma generation from primordial and age-modified mantle materials beneath Dariganga in Southeast Mongolia: Factors of mantle degassing and adiabatic upwelling // *Geosystems and Geoenvironment*. 2024. Vol. 3, No. 1. 100295. doi: 10.1016/j.geogeo.2024.100295
- Rokosova N.N., Rokosov Yu.V., Uskov S.I., Bodoev N.V. Composition and formation of hydrothermal oil (review) // *Petroleum Chemistry*. 2001. Vol. 41, No. 1. P. 3–16.
- Saintilan N.J., Spangenberg J.E., Chiaradia M., Chelle-Michou C., Stephens M.B., Fontboté L. Petroleum as source and carrier of metals in epigenetic sediment-hosted mineralization // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 8283. doi: 10.1038/s41598-019-44770-7
- Selby D., Creaser R.A., Dewing K., Fowler M.G. Evaluation of bitumen as a  $^{187}\text{Re}$ – $^{187}\text{Os}$  geochronometer for hydrocarbon maturation and migration: A test case from the Polaris MVT deposit, Canada // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. Vol. 235. P. 1–15.
- Selby D., Creaser R.A., Fowler M.G. Re–Os elemental and isotopic systematics in crude oils // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. Vol. 71. P. 378–386.
- Shakirov R.B. Chemical and isotopic characteristics of hydrocarbon gases from Mendeleev and Golovnin volcanoes, Kunashir Island // *Geochemistry International*. 2014. Vol. 52. P. 247–259. doi: 10.1134/S0016702914010066
- Simoneit B.R.T. Hydrothermal petroleum: genesis, migration, and deposition in Guaymas Basin, Gulf of California // *Can. J. Earth Sci.* 1985. Vol. 22. P. 1919–1929.
- Simoneit B.R.T., Lonsdale P.F. Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas Basin // *Nature*. 1982. Vol. 295. P. 198–202.
- Smith P.E., Farquhar R.M. Direct dating of Phanerozoic sediments by the  $^{238}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}$  method // *Nature*. 1989. Vol. 341. P. 518–521.
- Sorokhtin O.G., Lein A.Yu., Balanyuk I.E. Thermodynamics of oceanic hydrothermal systems and abiogenic methane generation // *Oceanology*. 2001. Vol. 41. No. 6. P. 861–872.
- Stasey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. Vol. 26. P. 207–221.
- Staudigel H., Park K.H., Pringle M., Rubenstone J.L., Smith W.H.F., Zindler A. The longevity of the South Pacific isotopic and thermal anomaly // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. Vol. 102. P. 24–44.
- Syrbu N.S., Shakirov R.B., Anh Le Duc, Kholmogorov A.O., Iakimov T.S., Kalgin V.Yu. Formation of abnormal gas-geochemical fields of methane, helium, and hydrogen in Northern Vietnam and its coastal and adjacent water areas // *Lithology and Mineral Resources*. 2020. Vol. 55, No. 6. P. 512–527. doi: 10.1134/S0024490220060097
- Thomas C.P., Walter B., Doughty T.C., Hite D.M. Alaska North Slope oil and gas a promising future or an area in decline? // DOE/NETL-2009/1385 Addendum Report, 2009. 112 p.
- Ventura G.T., Gall L., Siebert C., Prytulak J., Szatmari P., Hürlimann M., Halliday A.N. The stable isotope composition of vanadium, nickel, and molybdenum in crude oils // *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 59. P. 104–117.
- Vervoort J.D., White W.M., Thorpe R.I., Franklin J.M. Postmagmatic thermal activity in the Abitibi Greenstone Belt, Noranda and Matagami Districts: evidence from whole rock Pb isotope data // *Economic Geology*. 1993. Vol. 88. P. 1598–1614.
- White W.M. Isotope geochemistry. Wiley Blackwell, 2015. 495 p.
- Yuan M-W., Li L., Li S-R., Santosh M., Li C-L., Alam M., Hou Z-Q. Bitumen Sm-Nd, pyrite Rb-Sr and zircon U-Pb isotopes constrain timing of ore formation and hydrocarbon deposition in the Erdaokan Ag-Pb-Zn deposit, NE China // *Ore Geology*

Reviews. 2021. Vol. 134. P. 104161. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104161

Zartman R.E., Doe B.R. Plumbotectonics – the model // *Tectonophysics*. 1981. Vol. 75. P. 135–162.

Zhang J., Zhu B., Cheng Y., Tu X., Chao Zh., Zhang Ch., Xiao Q., Li J., Piao M. Pb, Sr isotopes in organic matter of Lower Tertiary hydrocarbon source rocks in Liaohe Fault Depression // *Chinese Science Bulletin*. 1999. Vol. 44, No. 23. P. 2192–2196.

Zhu B.-Q., Zhang J.-L., Tu X.-L., Chang X.-Y., Fan C.-Y., Liu Y., Liu J.-Y. Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their

implications for petroleum generation and migration // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65, No. 15. P. 2555–2570.

Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1986. Vol. 14. P. 493–571.

Zubkov V.S. Tendencies in the distribution and hypotheses of the genesis of condensed naphthides in magmatic rocks from various geodynamic environments // *Geochemistry International*. 2009. Vol. 47. P. 741–757. doi: 10.1134/S0016702909080011

**Рассказов Сергей Васильевич,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

**Rasskazov Sergei Vasilievich,**

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664025, Irkutsk, Lenin st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

**Ясныгина Татьяна Александровна,**

кандидат геолого-минералогических наук,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: ty@crust.irk.ru.

**Yasnygina Tatyana Alexandrovna**

candidate of geological and mineralogical sciences,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: ty@crust.irk.ru.

**Чувашова Ирина Сергеевна,**

кандидат геолого-минералогических наук,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: chuvashova@crust.irk.ru.

**Chuvashova Irina Sergeevna,**

candidate of geological and mineralogical sciences,

Senior Researcher,

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher,

tel.: (3952) 51–16–59,

email: chuvashova@crust.irk.ru.

**Колотилина Карина Владимировна,**

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

магистрант второго курса,

email: Karinavladimirovna60@gmail.com.

**Kolotilina Karina Vladimirovna,**

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

second year master's student,

email: Karinavladimirovna60@gmail.com.

**Куроленко Анатолий Александрович,**

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

магистрант второго курса,

email: KUrolenko.01@mail.ru.

**Kurolenko Anatoly Alexandrovich,**

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

second year master's student,

email: KUrolenko.01@mail.ru.

**Носкова Татьяна Васильевна,**  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
магистрант второго курса,  
email: t.noskova141@gmail.com.  
**Noskova Tatyana Vasilievna,**  
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
second year master's student,  
email: t.noskova141@gmail.com.

**Тукалова Виктория Олеговна,**  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
магистрант второго курса,  
**Tukalova Victoria Olegovna,**  
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
second year master's student.

**Опенышев Артем Петрович,**  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
магистрант второго курса,  
email: openyshev.artem@mail.ru.  
**Openyshev Artem Petrovich,**  
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,

second year master's student,  
email: openyshev.artem@mail.ru.

**Хромова Софья Михайловна,**  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
магистрант второго курса,  
email: Us1999@icloud.com.  
**Khromova Sofya Mikhailovna,**  
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
second year master's student,  
email: Us1999@icloud.com.

**Парфенов Даниил Игоревич,**  
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
студент второго курса бакалавриата,  
email: parff0315@mail.ru.  
**Parfenov Daniil Igorevich,**  
664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
second year undergraduate student,  
email: parff0315@mail.ru.