

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 553.495(510)+552.52

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДООБРАЗОВАНИЯ ДУНШЭНСКОГО  
УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВПАДИНЫ ОРДОС  
(Центральный Китай)

Ли Жунси<sup>1, 2</sup>, Ли Ючжу<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*School of Earth Science and Resources, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an, 710054, China*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Mineral Resources and Geology Engineering of West China, Education Ministry of China, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China*

Дуншэнское урановое месторождение, расположенное в северной части впадины Ордоос на севере Центрального Китая, является одним из наиболее крупных месторождений Китая. Месторождение локализовано в песчаниках чжилоской свиты средней юры. Источник рудного вещества связан с богатыми ураном кристаллическими породами Иньшаньской и Дациншаньской орогенических зон в северной части впадины. Месторождение обладает характерными признаками песчаникового уранового месторождения межпластовой окислительной зоны, в том числе особенностями гидротермального изменения пород. На месторождении отчетливо проявлена литологическая и минеральная зональность оруденения. Песчаники окислительной зоны — пестрые, заметно подвергаются изменению окислительного характера, а песчаники восстановительной зоны — серые, светло-серые, средне- и крупнозернистые, для них характерны альбитизация, карбонатизация, хлоритизация, эпидотизация и пиритизация. Рудоносные песчаники приурочены к переходной зоне окисления—восстановления, но в основном — к восстановительной зоне. Среди урановых минералов преобладает высокотемпературный коффинит, редко встречаются браннерит и уранинит. Температура гомогенизации флюидного включения в цементе песчаников месторождения составляет 150—160 °С. На основе геологического анализа авторы полагают, что гидротермальное изменение уранового месторождения тесно связано с одновременным региональным магматическим термальным событием бассейна Ордоос и района Северного Китая.

*Урановое месторождение песчаникового типа, межпластовая окислительная зона, изменение, кайнозойская термальная аномалия, впадина Ордоос.*

THE GEOLOGIC FEATURES OF MINERALIZATION AT THE DONGSHENG  
URANIUM DEPOSIT IN THE NORTHERN ORDOS BASIN (Central China)

Li Rongxi and Li Youzhu

The Dongsheng uranium deposit, localized in the northern Ordos Basin in north-central China, is among the largest deposits of this type in China. It occurs in the sandstones of the Middle Jurassic Zhiluo Formation. The crystalline rocks of the Yinshan and Daqingshan orogenic belts in the northern Ordos Basin are the source of uranium for the deposit. The Dongsheng deposit shows the main characteristics of a sandstone uranium deposit of interstratal oxidation zone, including specific hydrothermal rock alteration. It displays distinct lithologic and mineral zoning. The sandstones of the oxidation zone are variegated and oxidized, and the sandstones of the reduction zone are gray and light gray medium- to coarse-grained and underwent albitization, carbonatization, chloritization, epidotization, pyritization, etc. Ore-bearing sandstones occur in the transitional oxidation-reduction zone, being confined mainly to the reduction zone. Uranium minerals are predominant high-temperature coffinite and subordinate brannerite and uraninite. The homogenization temperature of fluid inclusion in the sandstone cement is 150–160 °C. The performed geological analysis suggests that the hydrothermal alteration of the uranium deposit is intimately related to the synchronous Mesozoic regional magmatic events in the Ordos Basin.

*Sandstone uranium deposit, interbed oxidation zone, alteration, Mesozoic thermal anomaly, Ordos Basin*

## ВВЕДЕНИЕ

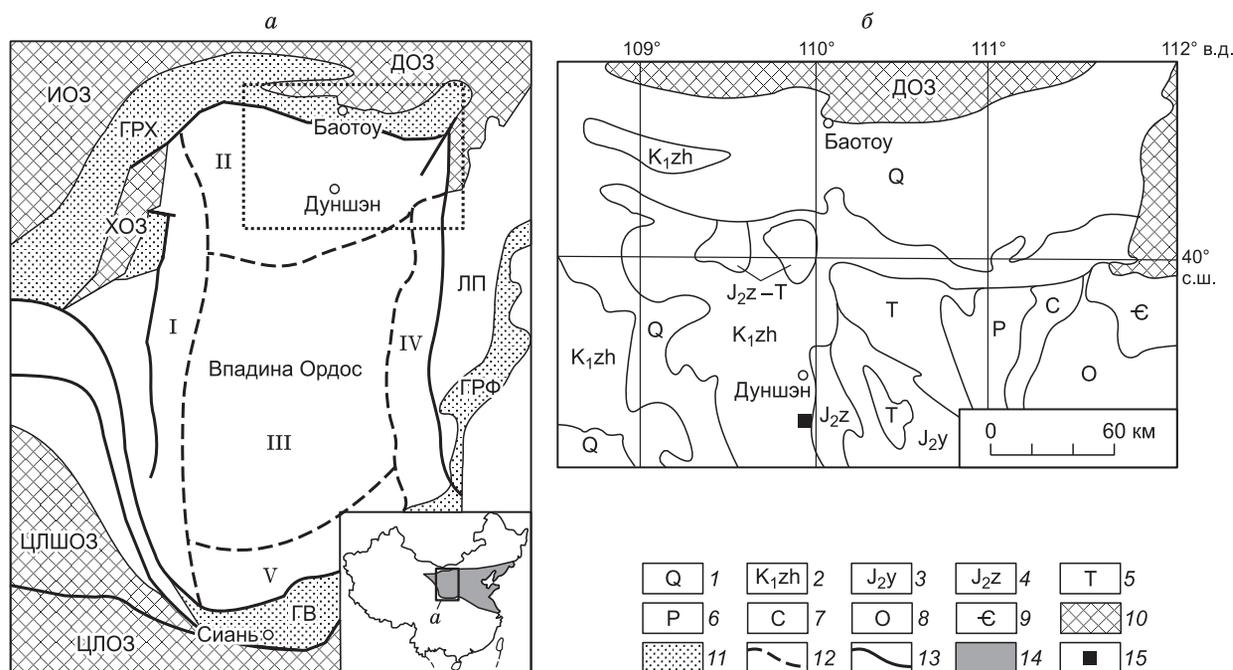
Во впадине Ордос сосредоточены богатые залежи угля, нефти, природного газа, и в настоящее время она является важной минерально-сырьевой и энергетической базой Китая [Dai Jinxing, 2000; Ma Xinhua, 2005; Yongtai Yang et al., 2005; Liu Chiyang et al., 2006]. Геологическое исследование урановой руды в северной части впадины было начато в конце 1960-х годов, тогда были обнаружены некоторые урановые рудопроявления песчаникового типа и аномалии в речных песчаниках свит Чжило ( $J_2z$ ) и Яньань ( $J_2y$ ) юрского периода. После 80-х годов прошлого века с учетом достижений в развитии теории экзогенного рудообразования были проведены геологические исследования по переоценке перспектив впадины Ордос на выявление урановых месторождений песчаникового типа [Zhang Ruliang, 2004; Chen Daisheng, 2004; Xiang Weidong et al., 2005, 2006]. В ходе разведочных работ в северной части впадины было установлено урановое месторождение Дуншэн, которое является одним из наиболее крупных месторождений Китая.

В последние годы некоторые исследователи, предварительно изучавшие и анализировавшие особенности данного уранового месторождения, относят его к песчаниковому типу в межпластовой окислительной зоне. По их данным, воды, содержащие кислород и уран ( $U^{6+}$ ), проникают в водопроницаемые песчаники, подошва и кровля которых сложены из водоупорных горизонтов пелитов, и далее перемещаются по пласту до встречи с восстановительным барьером, где ион  $U^{+6}$  восстанавливается и осаждается в виде минерала с образованием урановых и рудных тел роллового типа [Dahlkamp, 1993; Huang Shijie, 1994; Underhill, 2000; Chen Fading, 2002; Wu Rengui et al., 2006]. Результаты исследования показывают, что температура рудообразования на изучаемом месторождении более высокая, чем температуры экзогенных вод при нормальном осадконакоплении [Xiao Xinjian et al., 2004; Zhang Fuxin et al., 2006]. Следует отметить, что урановое месторождение Дуншэн заметно отличается от типичных урановых месторождений песчаникового типа в межпластовой окислительной зоне в Илийской впадине Синьцзян и в некоторых впадинах Средней Азии. Исследование показывает, что руды месторождения обогащены Zr, Hf и другими характерными элементами, а также легкими редкоземельными элементами, что указывает на связь урановой минерализации с магматическими (мантийными) флюидами [Li Rongxi, Wang Xingli, 2007]. Изучая изотопные и геохимические характеристики минералообразующих растворов уранового месторождения, некоторые считают, что в их образовании участвовали эндогенные флюиды. Из этого следует, что данное месторождение является более сложным по генезису и требует проведения более детальных геологических и геохимических исследований.

## РЕГИОНАЛЬНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФОН

Впадина Ордос находится в западной части Северо-Китайской платформы (рис. 1). Она является крупной внутриконтинентальной мезозойской осадочной впадиной [Sun et al., 1989; Zhang Hong et al., 1995; Li Rongxi, Li Youzhu, 2008]. Фундамент впадины сложен архейскими и раннепротерозойскими метаморфическими породами. От среднего протерозоя до конца палеозоя впадина была частью Северо-Китайского блока, и эволюционная история ее геологического развития сходна с историей последнего [Huang Jiqing et al., 1996; Liu Shaofeng, 1998; Li Rongxi, Li Youzhu, 2008]. От позднего протерозоя до среднего ордовика здесь в основном был платформенный стабильный режим. К концу среднего ордовика Северо-Китайская платформа, включая впадину, испытала воздымание вследствие влияния каледонских тектонических движений. К позднему карбону морская трансгрессия переместилась с востока на запад, в том числе и во впадине. Образовался комплекс морских и континентальных угленосных отложений. Позднее платформа постепенно поднималась, и в конце ранней перми на ней сформировались красноцветные обломочные континентальные отложения [Chen, Wu, 1997; Bradley et al., 2004].

Индосинийское движение, проявившееся в триасе, является важным тектоническим этапом, который оказал влияние на развитие и эволюцию впадины Ордос. Вследствие смещения блока Янцзы на север и его столкновения с Северо-Китайской плитой возникла Циньлинская орогеническая зона. Район Ордос был сильно деформирован с образованием крупной озерной впадины континентального типа [Jiao et al., 1997; Meng Qingren, Zhang Guowei, 1999; Liu, Yang, 2000], обрамленной орогеническими зонами: Иньшаньская и Дациншаньская на севере, Циньлинская на юге, Хэланьшаньская на западе, Люйлянское поднятие на востоке, которые сложены древними метаморфическими породами и гранитами (см. рис. 1). В мезозойское время во впадине Ордос отложился комплекс внутриконтинентальных обломочных пород аллювиальных и озерных фаций. Между некоторыми отдельными осадочными пластами существуют стратиграфические несогласия [Liu Shaofeng, 1998; Bradley et al., 2004; Yang Minghui, Liu Chiyang, 2006]. С начала кайнозоя под влиянием воздымания Цинхай-Тибетского плато впадина быстро поднималась, в то же время вокруг нее возник ряд кайнозойских грабенов, в том числе грабены Вэйхэ на юге, в излучине р. Хуанхэ на севере, грабен Фэньхэ на востоке и др. [Zhang et al., 1998]. По истории



**Рис. 1. Схематическая геологическая карта Дуншэнского района в северной части впадины Ордов (Центральный Китай).**

*a* — регионально-геологическая карта впадины Ордов; *б* — геологическая карта Дуншэнского района.

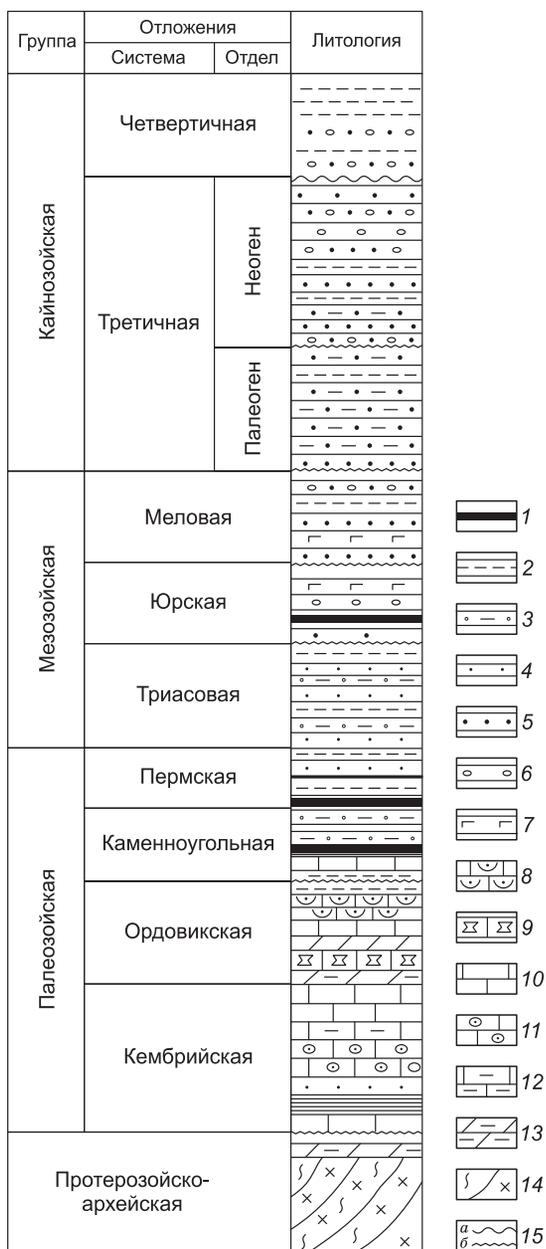
1 — четвертичная система; 2 — чжиданьская серия нижнего мела; 3 — яньаньская свита средней юры; 4 — чжилоская свита средней юры; 5 — триасовая, 6 — пермская, 7 — каменноугольная, 8 — ордовикская, 9 — кембрийская, 10 — докембрийская системы; 11 — кайнозойский грабен; 12 — грани тектонических элементов; 13 — крупные региональные разломы; 14 — Северо-Китайский блок; 15 — урановое месторождение. I — депрессия Тяньхуань; II — поднятие Имэн; III — Северное Шэньси; IV — флексурная зона Западного Шаньси; V — Вэйбэйское поднятие. ГВ — грабен Вэйхэ; ГРХ — грабен р. Хуанхэ; ГРФ — грабен р. Фэньхэ; ДОЗ — Дациншаньская орогеническая зона; ЦЛОЗ — Циньлинская орогеническая зона; ИОЗ — Иньшаньская орогеническая зона; ЦЛШОЗ — Циляншаньская орогеническая зона; ХОЗ — Хэляншаньская орогеническая зона; ЛП — Люйлянское поднятие.

развития впадины и ее современной структуре она обычно подразделяется на шесть тектонических блоков: Имэнское и Вэйбэйское поднятия, надвиговую зону Западного края, флексурную зону Западного Шаньси, прогиб Тяньхуань и Северное Шэньси [Zhang Hong et al., 1995]. Дуншэнское урановое месторождение песчаникового типа расположено на Имэнском поднятии северной части впадины около г. Дуншэн, находящегося в центре Внутренней Монголии (см. рис. 1).

Во впадине Ордов сосредоточены крупные ресурсы нефти, газа и угля. Раннепалеозойские карбонатные и позднепалеозойские угленосные материнские породы являются основным источником природного газа впадины. Обнаруженные здесь коллекторы природного газа являются в основном корой выветривания на кровле ордовикских верхнепалеозойских отложений. Нефтяные залежи приурочены преимущественно к песчаникам яньчанской свиты верхнего триаса ( $T_3y$ ) и яньаньской свиты средней юры ( $J_2y$ ) [Wang Shuangming, Zhang Yuping, 1999; Yongtai Yang et al., 2005]. Месторождения угля связаны главным образом с каменноугольно-пермскими угленосными отложениями и приурочены к области смены морских и континентальных фаций яньаньской свиты [Zhang Hong et al., 1995]. Исследование впадины показывает, что ее северная часть является местом накопления и миграции газа к поверхности, где и сейчас наблюдаются переходы газовых струй [He Zixin, 2003; Ma Yanping et al., 2007]. Некоторые авторы считают, что природный газ играет важную роль в образовании изученного уранового месторождения песчаникового типа [Xiao Xinjian et al., 2004; Ma Yanping et al., 2007; Li Ziying et al., 2007].

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Урановое месторождение Дуншэн находится в центральной и восточной частях Имэнского поднятия впадины Ордов. Приразломный прогиб р. Хуанхэ как тектоническая граница отделяет Имэнское поднятие на юге от Иньшаньской и Дациншаньской орогенических зон на севере. Другие разломы на севере отделяют это поднятие от структур Северного Шэньси, прогиба Тяньхуань и флексурной зоны



**Рис. 2. Стратиграфическая и литологическая колонки впадины Ордос.**

1 — угольный пласт; 2 — пелиты; 3 — алевролиты; 4 — песчаники; 5 — гриты; 6 — конгломераты; 7 — вулканические туфы; 8 — биокластические известняки; 9 — гипсовые соли; 10 — известняки; 11 — оолитовые известняки; 12 — мергели; 13 — глинистые доломиты; 14 — метаморфические породы; 15 — несогласие: а — межформационное, б — внутриформационное.

Западное Шаньси на юге (см. рис. 1). Как и впадина, район уранового месторождения также сложен пологозалегающими отложениями, их угол падения составляет 1—3°. Они представлены с востока на запад (от древних к молодым) докембрийскими метаморфическими породами, раннепалеозойскими платформенными карбонатными породами, позднепалеозойскими морскими и континентальными угленосными отложениями и мезозойскими речными и озерными обломочными породами (рис. 2).

### Отложения породы

Мезозойские осадочные отложения изученного района представлены в основном поздне триасовой яньчанской свитой ( $T_3y$ ), в том числе нефтеносными породами впадины Ордос (табл. 1). Юрская система сложена отложениями среднего и нижнего отделов, а верхний — отсутствует. Фусяньская свита ( $J_1f$ ) нижней юры включает комплекс красных аллювиальных песчаников большой мощности, яньаньская свита ( $J_2y$ ) средней юры — континентальный угленосный пласт, чжилоская свита ( $J_2z$ ) средней юры — комплекс пестроцветных песчаников, который с угловым несогласием перекрывается угленосной яньаньской свитой ( $J_2y$ ) средней юры. В изученном районе отсутствуют породы верхнего мела, а чжиданьская серия ( $K_1z$ ) нижнего мела представлена аллювиальными отложениями. Урановое месторождение приурочено к чжилоской свите ( $J_2z$ ) средней юры, мощность которой составляет примерно 100 м. Чжилоская свита по литологии подразделяется на верхнюю и нижнюю пачки. Верхняя ( $J_2^2z$ ) сложена пестрыми (желтыми, красными и

серо-зелеными) средне- и мелкозернистыми песчаниками и пелитами. Нижняя пачка ( $J_2^1z$ ) подразделяется на две подпачки — верхняя ( $J_2^{1-2}z$ ) представляет комплекс серо-зеленых пелитов, алевролитов и песчаников, нижняя ( $J_2^{1-1}z$ ) сложена серыми и светло-серыми средне- и крупнозернистыми аллювиальными песчаниками, перекрывающимися тонким угольным пластом. Урановая руда приурочена к крупнозернистым песчаникам нижней подпачки, кровля урановой руды представляет собой серо-зеленые пелиты, подошва — белый пласт каолина яньаньской кровли. В местных угольных бассейнах каротажная естественная гамма-аномалия выявляется в основном в средне- и крупнозернистых песчаниках нижней субпачки [Zhang Hong et al., 1995; Xiao Xinjian, 2004].

Полевое геологическое изучение, сопоставление разрезов и их комплексный анализ показывают, что по цвету песчаников ураносное песчаное тело нижней части чжилоской свиты исследованного района подразделяется на три зоны с севера на юг (рис. 3, табл. 2). В северном и северо-восточном денудационном районах присутствуют желтые песчаники, в среднем — серо-зеленые, а в южном — серые. Эти три зоны на самом деле были образованы в разных диагенетических обстановках: желтая — в окислительной, серо-зеленая — в промежуточной (окислительно-восстановительной), серая — в восстановительной зонах [Chen Fading, 2002; Xiao Xinjian, 2004]. По вертикальному направлению урановое месторождение песчаникового типа подразделяют на три литологические пачки сверху вниз (см. рис. 3). Верхняя пачка соответствует верхней пачке чжилоской свиты ( $J_2^2z$ ) и представляет собой пестрые (фио-

Таблица 1. Мезозойская стратиграфическая колонка Дуншэнского уранового месторождения

Отложения			Осадочные особенности и литологическое описание
Система	Отдел	Свита	
Меловая	Верхний		Денудирован
	Нижний	Чжиданьская (K <sub>1</sub> zh)	Красноцветные конгломераты, песчаники с прослоями алевролитов и сланцев
Юрская	Верхний		Денудирован
	Средний	Чжилоская (J <sub>2</sub> z)	Верхняя часть — пестрые средне- и мелкозернистые песчаники с прослоями пелитов; средняя — комплекс серо-зеленых мелкозернистых песчаников и алевролитов с тонкими прослоями сланцев; нижняя — средне- и крупнозернистые известняки, светло-серые песчаники
		Яньаньская (J <sub>2</sub> y)	Серые песчаники и конгломераты с прослоями пелитов, сланцев и тонких угольных пластов
Нижний	Фусяньская (J <sub>1</sub> f)	Переслаивание речных красноцветных песчаников со сланцами	
Триасовая	Верхний	Яньчанская (T <sub>3</sub> y)	Желтые песчаники и сланцы, содержащие тонкий угольный пласт в кровле

летово-красные, желтые, серо-зеленые) средне- и мелкозернистые песчаники, алевролиты с прослоями пелитов. Промежуточная — верхней субпачке нижней пачки чжилоской свиты (J<sub>2</sub><sup>1-2</sup>z) и состоит из серо-зеленых пелитов, алевролитов и песчаников. Нижняя соответствует нижней субпачке нижней пачки чжилоской свиты (J<sub>2</sub><sup>1-1</sup>z), сложенной серыми, светло-серыми средне- и крупнозернистыми песчаниками, и содержит в себе богатые углистые обломки. Урановое рудное тело находится между промежуточной и нижней пачками, его распределение контролируется контактом серо-зеленых и серых средне- и крупнозернистых песчаников. Аномальные пики, показанные каротажем в разведочных скважинах, появляются около границы серо-зеленых и серых средне- и крупнозернистых песчаников [Zhang Hong et al., 1995; Xiao Xinjian, 2004].

Полевые наблюдения показывают, что ширина промежуточной серо-зеленой зоны по латерали достигает примерно 20 км. По керну скважин установлено, что встречающиеся обломки углистых терри-

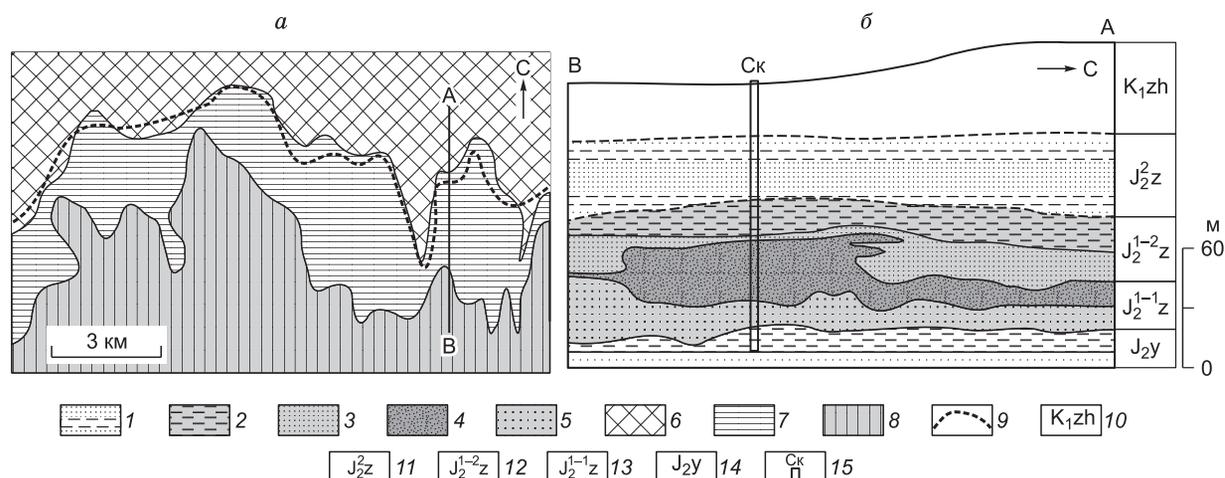


Рис. 3. Схематическая геологическая карта Дуншэнского уранового месторождения впадины Ордос, по [Xiao Xinjian et al., 2004] с дополнениями авторов.

*a* — геологическая зональность на Дуншэнском урановом месторождении; *б* — геологический разрез Дуншэнского уранового месторождения;

1 — пестрые средне- и крупнозернистые песчаники с прослоями сланцев; 2 — серо-зеленые сланцы и алевролиты с прослоями песчаников; 3 — серо-зеленые средне- и крупнозернистые песчаники; 4 — урановое рудное тело; 5 — серые и светло-серые средне- и крупнозернистые песчаники; 6 — окислительная зона; 7 — окислительно-восстановительная зона; 8 — восстановительная зона; 9 — фронтальный край окислительной зоны; 10 — чжиданьская серия; 11 — верхний разрез чжилоской свиты; 12 — верхняя часть нижнего разреза чжилоской свиты; 13 — нижняя часть нижнего разреза чжилоской свиты; 14 — яньаньская свита; 15 — скважина.

Таблица 2. Расчленение зоны окисления—восстановления уранового месторождения Дуншэн и ее особенности

Свита, пачка	Горные породы	Вторичные минералы	Тип изменения	Зона окисления—восстановления	
Верхняя пачка чжилоской свиты ( $J_2^{2Z}$ )	Пестрые (фиолетово-красные, желтые, серо-зеленые) средне- и тонкозернистые песчаники, алевролиты с прослоями пелитов	Каолин, аномит, лимонит, микритовый кальцит	Каолинизация плагиоклаза, аномитизация и лимонитизация биотита	Окислительная	
Нижняя пачка чжилоской свиты ( $J_2^1Z$ )	верхняя суб-пачка ( $J_2^{1-2Z}$ )	Серо-зеленые пелиты, алевролиты и песчаники	Каолин, зеленая слюда, хлорит, кальцит, пирит	Каолинизация плагиоклаза, зеленая слюдизация и хлоритизация биотита, пиритизация, карбонатизация	Промежуточная
	нижняя суб-пачка ( $J_2^{1-1Z}$ )	Серые, серо-белые, средне- и крупнозернистые песчаники (рудоносная пачка)	Альбит, эпидот, хлорит, мусковит, кальцит, пирит	Альбитизация плагиоклаза, эпидотизация, мусковитизация, пиритизация и карбонатизация	Восстановительная

генных пород в серо-зеленых песчаниках промежуточной пачки имеют следы окисления, лимонитизации. Поэтому некоторые ученые считают, что серо-зеленая зона должна быть древней межпластовой окислительной зоной, так как фронтовая линия последней находится на границе серо-зеленой и серой зон [Chen Fading, 2002].

### Источники терригенного материала и урана

Материальный источник является важной вещественной основой рудообразования уранового месторождения песчаного типа. Породы чжилоской свиты данного района во впадине в основном представлены детритово-полевошпатовыми песчаниками. Песчаники средне- и слабосортированы, обломочный материал угловатой формы, окатанность средняя и плохая, что отражает недлительный перенос обломков. Обломочные зерна составляют 25—45 % объема породы. Преобладают обломки метаморфических пород и гранитов. Содержание слюд, среди которых преобладает биотит, варьирует в интервале 5—20 %. Тяжелые минералы представлены главным образом гранатом, эпидотом, апатитом, рутилом и др. Изучение материального источника песчаников показывает, что обломки песчаников чжилоской свиты Дуншэнского месторождения сложены в основном породами Иньшаньской орогенической зоны в северной части впадины Ордос и Дациншаньского денудационного района в северо-восточной части [Xiao Xinjian, 2004].

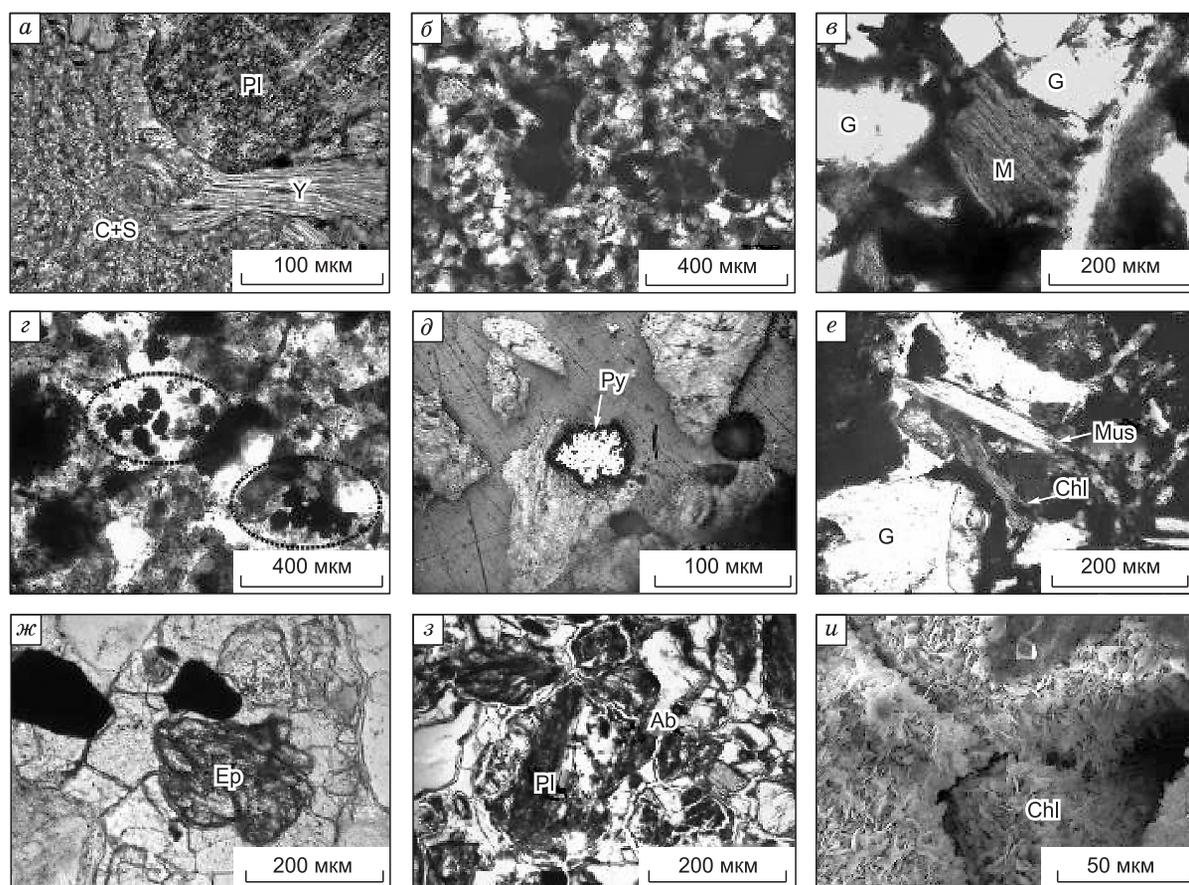
Иньшаньская и Дациншаньская орогенические зоны состоят из архейских и протерозойских кристаллических пород суммарной мощностью более 2600 м. Среди них преобладают кварциты, гнейсы, гранулиты, лептиты, зеленые сланцы и другие метаморфические породы, а также туфы, липариты. Кроме того, в структурах обрамления Иньшаньской и Дациншаньской орогенических зон отмечаются многочисленные гранитные интрузивы, например Ланшаньский, Иньшаньский и другие гранитные массивы. Они образуют центральную гранитную зону Внутренней Монголии. Среди них установлены граниты протерозойского, каледонского, варисцийского, индосинийского, яньшаньского возрастов. Преобладают средне- и поздневарисцийские и яньшаньские граниты. Акцессорные минералы представлены преимущественно цирконом, магнетитом, апатитом, сфеном и монацитом. В данном районе варисцийские граниты обычно содержат в себе уран более  $7.8 \times 10^{-6}$  г/т, в них было обнаружено несколько урановых рудопоявлений, установлен уранинит [Chen Daisheng, 2004]. Кроме того, в Иньшаньской орогенической зоне широко развит разновозрастной вулканизм. Эффузивные толщи среднекислого и среднего составов архейской улашаньской серии, а также позднепалеозойского возраста мощностью до нескольких километров отличаются высоким содержанием урана [Chen Daisheng, 2004]. В связи с этим многие исследователи считают [Chen Fading, 2002; Chen Daisheng, 2004], что источником урана месторождения Дуншэн являются обогащенные этим элементом породы Иньшаньской и Дациншаньской орогенических зон. Представляется, что во время осадконакопления уран вместе с обломочным материалом и позже окисленными поверхностными и подземными водами приносился в осадочные породы чжилоской свиты, что явилось основой для его эпигенетического перераспределения и последующей концентрации при рудообразовании [Chen Fading, 2002].

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОД НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

### Минеральный состав пород

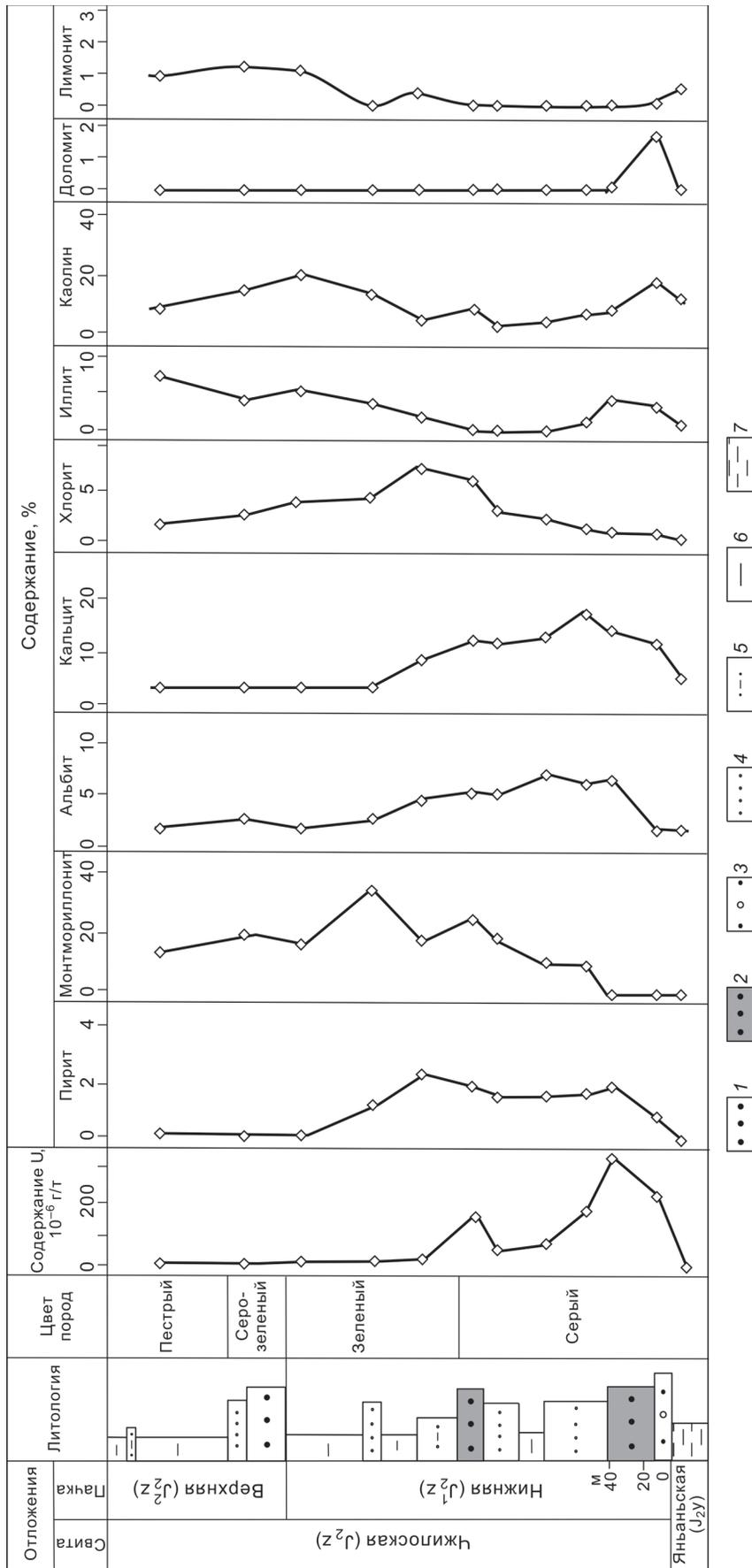
Обломочный материал в песчаниках Дуншэнского уранового месторождения представлен минералами (кварц, полевой шпат и биотит) и породами (метаморфические, вулканические и кислые граниты). Песчаники разных пачек имеют сходный состав, но они подвергались разным по типу изменениям (см. табл. 2). Наблюдение под микроскопом показывает, что в окислительной зоне пестрые песчаники повсеместно подвергались изменению, глинистая часть в них в некоторой степени карбонатизировалась, серицитизировалась, аргиллизировалась (рис. 4, *а*). Полевой шпат большей частью каолинитизирован (см. рис. 4, *а*), биотит замещен хлорит-серицитовым агрегатом (см. рис. 4, *б, в*) и лимонитизирован (см. рис. 4, *з*).

Песчаники восстановительной зоны являются рудоносными. В них установлен коффинит как главный урановый минерал, редко встречаются браннерит и уранинит, ассоциирующие с пиритом [Xiao Xinjian et al., 2004; Zhang Fuxin et al., 2006]. Рудоносные песчаники обогащены растительным детритом и обильным пиритом в виде вкрапленности и тонкозернистых масс (см. рис. 4, *д*), а биотит замещен хлоритом, часто ассоциирующим с мусковитом (см. рис. 4, *е*). В рудоносных песчаниках содержатся также эпидот (см. рис. 4, *ж*), альбит (см. рис. 4, *з*). Минералогические исследования показали, что минераль-



**Рис. 4.** Микроскопические фотографии, иллюстрирующие особенности минерализации и изменения пород Дуншэнского уранового месторождения.

*а* — глинистый цемент песчаников окислительной зоны был превращен в иллит (Y), серицит и микритовый карбонатный минерал (C+S), а обломок плагиоклаза (Pl) был серицитизирован, николи  $\times$ ; *б* — особенности пестрых песчаников окислительной зоны: коричневая слюда, светлые или бесцветные обломочные зерна, при одном поляроиде; *в* — особенности коричневой слюды (M) и обломочного зерна (G) пестрых песчаников в окислительной зоне, при одном поляроиде; *г* — лимонит в пестрых песчаниках окислительной зоны (черные круглые тела, околтуренные пунктиром) при одном поляроиде; *д* — пирит (Py) в песчаниках месторождения, отраженный свет; *е* — замещение биотита хлоритом (Chl) в песчаниках, ассоциирован с мусковитом (Mus), при одном поляроиде; *ж* — эпидот (Ep) в песчаниках, при одном поляроиде; *з* — плагиоклаз (Pl), претерпевший альбитизацию (Ab), виден первичный контур, чистая часть внутри плагиоклаза и светлая кайма по периферии — альбит (Ab), при одном поляроиде; *и* — агрегаты аутигенного хлорита в зеленых песчаниках под сканирующим электронным микроскопом.



**Рис. 5. Вариация содержания аутигенных минералов, пересекающих разные геологические зональности.**

1—3 — крупнозернистый песчаник; 2 — с урановой рудой; 3 — с галькой; 4 — песчаник; 5 — алевролит; 6, 7 — с угольным пластом.

ные ассоциации измененных рудоносных песчаников месторождения сложены альбитом, карбонатом, хлоритом, эпидотом, пиритом, мусковитом и другими. Это говорит о том, что рудообразующие растворы являлись низкотемпературными гидротермальными.

Серо-зеленые песчаники в переходной зоне претерпели изменения не только в окислительной, но и в восстановительной обстановке, с чем связаны особенности их минерального состава и окраски (см. рис. 4, и).

На рис. 5 представлены результаты рентгеноструктурного анализа основных аутигенных минералов по вертикальному разрезу месторождения. Установлено, что сверху вниз последовательно в окислительной, окислительно-восстановительной (переходной) и восстановительной зонах содержания лимонита, каолина, кальцита, монтмориллонита, пирита, альбита, эпидота и других минералов закономерно меняются. Во вмещающих песчаниках месторождения, а также в пелитах его подошвы и кровли содержание лимонита и кальцита очень низкое, но рудоносные песчаники содержат в себе большое количество кальцита, пирита, монтмориллонита, альбита, эпидота и других минералов.

### Температура рудообразования уранового месторождения

Формирование изученного месторождения связано с процессами диагенеза вмещающих пород и их последующими эпигенетическими гидротермальными преобразованиями. Для изучения физико-химических условий образования урановой руды авторами проведены исследования флюидных включений в аутигенных минералах из песчаников методами термо- и криометрии. Соленость включения была рассчитана с помощью уравнения Боднара [Bodnar, 1993] по температуре плавления льда. Измерение включения было выполнено в лаборатории Чанъаньского университета на термодиагностической установке (Heating/Freezing stage) модели THMS600.

На рис. 6 показаны температуры гомогенизации флюидного включения в цементе песчаников месторождения, которые выявляют два интервала значений: 120—130°C и 150—160°C. Соленость растворов составляет обычно 0.8—15.0 %, в том числе газожидких включений 0.5—9.0 %, а соленость растворов многофазных включений, содержащих кубические кристаллики NaCl, более высокая, максимально достигает 27.72 % (температура эвтектики состава — 70.2°C). Соленость твердожидкого включения, содержащего NaCl, достигает 29 %. Используя состояние системы NaCl—H<sub>2</sub>O [Bodnar, 1983], авторы определили плотность растворов флюидных включений (0.9—1.0 г/см<sup>3</sup>) при условиях около 120—170°C. Из аналитических результатов, представленных выше, следует, что рудообразующие растворы изученного уранового месторождения являются низкотемпературными (150—160°C) высококонцентрированными гидротермальными флюидами.

Это согласуется и с составом минеральных парагенезисов урановых руд. В руде преобладает коффинит как главный урановый минерал, иногда встречается браннерит и уранинит, которые ассоциируют с пиритом. Такая ассоциация урановых минералов отражает, с одной стороны, восстановительную обстановку, а с другой, — повышенные температуры их образования. Все это свидетельствует о гидротермальном генезисе основных руд месторождения Дуншэн.

### ОБСУЖДЕНИЕ

По геологическим и геофизическим данным фундамент Имэнского поднятия сложен древними метаморфическими и гранитными породами. Он перекрыт мощным (до 3000 м) фанерозойским осадочным чехлом [Zhang Hong et al., 1995]. Процессы воздымания района впадины Ордос произошли в мезозое. Позднепалеозойские континентально-морские угольные отложения сменились внутриконтинентальными озерно-речными. Анализ стратиграфической документации показывает, что Дуншэнский район испытал многократные крупные тектонические движения с раннего палеозоя. Это привело к тому, что раннепалеозойские, позднепалеозойские и мезозойские отложения подвергались денудации в разной степени [Sun, 1989; Wu Rengui, 2003]. Результаты предыдущих исследований показывают, что в юрско-меловой период палеогеоморфология впадины имела следующие особенности: северная часть была приподнятой, а южная — опущенной, поэтому течение подземных вод и снос материала происходили с севера на юг [Chen Fading, 2002]. Обломки

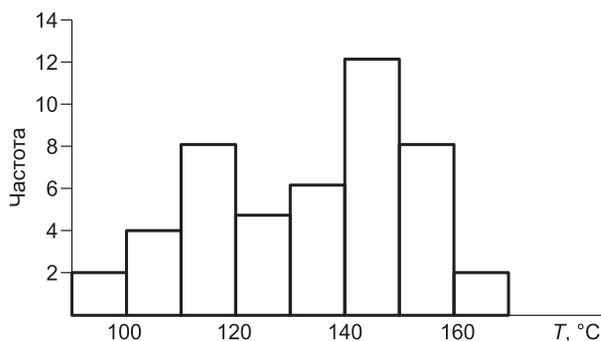


Рис. 6. Температура гомогенизации флюидного включения.

обогащенных ураном метаморфических пород и гранитов, распределяющихся на большой площади в орогенических зонах Иньшань и Дациншань, были перенесены поверхностными водами в данный район с образованием комплекса среднеюрских чжилоских песчаников, содержащих в себе обломочные зерна урановых минералов. После формирования чжилоской свиты вплоть до окончания раннего мела область, расположенная к северу от данного района, постоянно находилась в обстановке поднятия и денудации, поэтому заметной складчатости не образовалось. Залегание отложений выполаживается с севера на юг, угол падения составляет 1—3°. Выходящая на поверхность чжилоская свита долгое время подвергалась окислению, в то же время фильтрация кислородосодержащих поверхностных вод способствовала развитию внутренней окислительной зоны и образованию урановой минерализации в древней межпластовой окислительной зоне [Huang Shijie, 1994; Chen Fading, 2002; Wu Rengui et al., 2006]. Нижележащая яньчанская свита средней юры сложена черными угленосными породами озерно-болотной и дельтовой фаций, накопившимися в условиях влажного климата. Это создает восстановительные условия для отложения уранового оруденения [Huang Shijie, 1994].

История термальной эволюции впадины Ордос показывает, что в триасовый период палеотермический градиент в ней достигал 5.7°C/100 м [Zhao Mengwei, Hans Jurgen Behr, 1996], в юрско-меловой период — около 4.0°C/100 м [Ren Zhanli, Zhao Chongyuan, 1994]. Вокруг впадины и в ее внутренней части происходила вулканическая и интрузивная деятельность с образованием многих субвулканических массивов, например, Цзыцзиньшаньский щелочной массив, располагающийся в Люйлянском районе к востоку от впадины. Его площадь достигает 23 км<sup>2</sup>, изотопный возраст составляет 125 млн лет [Ren Zhanli, Zhao Chonguan, 1994]. Вулканические туфы широко развиты в мезозойских отложениях впадины, особенно в яньчанской свите поздней юры, где наблюдается множество туфовых пропластков мощностью от нескольких до десятков миллиметров. Они являются маркирующими горизонтами стратиграфического расчленения и корреляции этих отложений [Yang Youyun et al., 2005; Zuo Zhifeng et al., 2008]. Можно полагать, что вулканическая деятельность приводила к развитию региональной геотермической аномалии, активизировавшей миграцию подземных вод, нефти и газа во впадине.

В Дуншэнских ураноносных песчаниках существует большое количество включений УВ, которые создают восстановительные условия для концентрации урана в межпластовой окислительной зоне [Zhang Ruliang, 2004; Ma Yanping et al., 2007], а термическое событие приводит к появлению глубинных гидротермальных растворов. Следы гидротермальной деятельности широко развиты в данном районе в виде кварц-карбонатных жил и гидротермально измененных пород [Xiao Xinjian et al., 2004; Li Rongxi, Wang Xingli, 2007]. При дешифрировании аэромагнитных и дистанционных данных установлено, что в данном районе разломы широко развиты имеют в основном СЗ, СВ и субширотное простирание. Они являются каналами поступления гидротермальных растворов в чжилоские песчаники, содержащие повышенные концентрации урана, с последующим их гидротермальным изменением, активизацией урана и рудообразованием [Zhu Xiyang et al., 2003; Zhang Ruliang, 2004]. Результаты исследования показывают, что возраст процессов рудообразования на месторождении Дуншэн варьирует в интервале 95—120 млн лет [Zhang Ruliang, 2004]. Именно этот временной интервал отвечает периоду проявления яньшаньской тектономагматической активизации [Li Songshen, 1985; Sun Shaohua, 1997].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дуншэнское урановое месторождение песчаникового типа, расположенное в северной части впадины Ордос, является одним из наиболее крупных месторождений, выявленных в последние годы в Китае, и обладает следующими особенностями.

1. Урановое месторождение приурочено к песчаникам нижней пачки чжилоской свиты средней юры. Источником урана в рудах являются докембрийские обогащенные этим элементом кристаллические породы Иньшаньской и Дациншаньской орогенических зон, находящихся в северной части впадины Ордос.

2. Это месторождение обладает основными признаками месторождений, сформировавшихся на окислительно-восстановительном геохимическом барьере в терригенных толщах. Для него характерна латеральная, минеральная и литологическая зональность. Пестрые песчаники окислительной зоны подвергаются карбонатизации, серицитизации, иллитизации, каолинизации, лимонитизации и другим изменениям; а песчаники восстановительной зоны — альбитизации, карбонатизации, хлоритизации, эпидотизации, пиритизации и другим низкотемпературным гидротермальным изменениям. Песчаники переходной зоны, находящиеся между окислительной и восстановительной зонами, представляют в основном зеленые мелкозернистые породы. Они интенсивно хлоритизированы. Рудоносные песчаники находятся в переходной зоне окислительно-восстановительной, но частично смещены в сторону восстановительной зоны.

3. Гидротермальные процессы способствуют накоплению урана в межпластовой окислительной зоне чжилоской свиты, повышению его концентрации и рудообразованию. Среди урановых минералов преобладает относительно высокотемпературный коффинит, редко встречаются браннерит и уранинит. Температура гомогенизации жидких включений в цементе песчаников уранового месторождения составляет 150—160°C. С учетом особенностей низкотемпературного гидротермального изменения рудосодержащих песчаников авторы полагают, что в процессе уранового рудообразования участвовали гидротермальные растворы. Как показывает регионально-геологический анализ, гидротермальное преобразование изученного уранового месторождения в некоторой степени тесно связано с одновременным магматическим термальным событием в бассейне Ордос.

Авторы благодарны специалистам Геологического института ядерной промышленности КНР профессорам Северо-Западного университета КНР Жэнь Чжанли и Ван Цзэньлян, принимавшим участие в полевых исследованиях, профессору Лю Чиян за помощь при работе над статьей.

Работа выполнена при поддержке проекта развития государственного исследования (№ 2003 СВ2146000).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Ли Жунси, Ли Ючжу.** Тектоническая эволюция западной окраины бассейна Ордос (Центральный Китай) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (1), с. 30—35.

**Bodnar R.J.** A method of calculating fluid inclusion volume based on vapour bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids // *Econ. Geol.*, 1983, v. 78, p. 535—542.

**Bodnar R.J.** Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solution // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 683—684.

**Bradley D.R., Andrew D.H., Brian J.D.** Sedimentary record of Triassic intraplate extension in North China: evidence from the nonmarine NW Ordos Basin, Helan Shan and Zhuozi Shan // *Tectonophysics*, 2004, v. 386, p. 177—202.

**Chen Daisheng.** Situation and exploration of sandstone type uranium deposit in Ordos Basin, China. Beijing, Atomic Energy Press, 2004, p. 48—96.

**Chen Fading.** Analysis on paleohydrogeologic conditions and prospects of uranium metallogenesis in northern part of Ordos Basin // *Uranium Geol.*, 2002, v. 18, № 5, p. 287—294.

**Chen J., Wu T.** Regional stratigraphy of North China. Beijing, China University of Geosciences Press, 1997, p. 1—87.

**Dahlkamp F.J.** Uranium ore deposits. Berlin, Springer-Verlag, 1993, p. 1—460.

**Dai Jinxing, Zhong Ningning, Liu Dehan.** Major controlling factor and geological foundation on formation of coal formed gas fields. Beijing, Petroleum Industry Press, 2000, p. 1—164.

**He Zixin.** The evolution of Ordos Basin and its oil and gas. Beijing, Petroleum Industry Press, 2003.

**Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa.** The geotectonic evolution of China. Beijing, Science Press, 1996, p. 78—126.

**Huang Shijie.** Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposit of interlayered oxidation type // *Uranium Geol.*, 1994, v. 10, № 1, p. 6—13.

**Jiao Y., Lu Z., Zhuang Z., Yang S.** Dynamical process and genesis of late Triassic sediment filling in Ordos Basin // *J. China University of Geosciences*, 1997, v. 8, p. 45—48.

**Li Rongxi, Wang Xingli.** Isotope geochemistry of ore fluids for the Dongsheng sandstone-type uranium deposit, China // *Chin. J. Geochem.*, 2007, v. 26, № 2, p. 114—122.

**Li Songshen.** Yanshan movement in North China // *Geosci.*, 1985, v. 6, № 4, p. 20—33.

**Li Ziying, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Xiao Xinjian, Sun Ye, Liu Chiyang, Wang Yi.** Origin of gray-green sandstone in ore bed of sandstone type uranium deposit in north Ordos Basin // *Science in China (Series D, Earth Science)*, 2007, v. 50, Supp.II, p. 165—173.

**Liu Chiyang, Zhao Hongge, Tan Chengqian.** Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization system in the basin // *Oil & Gas Geol.*, 2006, v. 27, № 2, p. 132—142.

**Liu Shaofeng.** The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China // *J. Asian Earth Sci.*, 1998, v. 16, p. 369—383.

**Liu S., Yang S.** Upper Triassic-Jurassic sequence stratigraphy and its structural controls in the western Ordos Basin, China // *Basin Research*, 2000, v. 12, p. 1—18.

**Ma Xinhua.** Natural gas exploration and development situation in Ordos Basin, NW China // *Petroleum Exploration and Development*, 2005, v. 32, № 4, p. 50—53.

**Ma Yanping, Liu Chiyang, Zhao Junfeng, Huang Lei, Yu Lin, Wang Jianqiang.** Characteristics of bleaching of sandstone in northeast of Ordos Basin and its relationship with natural gas leakage // *Science in China (Series D, Earth Science)*, 2007, v. 50, Supp.II, p. 153—164.

**Meng Qingren, Zhang Guowei.** Timing of collision of the North and South China blocks: controversy and reconciliation // *Geol.*, 1999, v. 27, p. 123—126.

**Ren Zhanli, Zhao Chongyuan.** Research to paleogeothermal characteristics of Ordos Basin // *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, v. 12, № 1, p. 56—65.

**Sun Shaohua.** The tectonic thermal event in Ordos Basin // *Chin. Sci. Bull.*, 1997, v. 42, № 3, p. 306—309.

**Sun Z., Xie Q., Yang J.** Ordos Basin — a typical example of an unstable cratonic interior superimposed basin // *Chinese sedimentary basins* / Ed. X. Zhu. New York, Elsevier, 1989, p. 63—75.

**Underhill D.H.** Analysis of uranium supply to 2050 // *IAEA SM*, 2000, v. 362, № 2, p. 548—552.

**Wang Shuangming, Zhang Yuping.** Study on the formation, evolution and coal accumulating regularity of the Jurassic Ordos Basin // *Earth Sci. Frontiers*, 1999, v. 6, № 6, p. 147—155.

**Wu Rengui, Chen Anping, Yu Dagan.** Analysis on depositional system and discussion on ore formation conditions of channel sandstone type uranium deposit: taking Dongsheng area, Ordos Meso-Cenozoic basin as an example // *Uranium Geol.*, 2003, v. 19, № 2, p. 94—99.

**Wu Rengui, Zhu Minqiang, Yu Dagan, Zhou Wanpeng.** Geological characteristics of basal channel sandstone type uranium deposits in the Northern Ordos Basin // *J. East China Institute of Technology*, 2006, v. 29, № 1, p. 1—6.

**Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, Chen Xiaolin, Pang Yaqing, Cheng Huahan.** Geology and origin of the Dongsheng uranium deposit in the Ordos Basin, North China // *Mineral deposit research: meeting the global challenge*. Springer, Germany, 2005, v. 1, p. 327—330.

**Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, Chen Xiaolin, Pang Yaqing, Cheng Huahan.** Metallogenic characteristics and model of Dongsheng Uranium Deposit in Ordos Basin, North China // *Uranium Geol.*, 2006, v. 22, № 5, p. 257—266.

**Xiao Xinjian.** The mineralization geochemistry of the low temperature fluid on the Dongsheng sandstone type uranium deposit, Doctoral dissertation. Beijing Geology Research Institute, Nuclear Industry Company of China, 2004, p. 18—49.

**Xiao Xinjian, Li Ziyang, Fang Xiheng.** The evidences and significances of epithermal mineralization fluid in the Dongsheng sandstone type uranium deposit // *Bull. Miner. Petrol. Geochem.*, 2004, v. 23, № 4, p. 301—304.

**Yang Minghui, Liu Chiyang.** Sequence stratigraphy framework and its control on accumulation of various energy resources in the Mesozoic continental basins in Ordos Basin // *Oil & Gas Geol.*, 2006, v. 27, № 4, p. 563—570.

**Yang Youyun, Wen Xiaofeng, Zhang Pucheng, Wang Pengzhi.** Sedimentary sequence identification and log responses in Yanchang Formation, Ordos Basin // *Well Logging Technology*, 2005, v. 29, № 4, p. 341—344.

**Yongtai Yang, Wei Li, Long Ma.** Tectonic and stratigraphic controls of hydrocarbon systems in the Ordos basin: a multicycle cratonic basin in central China // *AAPG Bulletin*, 2005, v. 89, p. 255—269.

**Zhang Fuxin, Qiao Haiming, Jia Heng.** The metallogenic condition and epigenetic alteration mineralization of Dongsheng Uranium Deposit in the Inner Mongolia // *Acta Geol. Sin.*, 2006, v. 80, № 5, p. 734—739.

**Zhang Hong, Bai Qingzhao, Zhang Xiaohui.** The formation and evolution of Ordos coal basin. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an, 1995, p. 82—120.

**Zhang Ruliang.** Preliminary discussion on relationship between deep basin gas and uranium mineralization in Ordos Basin // *Uranium Geol.*, 2004, v. 20, № 4, p. 213—218.

**Zhang Y.Q., Mercier J.L., Vergely P.** Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of South China with respect to Gobi-Mongolia // *Tectonophys.*, 1998, v. 285, p. 41—75.

**Zhao Mengwei, Hans Jurgen Behr.** Vitrinite reflectance in Triassic with relation to geothermal history of Ordos Basin // *Acta Petrol. Sin.*, 1996, v. 17, № 2, p. 15—23.

**Zhu Xiyang, Wang Yunliang, Wang Zhichang.** Trace element geochemistry of sandstone type uranium deposits in Dongsheng area // *Geol. Geochem.*, 2003, v. 31, № 2, p. 39—45.

**Zuo Zhifeng, Qi Ying, Ge Xiaorui, Guo Xifeng, Yang Youyun, Zhao Junxing.** Effect of Late Triassic volcanic sediment event on hydrocarbon accumulation conditions in Ordos Basin // *J. Lanzhou University (Natural Science)*, 2008, v. 44, № 3, p. 12—15.