

УДК 552.57(477)

А.Х. Богомолов¹, Св.А. Сидоренко²

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ ПОРОД ДОКЕМБРИЯ УКРАИНСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА

Посвящается 100-летию со дня рождения А.В. Сидоренко и 115-летию Н.Б. Васюевича — большим энтузиастам изучения докембрийского органического вещества

На земной поверхности нет химической силы, более постоянно действующей, а потому и более могущественной по своим последствиям, чем живые организмы, взятые в целом.

В.И. Вернадский

На примере Украинского кристаллического щита рассмотрены главные особенности преобразования органического вещества (ОВ) трех фаций: фации зеленых сланцев, амфиболитовой и гранулитовой. Охарактеризованы масштаб распространения и содержание ОВ в высокоуглеродистых древних породах, проведена реконструкция состава первичных осадочных пород и процессов накопления биофильных элементов в ходе преобразования ОВ.

Ключевые слова: преобразование органического вещества, фации метаморфизма, биофильные элементы, битумоиды, реконструкция.

The main features of the transformation of organic matter (OM) of three facies of metamorphism (the facies of green shales, amphibolite and granulite facies) on the example of the Ukrainian crystal shield are discussed. The area of distribution and content of OM in high-carbon ancient rocks is characterized, the composition of primary sedimentary rocks, the processes of accumulation of biophilic elements during the transformation of OM are reconstructed.

Key words: transformation of organic matter, facies of metamorphism, biophilic elements, bitumen, reconstruction.

Введение. Один из важнейших вопросов современной геологии — познание ранних этапов истории развития Земли, что прежде всего связано с изучением докембрийских образований. Большое внимание отечественных и зарубежных ученых к этой проблеме обусловлено насущными потребностями практической деятельности.

Акад. А.В. Сидоренко [1975] отмечал: «...хотя исследования графита в осадочно-метаморфических породах докембрия имеют особое значение, этот весьма распространенный минерал, встречающийся во многих типах седиментогенных пород, даже глубоко метаморфизованных, изучен недостаточно, выполнено очень мало работ по геологии, минералогии, геохимии, метаморфизму графита и графитоподобных соединений, и поэтому необходимы дальнейшие всесторонние исследования геохимии углерода».

Учение о биосфере, разработанное выдающимся отечественным геохимиком В.И. Вернадским, представляет прочную основу для характеристики докембрийских условий осадконакопления. В протерозое влияние живого мира на процессы, протекавшие в биосфере, были не менее значительны,

чем в более поздние эпохи. В это время шире, чем в фанерозое, были распространены теплые мелководные эпиконтинентальные моря с пышным фотосинтезирующим биосом, обусловившим переработку состава атмосферы и гидросферы Земли.

Постановка проблемы. Изучение докембрийских высокоуглеродных отложений с точки зрения возможного образования нефти и газа в них ставит ряд вопросов:

1) каковы масштабы распространения и содержания ОВ в графитсодержащих и высокоуглеродистых древних породах;

2) какую информацию дает реконструкция состава первичных осадочных пород;

3) какие биохимические компоненты живого вещества (ЖВ) обязаны его жизнедеятельности;

4) каковы процессы накопления биофильных элементов в ОВ графитсодержащих пород;

5) когда ОВ достигло соответствующего преобразования для генерации нефти и газа.

В основу статьи положены следующие данные исследований и материалы: полевые, изучение kernового материала, литологические, петрографические и геохимические исследования ОВ

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доцент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: nvgroncl@mail.ru

² Институт проблем нефти и газа РАН, вед. науч. с., докт. геол.-минерал. н.; e-mail: sidorenko@ipng.ru

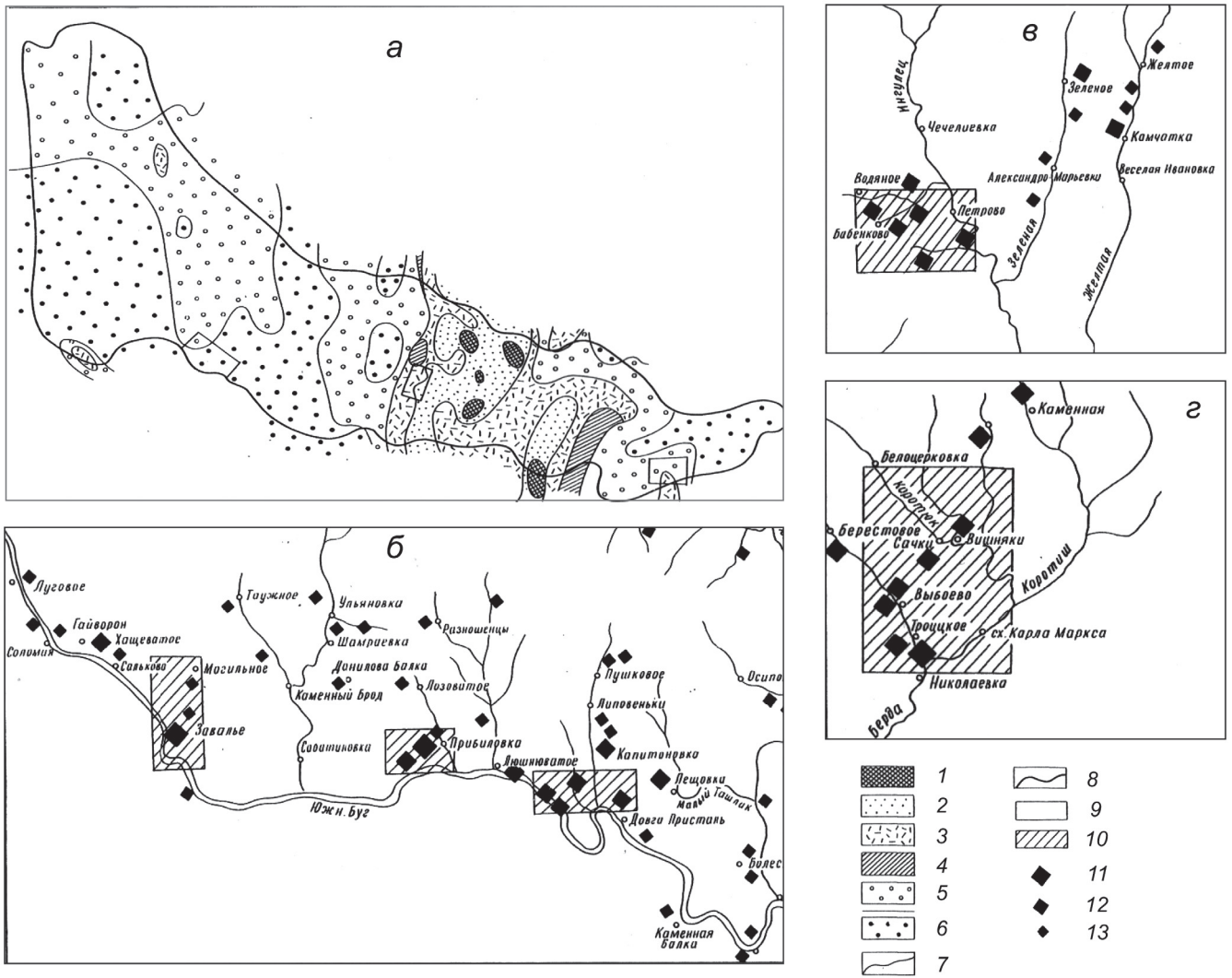


Рис. 1. Схема метаморфической зональности и графитоносных районов Украинского щита [Белевцев, 1977] (а): районы: б — Побужский графитоносный район, по [Иванцев, 1972]; в — Криворожский графитоносный район, по [Иванцев, 1972]; з — Приазовский графитоносный район, по [Иванцев, 1972]; 1–6 — метаморфические зоны: 1 — биотитовая, 2 — гранатовая, 3 — ставролитовая, 4 — силлиманит-мусковитовая, 5 — силлиманит-биотит-ортоклазовая (амфиболитовая фация), 6 — гранат-кордиерит-ортоклазовая (гранулитовая фация); 7 — границы метаморфических зон; 8 — условная граница Украинского щита; 9 — графитоносные районы; 10 — районы работ; 11–13 — месторождения и рудопроявления графита: 11 — крупные, 12 — мелкие, 13 — проявления графита

и биофильных элементов, анализ и обобщение литературных и фондовых материалов российских и зарубежных работ.

Краткие сведения о глобальности распространения ОБ в высокоуглеродистых породах. Анализ весьма обширной литературы о докембрии в России и других странах показывает, что углеродистые образования, углеродсодержащие породы довольно широко распространены в отложениях и протерозоя, и архея, содержание органического углерода ($C_{орг}$) достигает в этих породах 7%, иногда 20–30% [Сидоренко, 2002]. Графит, графитоиды, черные углистые породы встречаются в пределах всех известных мест нахождения докембрийских образований земного шара, на Финно-Скандинавском щите, Украинском кристаллическом щите, Воронежском выступе, на Урале, Алдане, Тимане, Таймыре, в Кокчетавской глыбе, Саянах, фундаменте Восточно-Европейской платформы и т.д. За рубежом

эти отложения многими исследователями описаны в Африке, Индии и в пределах Канадского щита (Кивитанская серия).

Кивитанские раннедокембрийские углеродсодержащие отложения представлены ассоциацией вулканогенных и осадочных пород, метаморфизм которых проявлен относительно слабо или не проявлен, поэтому признаки первичной природы горных пород в большинстве случаев наблюдаются совершенно отчетливо; а нередко удается установить особенности осадконакопления. В Канаде они известны в пределах Канадского щита — в провинциях Квебек и Онтарио, где хорошо изучены в районах железорудного месторождения Мичипикотен на северо-востоке от озер Верхнее и Рейне Лейк, а также месторождения Метевин — на северо-запад и север от них. Для этого комплекса отложений типичны конгломераты, граувакки–аркозы, графитовые сланцы, аргил-

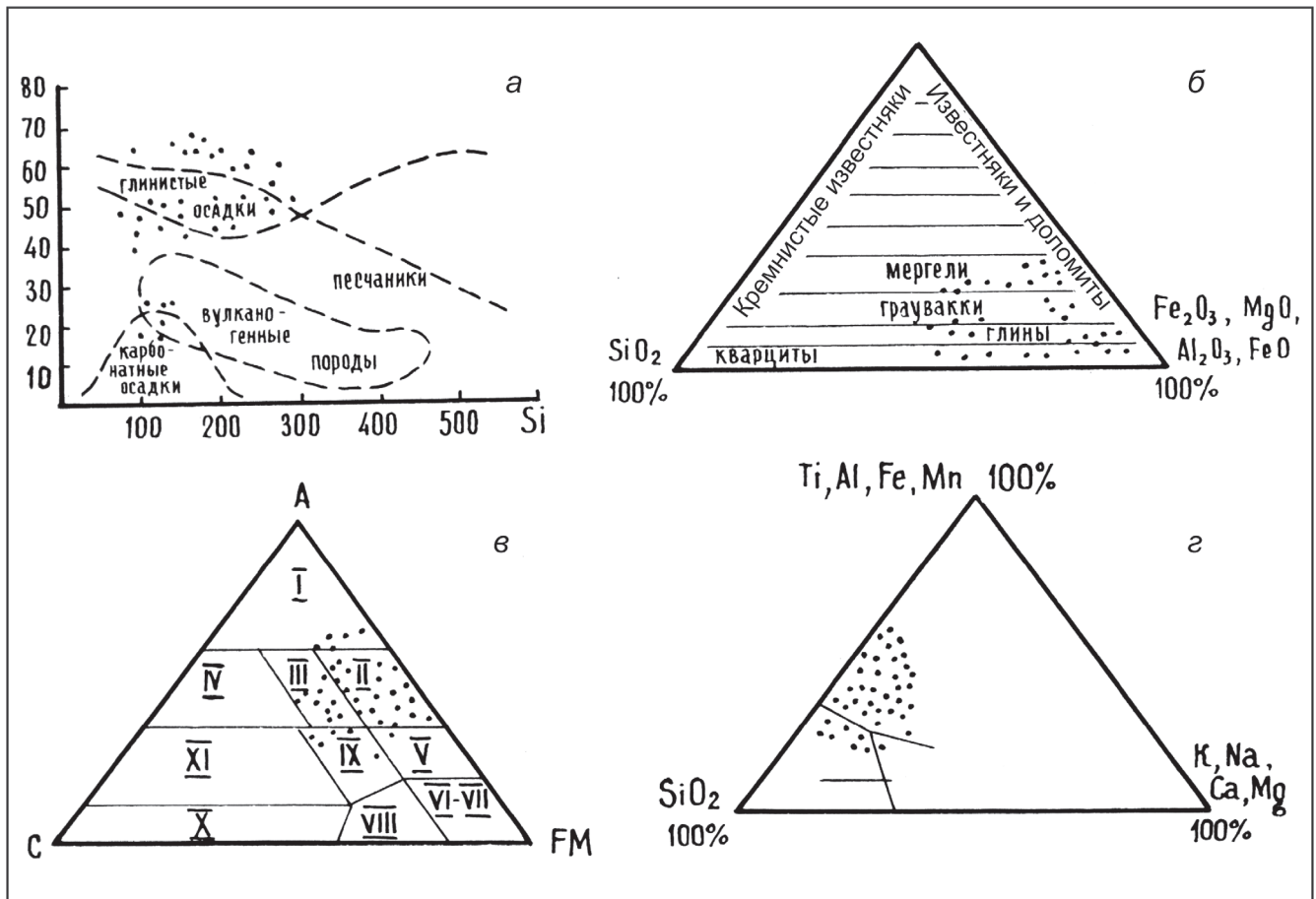


Рис. 2. Положение фигуративных точек графитосодержащих пород Украинского кристаллического щита на диаграммах: а — классификационная диаграмма составов метаморфических пород по А. Симонену; б — диаграмма химического состава осадочных пород по А.Н. Заварицкому; в — сводная диаграмма химических анализов метаморфических пород по Н.П. Симененко; г — диаграмма среднего химического состава различных типов глин, метаморфических и изверженных пород по В.К. Головенко

литы, глинистые сланцы, филлитовые кварциты (как обломочные, так и хомогенные), железистые кварциты, джеспилиты, известняки, доломиты, сидериты, а также лавы и туфы липаритового, дацитового и базальтового состава, с которыми ассоциируют углеродистые отложения. По мнению многих исследователей, вулканогенно-осадочные формации формировались на самых ранних этапах геологического развития земной коры.

Экспериментальная часть. В качестве объекта исследований рассматривается Украинский кристаллический щит, на территории которого расположено около 200 рудопроявлений графитоносных пород, сконцентрированных в трех районах: Криворожском (фация зеленых сланцев), Приазовском (амфиболитовая фация) и Побужском (гранулитовая фация метаморфизма), которые объединяются в одну графитоносную провинцию (рис. 1).

Для реконструкции осадочных аналогов метаморфических пород применяются методы петрохимического изучения, в основу которых положены данные химического состава осадочных, метаморфических и изверженных пород. Для восстановления первичной природы основных типов гнейсовых образований нами привлечены соб-

ственные данные по реконструкции метаморфических пород трех графитоносных районов Украины (рис. 2). На диаграмму Симонена и Заварицкого, помимо составов гнейсовых образований Украинского щита, для сравнения вынесены средние составы граувакк, аридных пелагических песков, глин морских и континентальных, образовавшихся в условиях жаркого климата [Ронов, Хлебников, 1957], высокоглиноземистых сланцев кейвской свиты Кольского п-ова, каолиновых глин полтавского возраста из зоны сочленения Донбасса с Приазовьем, среднекаменноугольных песчаников.

Анализ расположения точек различных типов гнейсовых образований показывает (рис. 2):

1) почти все точки высокоглиноземистых и значительное количество точек биотитовых, гранатовых и графитовых гнейсов попали в поле метапелитовых осадков; здесь же находятся точки каолиновых глин зоны сочленения Донбасса с Приазовьем, континентальных глин жаркого климата, морских и гумидных, а также высокоглиноземистых сланцев кейвской свиты;

2) точки гранатовых гнейсов находятся как в поле метапелитов, так и в поле мергелей (гнейсы с высоким содержанием граната);

3) часть точек графитосодержащих гнейсов находится в поле мергелей и основных туфов, остальные точки попали в поля метапелитов.

Таким образом, по диаграмме четко устанавливается первично-осадочная природа большинства разновидностей гнейсовых образований и в самом общем виде их осадочные аналоги (метапелиты).

Приведенные данные в контексте статьи приобретают особое значение в связи с тем, что они обнаруживают закономерное появление в разрезе пород, обогащенных рассеянным ОВ, а также графитом — докембрийским органическим веществом (рис. 3, 4, 5), которое характеризуется следующими свойствами:

- содержание ХБА до 0,041%;
- наличие в ХБ углеводородных структур;
- содержание углерода и водорода в ХБА изменяется от 80 и 10 до 81 и 12,8% соответственно;
- неуглеводородные компоненты характеризуются производными метиловых эфиров, жирных кислот;
- в газовой части ОВ обнаружены метан, этан, пропан ($n \cdot 10^{-3}$);
- парафино-нафтеновые УВ составляют 50%, остальные 50% приходятся на ароматические, парафиновые, нафтеновые УВ;
- смолисто-асфальтеновые компоненты представлены смолами с преобладанием бензольных.

В этом отношении изученные разрезы докембрийских отложений вполне сходны с фанерозойскими осадочными толщами, что является важным самостоятельным доказательством первично-осадочного происхождения графитосодержащих пород.

Общепризнано, что позднепротерозойский биос был представлен следующими основными группами организмов: водорослями, бактериями, простейшими животными. В 1968 г. появилось сообщение о находке в древних толщах системы Свазиленд остатков диаметром от 5 до 3 мм, похожих на одноклеточные неколонизальные водоросли, и нитеподобных остатков, схожих с нитчатыми водорослями, длиной до 400 мм. Возраст отложений системы Свазиленд превышает 3,2 млрд лет [Соколов, 1984]. Широко были распространены синезеленые водоросли — цианобактерии — наиболее примитивные одноклеточные организмы, приспособленные к самым различным условиям жизни в пресной, соленой воде и на суше, которые живут в разнообразных температурных условиях от +30 до -18 °С [Соколов, 1984].

Кроме микропалеонтологических доказательств наличия активной жизни на ранних стадиях формирования Земли, в древнейших осадочных породах были обнаружены аминокислоты, металлопорфирины, углеводороды, жирные кислоты [Эглинктон, Кальвин, 1971; Манская, 1970; Сидоренко, 1975; Колесников, 1977; Чиненов, 1974; Ходжсон, 1968].

В 2017 г. впервые опубликованы данные о находке первых микроорганизмов на Земле в черных сланцах и песчаниках палеопротерозойского осадочного бассейна Оконджа в Габоне. Микроорганизмы *Akouemma Nemisphaeria* имеют сфероидальную и продолговатую форму и диаметр 1–3 мм [Schopf et al., 2009].

В докембрийских строматолитах формации Битер Спрингс (Центральная Австралия) был обнаружен кероген [Edou-Minco et al., 2017].

Геохимические исследования докембрийского ОВ указывают на сапропелевую основу его состава. По данным Св.А. Сидоренко [1991], ОВ осадочно-метаморфических пород характеризуется следующими параметрами:

- 1) содержание хлороформенного битумоида «А» достигает 0,011% на породу;
- 2) в элементном составе хлороформенного битумоида «А» содержание углерода и водорода составляет 80–81 и 10–12,8% соответственно;
- 3) смолисто-асфальтеновые компоненты представлены в основном смолами с преобладанием бензольных;
- 4) по данным инфракрасной спектроскопии в хлороформенном битумоиде присутствуют углеводородные структуры, четко прослеживаются гомологи нафталина;
- 5) в битуминозном веществе графитовых гнейсов содержатся ароматические, парафиновые и нафтеновые углеводороды (УВ), парафино-нафтеновые составляют около 50%;
- 6) в газовой части ОВ (извлечено 0,1% газа) обнаружены метан, этан и пропан, но в очень небольшом количестве (тысячные доли процента).

Данные о изотопном составе углерода графитов из метаморфических пород изучаемых районов Украинского кристаллического щита, а также углерода графитов из эклогитов и перидотитов, доказывают биогенность углеродистого вещества метаморфических пород. Этот вывод основан на близких значениях $\delta^{13}\text{C}$ метаморфических пород и $\delta^{13}\text{C}$ источников и продуктов ОВ. Так, значение $\delta^{13}\text{C}$ для высокоуглеродистого вещества из метаморфических пород Украины колеблется от +1,56 до -3,53‰, что соответствует диапазону $\delta^{13}\text{C}$ для углерода живого вещества от -1,37 до -2,7‰, углерода ОВ современных морских осадков от -1,93 до -2,62‰ и углерода нефтей и битумов от -2,31 и -3,62‰ соответственно.

Сформулируем некоторые общие положения.

1. Процессы осадконакопления и захоронения ОВ в далеком прошлом происходили в мелководных условиях и носили автохтонный характер. Об этом свидетельствуют морфогенетические типы высокометаморфизованного ОВ и особенности химического состава графитосодержащих гнейсов. Они наиболее близки к ОВ континентальных глин, сформировавшихся в жарком и влажном климате.




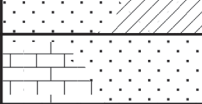
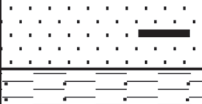
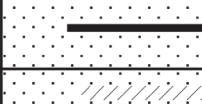
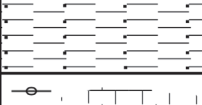
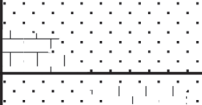
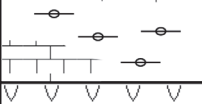
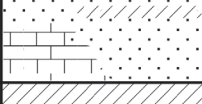

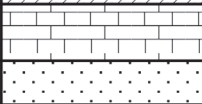
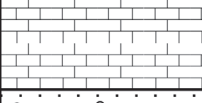
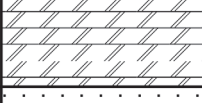


Метаморфизованные породы		Первичный состав пород		
Побужский район		Карбонатные породы с графитом		Доломитизированные известняки, обогащенные ОВ
		Бiotит-графит-гранатовый гнейс		Кварц-полевошпатовые песчаники с известкoвисто-кремнистыми осадками, обогащенные ОВ
		Кварцит с графитом		Кварцевые песчаники с ОВ
		Бiotитовый гнейс		Кварц-полевошпатовые песчаники с известкoвисто-глинистым цементом
		Скарноид		Известняки с глинами и песчано-каолиновой породой
		Амфиболитовые и пироксеновые гнейсы		Известкoвисто-глинистые и известкoвисто-кремнистые породы
		Карбонатная порода		Доломитизированные известняки
		Кварциты с пиритом		Кварцевые песчаники с серой

Рис. 3. Первичный состав графитосодержащих пород Украинского кристаллического щита, Побужский район

Метаморфизованные породы		Первичный состав пород		
Приазовский район		Высокоглиноземистые гнейсы		Каолиновые глины, песчано-каолиновые породы
		Бiotитовые гнейсы		Кварцево-полевошпатовые песчаники с известкoвисто-глинистым цементом
		Кварциты		Кварцевые песчаники
		Графитовые гнейсы		Кварц-полевошпатовые песчаники с известкoвисто-кремнистыми осадками, обогащенные ОВ
		Карбонатные породы с прослоями и линзами кварцита		Доломитизированные известняки с глинисто-известковыми осадками
		Амфиболитовые и пироксенитовые гнейсы		Известкoвисто-глинистые и известкoвисто-кремнисто-глинистые осадки
		Кварциты		Кварцевые песчаники
		Графитовые гнейсы		Кварц-полевошпатовые песчаники, обогащенные ОВ

Рис. 4. Первичный состав графитосодержащих пород Украинского кристаллического щита, Приазовский район

Метаморфизованные породы		Первичный состав пород	
Криворожский район		Сланцы кварц-биотитовые	 Кварц-полевошпатовая порода с глинистым цементом
		Метапесчаники	 Кварцевый песчаник с каолином
		Мрамор окварцованный	 Доломитизированный известняк
		Сланцы кварц-биотитовые	 Кварц-полевошпатовая порода с глинистым цементом
		Кварциты с прослоями мрамора	 Кварцевые песчаники с прослоями известняков
		Плотные углистые сланцы с сульфидами	 Кварц-полевошпатовые песчаники, обогащенные ОВ

Рис. 5. Первичный состав графитосодержащих пород Украинского кристаллического щита, Криворожский район

Таблица 1

Сравнительный анализ распределения рассеянного ОВ в осадочных породах фанерозоя и графитов в толщах докембрия, по [Богомолов, 1979]

Метаморфизованные породы	Содержание $C_{орг}$, %	Осадочные аналоги	Кларковое содержание $C_{орг}$ по [Вассоевич, 1973]	
Графитосодержащие гнейсы	5–30	Кварц-полевошпатовые песчаники с глинистым цементом, обогащенные ОВ	0,9	Глинистые
Мраморы	1–5	Доломитизированные известняки	0,2	Карбонатные
Кварциты	1–5	Кварцевые песчаники	0,2	Песчаные
Биотит-гранат-графитовые гнейсы	1–10	Кварц-полевошпатовые песчаники с известково-кремнистыми осадочными породами	0,45	Алевритовые

2. Графитосодержащие породы докембрия образуют пачки чередующихся пород (циклов) [Богомолов, 1979]. Этот факт свидетельствует о том, что изученные разрезы докембрийских отложений схожи в этом отношении с фанерозойскими осадочными толщами, что в свою очередь служит важным самостоятельным доказательством первично-осадочного происхождения графитосодержащих пород.

3. В древнейших углеродистых отложениях протерозоя присутствовало огромное количество ОВ, распространенного на значительных площадях в рассеянном состоянии и в виде остатков палеонтологических форм [Соколов, 1984].

4. Содержание $C_{орг}$ в осадочных породах снижается по мере уменьшения в них количества глинистых частиц и увеличения как песчано-алевритового, так и карбонатного материала. Среднее

содержание графита, оценка которого проводилась нами на основе изучения 170 шлифов, приведено в табл. 1.

Для углеродсодержащих пород докембрия и фанерозоя характерно присутствие микроэлементов как в породах, так и в нефтяном компоненте, отражающих их генетическую принадлежность (табл. 2).

Результаты исследований и их обсуждение. При восстановлении распространенности рассеянного ОВ в докембрии обнаруживается отчетливая связь между средним содержанием $C_{орг}$ в отложениях фанерозоя и графита в метаморфических породах. Указанное свидетельствует о идентичности процессов накопления ОВ в разных литологических типах пород, как в докембрии, так и в фанерозое, а также служит еще одним доказательством наличия в прошлом больших масс органических осадков,

Таблица 2

Геологические особенности карбонатно-углеродистых формаций

Номер п/п	Формация, район распространения	Возраст	Органическое вещество (содержание, формы проявления)	Литологический состав	Палеогеографические условия формирования	Характерный состав малых элементов
1	Современные осадки Черного моря	Q	$C_{\text{орг}}$ до 20%, сапропелевое органическое вещество	Карбонатно-углеродистые илы	Внутриконтинентальный бассейн с сероводородным заражением придонной части	Mo, V, Ni, Co, Cu
2	Формация Грин Ривер (США)	P	$C_{\text{орг}}$ до 30% и более Кероген 14% (C 80%, H 10,3%, N 2,4%, S 1,0%, O 5,8%)	Тонкое ритмичное переслаивание битуминозных сланцев и мергелей, обогащенных органическим веществом	Осадки пресноводных озер	Ba, B, V, Au, Li, Mn, Mo, As, Pb, Ag, Se, Sr, P
3	Горючие сланцы Волжско-Печорского региона	J ₃	$C_{\text{орг}}$ 10–60% (C 60%, H 7,7%, O+H 29,6%)	Глины агрилитоподобные мергелистые. Карбонатный материал 10–60%. Мощность 57 м	Внутреннее море синеклизы платформы	V, Mo, Cu, Pb, Co, Ni
4	Медистые сланцы ФРГ (купфершифер)	P ₂	$C_{\text{орг}}$ до 30%	Медистые высокоуглеродистые сланцы мощностью 0,2–0,5 м. Карбонаты 8–50%, иллит 17–70%, хлорит 10%, каолинит 5%	Осадки мелководного трансгрессирующего бассейна с сероводородным заражением придонной части	Cu, Zn, Pb, V, Cr, Mn, Ni, Mo, Ba
5	Кукерситы Эстонии	O ₂	Кероген 10–40%	Тонкое переслаивание горючих сланцев с карбонатными породами	Открытый морской бассейн окраинного типа	Нет данных
6	Шунгиты Карелии	PR ₂	$C_{\text{орг}}$ 3–40%. Графитоподобное вещество — шунгит, тонкая вкрапленность, прослои, линзы	Толща переслаивающихся шунгитов, шунгитовых сланцев с доломитами	Крупный морской бассейн эвгеосинклинального типа	V, P, Mo, Ni, TR
7	Черные сланцы района Оутокумпу (Финляндия)	PR ₁	$C_{\text{орг}}$ 3–30%, рассеянная форма	Черные сланцы, переслаивающиеся с первичными глинисто-карбонатными породами	Нет данных	U, V, P, Mo, Ni, Co, Ag, Au
8	Углеродистые сланцы федоровской свиты Алданского щита	PR ₁	Рассеянная форма представлена графитом	Ритмичное переслаивание углеродистых сланцев с известняками и доломитами	То же	Нет данных
9	Графитовые сланцы иенгрской серии Алдана	AR	$C_{\text{орг}}$ до 20%, рассеянная форма	Переслаивание графитосодержащих сланцев и кальцифиров	То же	Mo, Ni, Co, V, Cu, Pb, Zn
10	Графитовые сланцы и графиты Приазовского массива	AR	$C_{\text{орг}}$ 10–20%, рассеянная форма	Первичные глинисто-карбонатные осадки	Мелководный морской бассейн в пределах миогеосинклинали	Ni, Co, V, Cu, Pb, Zn

которые залегали в толще отложений в виде пластов, имеющих локальное распространение или в виде линз.

При детальном послойном изучении высокоуглеродистых пород трех фаций метаморфизма (фация зеленых сланцев, амфиболитовая, гранулитовая) Украинского кристаллического щита на основе количественного спектрального анализа установлено, что корреляционная связь между содержанием $C_{\text{орг}}$ и биофильных элементов не нарушается и не зависит от степени метаморфизма [Богомолов, 1979]. По аналогии с фанерозойскими образованиями можно предположить, что биофильные элементы накапливались в процессе жизнедеятельности низших растений за счет восстановительного и адсорбционного действия ОВ, а $C_{\text{орг}}$ в докембрии не менее мощный металлогенетический фактор, чем в молодых отложениях. Тесная корреляционная связь между содержанием

в осадках $C_{\text{орг}}$ и V, Mo, Ni, Cu, TR также установлена А.В. Сидоренко и Св.А. Сидоренко [Сидоренко, 1991] на основе комплексного изучения высокоуглеродистых пород; U, Ge, V, Mo, Cu и некоторые другие элементы либо образуют комплексные соединения с ОВ, либо входят в состав слюд и глинистых минералов.

Нами установлена четкая зависимость концентрации большой группы элементов от распределения $C_{\text{орг}}$. Причиной этой зависимости может быть первичное интенсивное накопление биофильных элементов организмами при их жизни и на ранних стадиях захоронения. О масштабах процессов в прошлом можно судить по оценочным данным, рассчитанным Я.Н. Белевцевым [1977] на основании среднего содержания металлов. Общий объем первично-осадочных пород докембрия в пределах Украинского щита он оценивает не менее чем в 5–6 млн км³. При концентрации любого из

Таблица 3

Распространенность битумоидов в основных типах осадочно-метаморфических пород докембрия, %, по [Сидоренко, 2002]

Битум	Песчаники, кварциты (паракварциты)	Сланцы (глинистые сланцы)	Карбонатные породы (известняки, доломиты, мраморы и др.)
Углеродсодержащие породы ($C_{орг}$ 1–10%). Породы в целом			
ХБ	0,0292 (0,0020–0,0563)	0,0281 (0,0034–0,0311)	0,0189 (0,0010–0,0261)
СББ	0,0171 (0,0003–0,02)	0,0148 (0,0005–0,0189)	0,0120 (0,0004–0,0144)
$B_{общ}$	0,0463	0,0429	0,0309
Органическое вещество пород			
ХБ	3,05 (0,061–29,3)	0,55 (0,0023–2,91)	0,88 (0,1–0,68)
СББ	1,18 (0,035–4,05)	0,39 (0,0048–4,88)	0,67 (0,065–1,9)
$B_{общ}$	4,23	0,94	1,55
ХБ/СББ	2,6	1,4	1,3
Обычные породы ($C_{орг}$ до 1%). Породы в целом			
ХБ	0,0087 (0,0011–0,0459)	0,0048 (0,003–0,0163)	0,0038 (0,001–0,0253)
СББ	0,0026 (0,0003–0,0125)	0,0047 (0,0004–0,0246)	0,0019 (0,0002–0,007)
$B_{общ}$	0,0113	0,0095	0,0057
Органическое вещество пород			
ХБ	2,71 (0,053–2,262)	0,3 (0,002–2,47)	0,74 (0,098–0,66)
СББ	0,90 (0,03–3,93)	0,29 (0,004–4,7)	0,53 (0,051–1,67)
$B_{общ}$	3,61	0,59	1,27
ХБ/СББ	3,0	1,0	1,4

Примечание. Перед скобками указано среднее арифметическое значение.

металлов 0,01% в 1 км³ первично-осадочных пород его содержится около 0,5–1 млн т, а суммарное содержание всех металлов — 5–8 млн т.

Термин «биогенные» был предложен В.И. Вернадским для элементов, преобладающих в биосфере и составляющих основную массу микроэлементов живого вещества, к ним относятся V, Ni, Co, Mo, Ca, Mg, Sr, Ba, Fe, Zn, Pb, I, Br и др. «Абиогенные» элементы — элементы, поступающие в осадочную оболочку из глубинных горизонтов земной коры и мантии (As, Hg, Sb, Li, B и др.).

По данным С.А. Пунаковой [2014], на примере многих нефтегазоносных бассейнов подтверждается унаследованность микроэлементного состава нефтей от исходного ОВ. При корреляции нефть–рассеянное органическое вещество именно по составу биогенных элементов прослежены четкие генетические связи, диагностированы нефтематеринские толщи, дифференцированы типы ОВ, а также установлен параллелизм в стадийности катагенетического преобразования нафтидов.

Роль ОВ как концентратора биофильных элементов можно определить следующими положениями: 1) ОВ выступает в роли весьма активного сорбента; 2) ОВ создает резко восстановительную обстановку в диагенезе с выделением газов H₂S, CH₄ и др.; 3) отдельные химические соединения, входящие в состав ОВ, непосредственно воздействуют на рассеянные элементы, вызывая образование комплексных соединений V, Mo, U, Ge, Cu, Ti и других элементов [Зубовик, 1961].

Определение содержания $C_{орг}$ в породах дает, таким образом, важную информацию для метал-

логических исследований. Нет сомнения, что множество осадочных скоплений металлов, достигающих в некоторых случаях размеров крупных месторождений, обязано своим происхождением наличию богатой и в огромном масштабе жизнедеятельности в докембрии.

Приведем одну из гипотез преобразования металлоорганических соединений в ОВ от низших растений до графита с образованием и разрушением их от седиментогенеза до метаморфизма осадочных пород, обогащенных ОВ, и комплексом биофильных элементов (табл. 3). Все изложенное еще раз убеждает в том, что распределение $C_{орг}$ в углеродистых породах трех фаций метаморфизма на Украинском кристаллическом щите и ассоциация его с комплексом биофильных элементов унаследованы от первичных осадков, наличие ОВ было решающим фактором формирования углеродистых отложений.

Условия, необходимые для нефтегазообразования, возникли на нашей планете по меньшей мере 2,5 млрд лет назад, когда уже формировались осадки, содержащие рассеянное и даже концентрированное — в виде горючих сланцев — углеродистое ОВ. Как показывали работы многих исследователей, ОВ становится постоянным микрокомпонентом в осадках рифейского времени с кларковым содержанием $C_{орг}$, приближающимся к кларку для фанерозойской части стратисферы. ОВ в докембрийских осадках было обязано сначала только (а затем в основном) низшим планктонным водорослям. Они характеризуются повышенным содержанием липидов, т.е. жиров и жироподобных

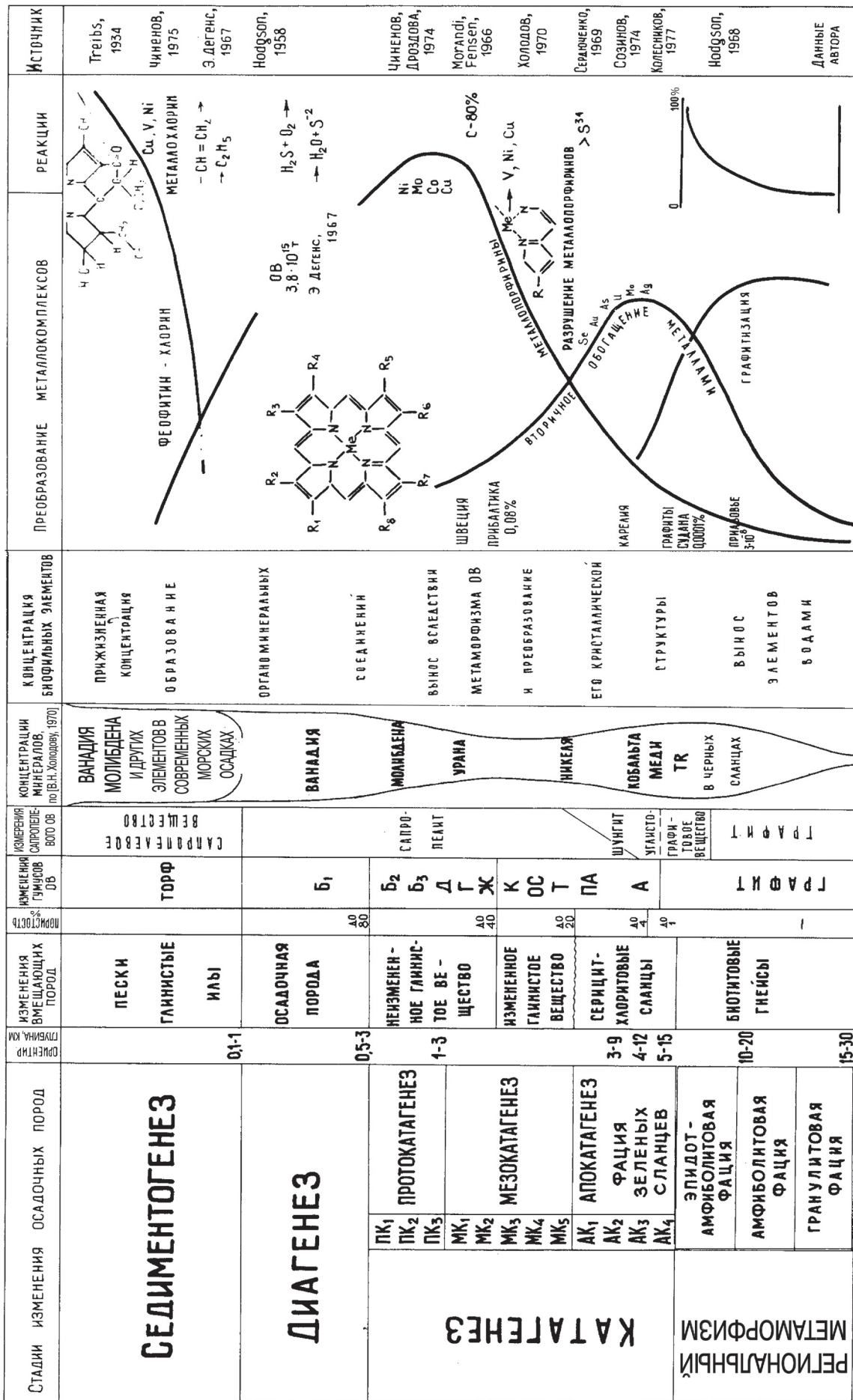


Рис. 6. Поведение металлопорфиринов в органическом веществе в процессе его преобразования, по [Богомолов, 1979]

веществ. Наличие липидных веществ, относительно обогащенных водородом, обеспечило повышенную битуминозность захоронявшегося ОВ, его химическое сходство с сапропелевой органикой в отложениях фанерозойского возраста, являющейся основным нефтематеринским веществом.

Обобщение многочисленных литературных данных (Д. Харрингтона, Т. Хоеринга, М. Кальвина, М. Шидловски, Д. Мак-Кирди и многих других отечественных и зарубежных ученых) о содержании битумов в метаморфических первично-осадочных породах докембрия позволяет говорить о широком распространении хлороформенного (ХБ) и спирто-бензольного (СББ) битумоидов (Б) в породах и в ОВ (рис. 6).

Установлено, что для докембрийских метаморфических первично-осадочных пород, так же, как и фанерозойских, характерна и широко известна так называемая закономерность Успенского—Вассоевича: при разрушении ОВ пород остаточная субстанция пропорционально обогащается именно битуминозными компонентами [Сидоренко, 2002].

В раннем протерозое в земной коре на всех материках существовали крупные тектонические впадины, заполнявшиеся осадками, — осадочные бассейны. В процессе их развития возникали условия для образования нефти и проявления главной фазы нефтеобразования. Осадочные бассейны превращались в нефтегазоносные бассейны, которые впоследствии исчезали. Слагающие их породы были сильно метаморфизованы; в ряде случаев они были уничтожены денудацией. Однако

сохранилось немало осадочных бассейнов протерозойского, особенно позднепротерозойского времени заложения, содержащих высокоуглеродистые отложения.

Таким образом, реконструкция преобразования ОВ и условий его накопления позволяет еще раз подчеркнуть огромную роль живого вещества на протяжении всей геологической истории Земли и в формировании этих пород. Это положение сегодня звучит очень актуально, так как оно вписывается в более широкий процесс утверждения в современном естествознании единого историко-геологического, эволюционно усложняющегося принципа развития земной коры с докембрийского времени через весь фанерозой и вплоть до наших дней.

Выводы. 1. Докембрийские осадочные образования, в частности Украинского кристаллического щита, имели первичное осадочное происхождение.

2. Докембрийские отложения содержат биогенное ОВ, и не существует принципиальных различий в сапропелевом ОВ докембрия и фанерозоя.

3. ОВ докембрия содержит биофильные элементы, что доказывается положительной корреляцией между концентрацией биофильных металлов и ОВ.

4. В процессе литогенеза (диагенез—метаморфизм) липидная часть ОВ принимала участие в нефте- и газообразовании, а остальная часть ОВ обогащалась микро- и редкоземельными элементами (Ni, Co, V, Cu и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаев Ф.Р., Пунанова С.А. Геохимические аспекты микроэлементного состава нефтей. М.: Недра, 2014. 180 с.

Белевцев Я.Н. Общие вопросы теории метаморфогенного рудообразования // *Метаморфогенное рудообразование*. М.: Наука, 1977.

Богомолов А.Х. Биофильные элементы в графитах и графитсодержащих породах Украинского кристаллического щита: Автореф. канд. дисс. М., 1979.

Вассоевич Н.Б. Природа органического вещества современных и ископаемых осадков. М.: Наука, 1973. 262 с.

Иванцев О.Е. Геология и генезис графитовых месторождений на Украине. Киев: Наукова думка, 1972. 134 с.

Киселёва Н.Л., Цветков Д.Л., Цветков Л.Д. Нефтегазоматеринские сланцевые толщи мира. Ярославль: Аверс Плюс, 2015. 492 с.

Ронов А.Б., Хлебникова З.В. Химический состав важнейших типов глин // *Геохимия*. 1957. № 6. С. 36–48.

Сидоренко Св.А. Органическое вещество и биогенные процессы в докембрии. М.: Наука, 1991. 104 с.

Сидоренко Св.А. Нефте- и газообразование в докембрийской истории Земли. М.: ГЕОС, 2002. С. 126–137.

Сидоренко Св.А., Сидоренко А.В. Органическое вещество в осадочно-метаморфических породах докембрия. М.: Наука, 1975. С. 85–124 (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 277).

Симененко Н.П. Стратиграфическая схема докембрия Украины // *Стратиграфия Украины. Докембрий*. Киев: Наукова думка, 1972. 174 с.

Созинов Н.А., Сидоренко Св.А. Карбонатно-углеродистые формация докембрия и фанерозоя // *Проблемы осадочной геологии докембрия*. Вып. 6. М.: Наука, 1981. С. 23–32.

Соколов Б.С. Палеонтология, геология и эволюция биосферы // *Проблемы эволюции биологических процессов*. Т. 5. Новосибирск: Наука, 1984. С. 35–48.

Schopf J.W., Kudryavtsev A.B. Confocal laser scanning microscopy and Raman imagery of ancient microscopic fossils // *Precamb. Res.* 2009. Vol. 173. P. 39–49.

Edou-Minco A., Mossavou M., Sato T. et al. Growth, duplication and lateral mutual compressive deformation of *Akouemma hemisphaeria* on the Seafloor of Okondja Basin at 2.2 Ga (Gabon) // *Int. J. Geosci.* 2017. Vol. 8. P. 1172–1191.

Поступила в редакцию
01.09.2017