

РАЦИОНАЛЬНОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТИРОВАНИЯ ДЕТРИТОВЫХ АПАТИТОВ МЕТОДОМ (U-TH)/HE

Ф.Р. Абдуллин¹, Н.В. Павлинова²

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología

²Инженерный факультет

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Рассматривается использование детритового апатита в качестве естественного термохронометра при помощи датирования по системе (U-Th)/He и его применение для термотектонических реконструкций осадочных бассейнов и прогноза нефтегазоносности.

Ключевые слова: термохронология, осадочный бассейн, (U-Th)/He, зона частичной задержки гелия, апатит, циркон, титанит, палеотемпература.

Введение. С конца XX в. подавляющее число геологов придерживается осадочно-миграционной теории нефтегазообразования, связанной с процессом устойчивого погружения бассейна. Длительное прогибание территории и быстрое накопление мощной толщи отложений является причиной диа- и катагенеза, в процессе которого под действием повышения температуры и давления происходит биохимическое превращение рассеянного органического вещества (РОВ) в кероген — главный источник углеводородов (УВ).

В настоящее время, по мнению многих исследователей, одним из главных агентов, под действием которого происходит возникновение нефтегазопроизводящих толщ, является температура [1—4; 12; 15; 18; 19].

Температурные условия оказывают огромное влияние на степень преобразования РОВ, фазовое состояние УВ и их миграционные свойства, поэтому данные о палеотермических обстановках недр позволяют судить о характере процессов образования и скопления нефти и газа в осадочных толщах [1—3; 15].

Эмпирически обосновано, что для образования значительных скоплений нефти в осадочных бассейнах необходимо наличие геотермического градиента величиной 25—50 °С/км и выше; высокий темп осадконакопления (40—80 м/млн лет); скорость нагрева горных пород должна находиться в интервале 1—10 °С/млн лет [3; 12]. По опубликованным в литературе сведениям, главная фаза нефтеобразова-

ния (ГФН) расположена в интервале температур $60\text{—}140 \pm 20$ °С, в то время как генерация газообразных УВ осуществляется в более широком диапазоне температур, характеризующем этапы начиная с седиментогенеза до метаморфизма. Однако главной фазой газообразования (ГФГ) принято считать температуры от 140 ± 20 до 240 ± 20 °С [1—4; 12; 15].

При поисково-разведочных работах (ПРР) для оценки перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов широко применяются различные термохронологические исследования. В настоящее время наряду с традиционными методами (например, определение величины отражательной способности витринита) стали использовать радиоизотопное датирование по системе (U-Th)/He, которое позволяет не только констатировать палеотемпературы, но и проследить их изменение в геологическом времени. Применяя данный метод, можно получить подробную картину термотектонической эволюции нефтегазоносных бассейнов и тем самым избежать серьезных рисков при ПРР [4; 12].

Датирование детритового апатита методом (U-Th)/He. Метод датирования с помощью системы (U-Th)/He (или датирование по гелию) основан на естественном образовании атомов гелия в результате распада радиоактивных изотопов урана и тория. Иными словами, материнские изотопы ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th распадаются на дочерние изотопы ^{238}Pb , ^{207}Pb и ^{206}Pb соответственно, освобождая при каждой реакции атомы ^4He (α -частицы), электроны (β -частицы) и энергию. Атомы гелия, произведенные таким образом, задерживаются в кристаллической решетке минералов, поэтому, зная содержание задержанного He и концентрации U и Th, можно определить возраст минерала. Задержка He в минералах может быть только при относительно низкотемпературных условиях. Например, в апатитах при температуре больше 40 °С атомы He начинают освобождаться из кристаллической решетки за счет диффузии [5; 6; 9].

Многочисленные исследования и лабораторные эксперименты позволили определить зону частичной задержки гелия (ЗЧЗГ) (Helium Partial Retention Zone, HePRZ). ЗЧЗГ для апатитов находится в температурном интервале 40—70 °С [5; 6]. Это означает, что при температурах выше 70 °С атомы He освобождаются из кристаллической решетки апатита, и в этом случае возраст минерала, определенный по гелию, будет стремиться к 0Ma (эффект «омоложения»), а при температурах меньше 40 °С практически все атомы He сохраняются в кристаллической решетке. Датирование апатитов по гелию можно описать следующим математическим уравнением (основное уравнение):

$$[{}^4\text{He}] = 8 \cdot [{}^{238}\text{U}] \cdot (e^{\lambda_{238\text{U}} \cdot t} - 1) + \\ + 7 \cdot [{}^{235}\text{U}] \cdot (e^{\lambda_{235\text{U}} \cdot t} - 1) + 6 \cdot [{}^{232}\text{Th}] \cdot (e^{\lambda_{232\text{Th}} \cdot t} - 1); 3$$

где $[{}^4\text{He}]$, $[{}^{238}\text{U}]$, $[{}^{235}\text{U}]$ и $[{}^{232}\text{Th}]$ представляют собой замеренные концентрации соответствующих изотопов (причем, ${}^{235}\text{U} = {}^{238}\text{U} \cdot 137,88$); t — время аккумуляции He или возраст по гелию и λ — постоянная радиоактивного распада ($\lambda_{238\text{U}} = 1,551 \cdot 10^{-10}$; $\lambda_{235\text{U}} = 9,849 \cdot 10^{-10}$; $\lambda_{232\text{Th}} = 4,948 \cdot 10^{-11}$ лет $^{-1}$).

Важным моментом в проведении такого анализа является сепарация акцессорных минералов, которая проводится стандартными методами с использованием вибрационного стола, электромагнитного сепаратора, тяжелых жидкостей и т.д.

Для радиоизотопного анализа по системе (U-Th)/He рекомендуется использовать идиоморфные кристаллы апатита, которые должны быть без трещин, без флюидных включений, приблизительно одного и того же цвета и размером более 50—60 мкм [6]. Иными словами, процесс диффузии гелия и температура закрытия системы для апатита напрямую зависят от скорости охлаждения горных пород и размера кристаллов [5].

В настоящий момент вопрос о ЗЧЗГ для других акцессорных минералов все еще остается недостаточно изученным, хотя работами отдельных авторов установлено, что ЗЧЗГ для цирконов находится в температурном интервале между 130 и 200 °С [10], а у сфена (титанита) ЗЧЗГ находится в интервале 150—200 °С [6].

Для проведения и интерпретации результатов данного радиоизотопного анализа необходимо учитывать следующие фундаментальные законы литогенеза и нефтидогенеза.

1. Практически любой осадочный бассейн является своего рода «свалкой», которая принимает обломочный материал из различных источников сноса, поэтому в одних и тех же терригенных породах могут встречаться разные семейства одного и того же акцессорного минерала, которые отличаются по геохимическому составу (особенно элементы примеси и РЗЭ), морфологии кристаллов, цвету и т.д. Иначе говоря, акцессорные минералы, относительно устойчивые к физико-химическому выветриванию, сохраняют генетическую информацию своих материнских пород. Например, цирконы из терригенных пород могут сохранить информацию о возрасте кристаллизации своих первых материнских магматических пород до третьего и более цикла седиментогенеза.

2. Современный геотермический градиент в разных точках нашей планеты сильно варьирует в зависимости от тектонической обстановки, скорости осадконакопления, петрографического и литологического состава горных пород и их теплопроводности, проявления магматизма, соленого диапиризма и т.д. Среднее значение геотермического градиента считается равным 25—33 °С/км [13].

3. Эмпирически считается, что в геологическом прошлом средний геотермический градиент был на порядок выше (палеогеотермический градиент). Каждые 50 Ма палеогеотермический градиент менялся на 20% относительно последней точки отсчета [3]. Другими словами, положение изотерм изменяется во времени (палеоизотермы).

4. Охлаждение осадочных горных пород в определенной зоне бассейна может быть результатом произошедших различных тектонических движений и/или эрозионных процессов.

5. Температура — один из факторов, контролирующих нефтидогенез, и влияющих на физико-химические характеристики и миграционные свойства УВ, которые, в свою очередь, могут положительным или отрицательным образом сказаться на процессе добычи (например, вязкость и плотность нефти) [3].

Комбинирование системы (U-Th)/He с трековым датированием. Существует традиционный и широко используемый метод в качестве термохронметра детритовых минералов, который в отечественной литературе называется как трековое датирование (Fission-Track Analysis, FTA) [12]. Комбинация вышеописанного метода (U-Th)/He с трековым датированием является очень привлекательной техникой для геологов-нефтяников. Трековое датирование в апатитах позволяет

охватить для исследований температурный интервал 60—120 °С (зона частичного отжига треков, ЗЧО), который близок к главной фазе нефтегенеза (ГФН) (60—140 ± ± 20 °С) [4; 12]. Преимуществом трекового датирования является то, что метод не требует специального масс-спектрометра. Анализ проводится с помощью электронного микроскопа. В последние годы некоторые авторы успешно работают над усовершенствованием метода трекового датирования [16], чтобы избежать проблем, связанных с необходимостью использовать искусственное облучение кристаллов. Было установлено, что трековое датирование можно проводить химическим способом в единичных кристаллах апатита напрямую (без предварительного облучения) с помощью LA-ICP-MS (Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry).

По предположению некоторых авторов [13; 19], ЗЧО титанитов и цирконов находятся в геотермических интервалах, соответственно, 265—310 °С и 210—290 °С. Таким образом, вышеперечисленные радиоизотопные методы (датирование по гелию и трековое датирование) дополняют друг друга и позволяют охватить больший температурный интервал для термо-тектонических реконструкций осадочных бассейнов (рис. 1).

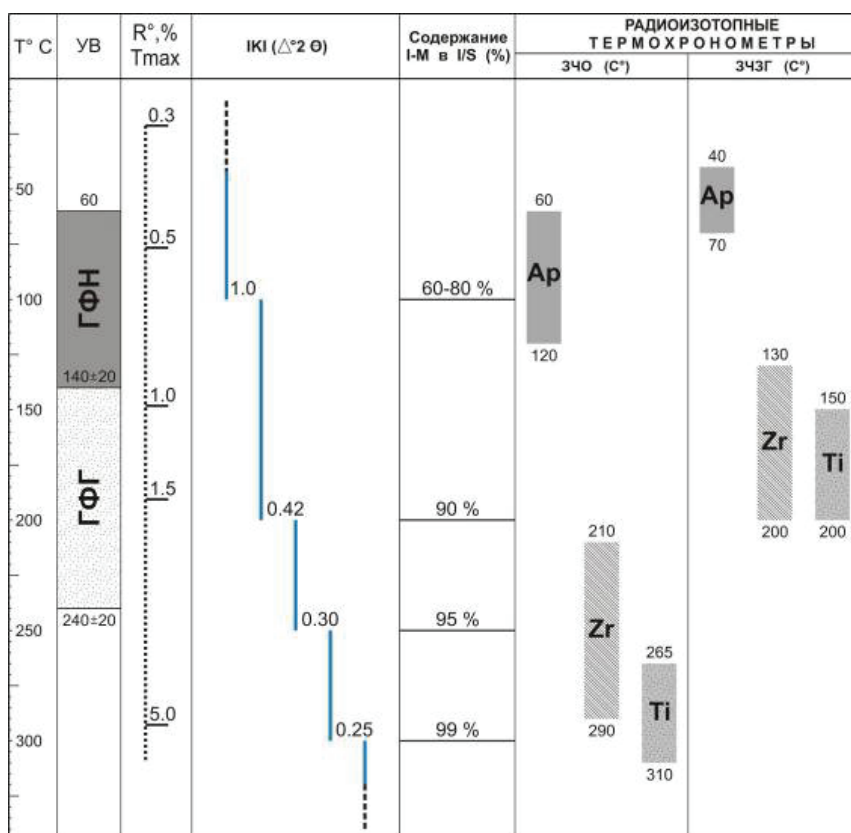


Рис. 1. Схема расположения ЗЧО и ЗЧЗГ в апатитах (Ap), цирконах (Zr) и титанитах (Ti) по отношению к ГФН и ГФГ [1—3; 5—12; 15; 17].

Для сравнения, приводятся: индекс кристалличности иллита (Kibler index of illite «crystallinity»), который рассчитывается на дифрактограммах по ширине пика 10-Å (001 отражение иллита) на 1/2 h [14]; I-M — процентное содержание иллита-мусковита в смешаннослойных иллит-сметитовых глинистых минералах (I/S) [13]; R° — отражательная способность витринита

Выводы. В целом, к вопросу о термо-тектонической реконструкции осадочных бассейнов с помощью радиоизотопных методов необходимо отнестись с позиции четырехмерного или даже пятимерного моделирования (т.е. тектоническая эволюция осадочного бассейна и изменение изотермического рельефа в пространстве и в геологическом времени).

Учитывая все ранее изложенное, можно сказать, что радиоизотопные методы имеют следующие преимущества:

— методы могут быть применены для осадочных бассейнов со сложным тектоническим развитием;

— возможно применение метода для исследования термо-тектонической эволюции предполагаемых структурных ловушек;

— метод использует широко распространенные акцессорные минералы (апатит, циркон, титанит и т.д.) в терригенных осадочных породах (песчаники, алевролиты и т.д.);

— метод (U-Th)/He позволяет рассчитывать палеотемпературы (палеоизотермы) и время температурного воздействия на горные породы с точностью до $\pm 5\%$;

— использование метода (U-Th)/He в комбинации с трековым датированием позволяет, во-первых, контролировать полученные одним из методов результаты и, во-вторых, охватить достаточно большой геотермический диапазон для термотектонических исследований (приблизительно от 40 до 310 °С и более);

— в отличие от других (кристалличность иллита, изучение смешанно-слойных смектит-иллитовых глинистых минералов и R°), радиоизотопные методы дают подробную информацию о термо-тектонической эволюции осадочных бассейнов, так как позволяют проследить изменение палеотемпературы в геологическом времени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Tissot B.P., Welte D.H.* Petroleum formation and occurrence. — New York: Springer-Verlag, 1984.
- [2] *Vassoévich N.V.* Selected works. Geochemistry of organic matter and origin of petroleum. — М.: Nauka, 1986.
- [3] *Бурцев М.И.* Поиск и разведка месторождений нефти и газа: Учебник. — М.: Изд-во РУДН, 2006. [*Burtsev M.I.* Poisk i razvedka mestorogdenij nefiti i gaza: Uthebnik. — М.: Izd-vo RUDN, 2006.]
- [4] *Crowhurst P.V., Green P.F., and Kamp P.J.J.* Appraisal of (U-Th)/He apatite thermochronology as a thermal history tool for hydrocarbon exploration: an example from the Taranaki Basin, New Zealand // AAPG Bull. 86 (10), 2002, 1801—1819.
- [5] *Farley K.A.* Helium diffusion from apatite: general behavior as illustrated by Durango fluorapatite // J. Geophys. Res., 2000. 105:2903—14.
- [6] *Farley K.A.* (U-Th)/He dating: techniques, calibrations, and applications. In Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47:819—44. Chantilly, VA: Mineral. Soc. Am., Geochem. Soc.
- [7] *Fleischer R.L., Price P.B., and Walker R.M.* Nuclear Tracks in Solids. Berkely // Univ. Calif. Press., 1975, 605 pp.
- [8] *Ketcham R.A., Donelick R.A., and Carlson W.D.* Variability of apatite fission-track annealing kinetics. III. Extrapolation to geological time scales // Amer. Mineral. 1999, 84:1235—55.

- [9] *Reiners P.W., Brandon M.T.* Using thermochronology to understand orogenic erosion // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006, 34:419—66.
- [10] *Wolfe M.R., and Stockli D.F.* Zircon (U-Th)/He thermochronometry in the KTB drill hole, Germany, and its implications for bulk He diffusion kinetics in zircon // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295:69—82.
- [11] *Coyle D.A., and Wagner G.A.* Positioning the titanite fission-track partial annealing zone // *Chemical Geology*, 1998, 149:117—125.
- [12] *Соловьев А.В.* Термальная история нефтегазоносных бассейнов: метод трекового датирования детритового апатита // *Бурение и нефть*. — 2009. — № 3. — С. 26—27. [*Soloviev A.V.* Termalnaja istorija neftegazovyh bassejnov // *Burenje i neft* — 2009. — № 3. — S. 26—27.]
- [13] *Collo G., Do Campo M., y Astini R.A.* Caracterización mineralógica, microestructural e historia posdeposicional de la Formación La Aguadita, Sistema de Famatina, La Rioja, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 22, núm. 3, p. 283—297.
- [14] *Kübler B., and Jaboyedoff M.* Illite crystallinity: concise review paper. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences—Series IIA—Earth and Plan. Sc.*, 2010, V. 331, issue 2, pp. 75—89.
- [15] *Quigley T.M., and Mackenzie A.S.* The temperature of oil and gas formation in the subsurface // *Nature*, 1988, v. 333, pp. 549—552.
- [16] *Noriko Hasebe, Jocelyn Barbarand, Kym Jarvis, Andrew Carter, and Anthony J. Hurfor* Apatite Fission-Track chronometry using laser ablation ICP-MS // *Chemical Geology*, 2004, v. 207, pp. 135—145.
- [17] *Wagner G.A., and Van den Haute P.* Fission-track dating. Verlag, Stuttgart, 1992, 1—285.
- [18] *Бурцев М.И.* Поиск и разведка месторождений нефти и газа: Учебник. — М.: Изд-во РУДН, 2006. [*Burtsev M.I.* Poisk i razvedka mestorogdenij nefi i gaza: Uthebnik. — М.: Izd-vo RUDN, 2006.]
- [19] *Карцев А.А., Лопатин Н.В., Соколов Б.А. и др.* Торжество органической (осадочно-миграционной) теории нефтеобразования к концу XX в. // *Геология нефти и газа*. — 2001. — № 3. — С. 2—5. [*Kartsev A.A., Lopatin N.V. i dr.* Torgestvo organiteskoj teorii nefteobrazovaniya k kontsu XX v. // *Geologija nefi i gaza*. — 2001. — 3. — S. 2—5.]

THERMOTECTONIC HISTORY RECONSTRUCTION OF SEDIMENTARY BASINS USING (U-TH)/HE DATING OF DETRITAL APATITES

F.R. Abdullin¹, N.V. Pavlinova²

¹National Autonomous University of Mexico, Geological Institute

²People's Friendship University of Russia

Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

This paper discusses the dating of detrital apatite with (U-Th)/He method and its application for the thermotectonic history reconstruction of sedimentary basins and hydrocarbon exploration.

Key words: thermochronology, sedimentary basin, (U-Th)/He, helium partial retention zone, apatite, zircon, titanite, paleotemperature.