

УДК 622.276

## ОСОБЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ФОРМАЦИЙ

**Светлана Александровна Пунанова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; punanova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2022-2906>  
ID: 6602669854

**Аннотация.** На примере углеродсодержащих формаций оценивается концентрация в них комплекса микроэлементов. Приводятся примеры распространения продуктивных непрерывных резервуаров в бассейне Ордос (Китай), Остин-Чок, Баккен (США), а также в доманиковых отложениях Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна. Особенности формаций, а именно большая протяженность продуктивных интервалов разреза, вводимых в разработку при горизонтальном бурении, а также высокая концентрация рудных металлов и других экологически опасных химических элементов как в самих сланцевых отложениях, так и в сланцевой нефти, требуют нового подхода к изучению сланцевых отложений на всех этапах геологоразведочных работ.

**Ключевые слова:** углеродсодержащие формации, нефтематеринские свиты, непрерывные резервуары, микроэлементы, экологические риски

**Для цитирования:** Пунанова С.А. Особенности микроэлементного состава углеродсодержащих формаций // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 93–103.

## FEATURES OF THE TRACE ELEMENT COMPOSITION OF CARBONACEOUS FORMATIONS

**Svetlana A. Punanova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), Moscow, Russia; punanova@mail.ru

**Abstract.** On the example of carbon-bearing formations, the concentration of a complex of trace elements in them is estimated. Examples are given of the distribution of productive continuous reservoirs in the Ordos (China), Austin-Chok, Bakken (USA) basins, as well as in the Domanik deposits of the Volga-Ural oil and gas basin. The features of the formations, namely the large length of the productive intervals of the section introduced into development during horizontal drilling, as well as the high concentration of ore metals and other environmentally hazardous chemical elements both in the shale deposits themselves and in shale oil, require a new approach to the study of shale deposits in all stages of geological exploration.

**Key words:** carbonaceous formations, source-rock, continuous reservoirs, trace elements, environmental risks

**For citation:** Punanova S.A. Features of the trace element composition of carbonaceous formations. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 93–103. (In Russ.).

К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР  
Николая Брониславовича Вассоевича (1902–1981)

**Введение.** Приступая к изучению сланцевых формаций, особенностей и нетрадиционности их скоплений (протяженность ловушек и высокая концентрация металлов и других элементов), автор в своих исследованиях всегда обращалась к основополагающим работам ученого-мыслителя XX века Николая Брониславовича Вассоевича, 120 лет со дня рождения которого исполнилось 31 марта 2022 г. Базисные понятия органической геохимии, необходимые для осмыслиния и интерпретации объемного современного материала по углеродсодержащим формациям, базируются на учениях Н.Б. Вассоевича о нефтематеринских и нефтепроизводящих свитах, битумоидах (аллохтонных и автохтонных), главной фазе (стадии) нефтеобразования, катагенетической стадийности и зональности нефтегазообразования и

многих других. Эти идеи и их преломление на огромном фактическом материале — первоосновные, фундаментальные, это тот краеугольный камень, на котором основано развитие новых направлений геохимических исследований, они, в частности, оказались очень востребованными при изучении углеродсодержащих формаций и оценке их продуктивности [Вассоевич и др., 1967, 1986].

Показательны слова В.И. Вернадского, звучащие сейчас очень актуально и современно: «Можно отметить два типа месторождений для скоплений нефти: 1) скопление в осадочных породах; 2) проникновение углеводородами битуминозных сланцев. Оба типа могут рассматриваться как части одного и того же явления. Нахождение в сланцах содержит наибольшие массы нефти» [Вернадский,



Рис. 1. Обзорная карта насыщения сланцев на территории РФ (Роснефть), по URL: [http://new.oil-industry.ru/SD\\_Prezent/2020/10/07-12%20%D0%97%D0%B0%D0%BD%D1%87%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf](http://new.oil-industry.ru/SD_Prezent/2020/10/07-12%20%D0%97%D0%B0%D0%BD%D1%87%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B2.pdf)

1994, с. 180]. Об этом также неоднократно говорил Н.Б. Вассоевич, который очень заинтересованно изучал труды В.И. Вернадского, подчеркивая большую важность и значимость его работ по биогеохимии живого вещества [Вассоевич, Иванов, 1976, 1977].

Масштабы развития углеродсодержащих формаций на территории России наглядно демонстрирует рис. 1.

Отмечено, что для сланцевых углеродсодержащих формаций характерны чрезвычайно низкий темп седиментации (т. е. условия резкой недокомпенсации) и фосилизация органического вещества (ОВ) органомонтмориллонитовыми соединениями в относительно глубоководных морях или внутриконтинентальных бассейнах [Гольдберг и др., 1990]. В разрезе они образуют маломощные (несколько десятков метров) и однородные пачки, распространенные на огромных площадях. Обогащенность углеродсодержащих формаций микроэлементами (МЭ) обусловлена длительным соприкосновением осадков с морскими водами — источником этих элементов, а также интенсивным диагенезом, в том числе сульфидообразованием, высокой сорбционной и консервирующей способностью органомонтмориллонитовых соединений. Именно в диагенезе в гуминовых кислотах, помимо углеводородных (УВ) органических соединений, видимо, концентрируются тяжелые металлы U, V, Cu, Ni, образуя различные металлоорганические комплексы [Тиссо, Вельте, 1981].

**Особенности резервуаров сланцевых формаций.** Нефтяные системы сланцевых формаций

в ряде классификаций называют исходной или нефтематеринской нефтяной системой (source-rock petroleum system SPS). Эта система характеризуется следующими особенностями онтогенеза УВ [Jing-Zhou Zhao et al., 2019]:

- образование и накопление УВ происходят одновременно в породах-источниках и породах-накопителях;
- миграция не необходима (незначительна или на короткие расстояния);
- резервуарами становятся исходные породы, коллекторы-ловушки не требуются;
- распределение УВ обширное, непрерывное (continuous) и не имеет четких границ;
- сохранность скоплений считается отличной; типичная аккумуляция — сланцевые нефть и газ.

Особенности свит, т. е. их сланцевый характер и частое чередование более плотных и менее плотных пород — накопителей и производителей УВ, приводят к трудностям дешифровки в их строении собственно нефтематеринских (с остаточной нефтью) и продуктивных прослоев. Эта неопределенность вызвана тем, что методы исследования традиционных скоплений УВ не применимы к нетрадиционным объектам, которые одновременно и нефтематеринские, и нефтесодержащие. Термин «ловушки» в традиционном геологическом значении этого понятия в качестве ограниченных накопителей УВ не приемлемо практически к любым сланцевым формациям (доманиковая Волго-Урала, баженовская свита Западной Сибири, кумская свита Предкавказья, куонамская формация Восточной Сибири, менилитовая серия Польши и Западной Украины,

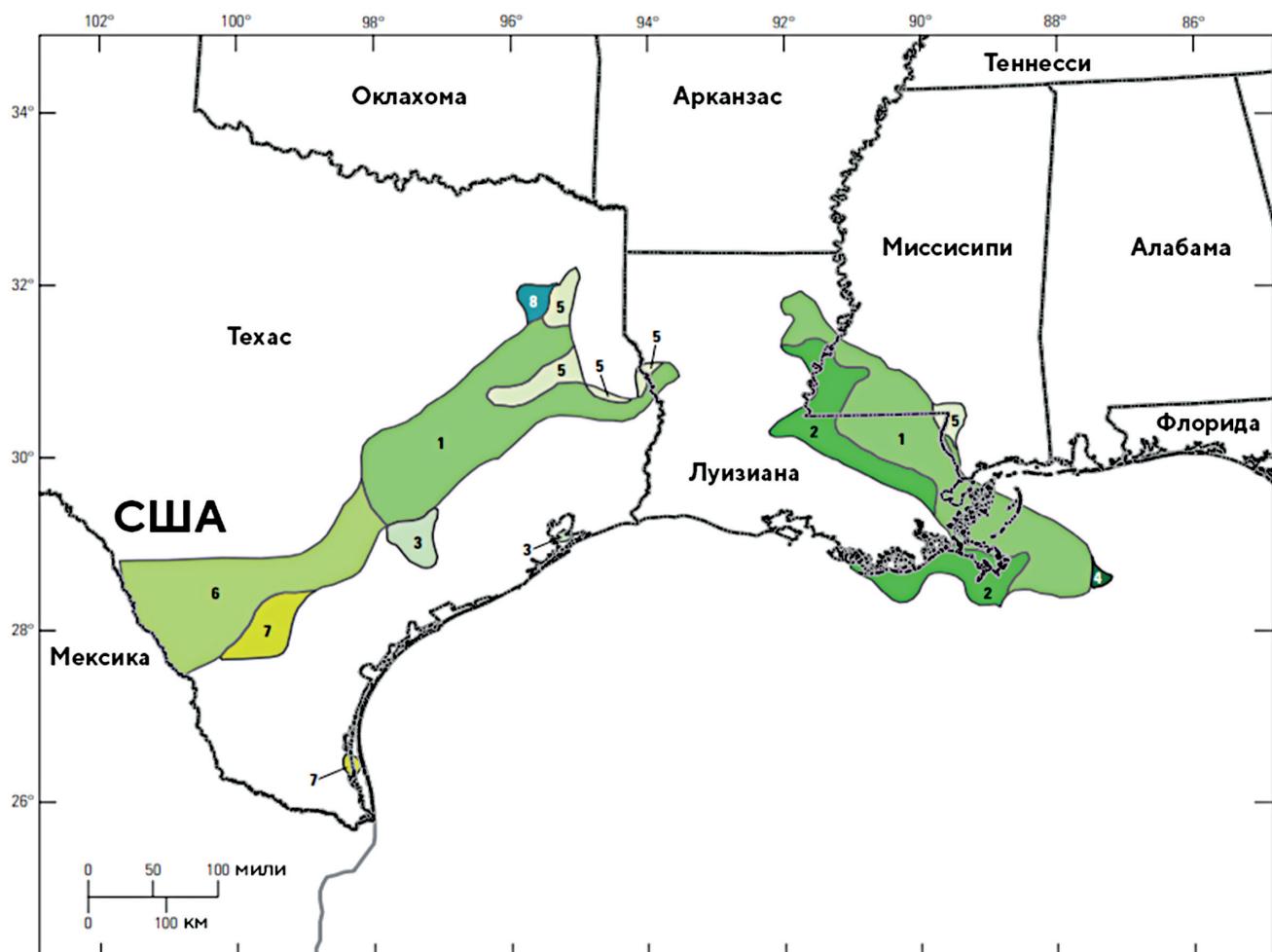


Рис. 2. Карта распространения типов нефти формации Остин Чок (показаны цветом и номером), по [Pearson, 2012]: нефти из отложений: 1 — мела (турон, морские малосернистые); 2 — мела (турон, морские малосернистые) и палеогена (эоцен, морские); 3 — мела (турон, морские малосернистые) и палеогена (эоцен, наземные); 4 — мела (турон, морские малосернистые) и юры (титон, от умерено- до высокосернистых); 5 — мела (турон, морские малосернистые) и юры (титон, морские); 6 — мела недифференцированного; 7 — мела недифференцированного и палеогена (эоцен, наземные); 8 — мела (турон, морские малосернистые) и юры (оксфорд, наземные)

многочисленные сланцевые отложения в Америке и других регионах мира).

В мировой и отечественной литературе продуктивные прослои в сланцевой нефтематеринской толще носят название протяженных непрерывных резервуаров (*continuous reservoirs*) или тонких ловушек несогласного (несоответственного) залегания (*unconformity subtle traps*). Они представляют собой отложения большой протяженности, но малой мощности, в которых продуктивность резервуара-залежи не контролируется традиционными структурными или литолого-стратиграфическими ограничениями, а лишь условными линиями [Dolson et al., 2018; Ульмишек и др., 2017; Соболева, 2020]. Скорее всего, эти скопления УВ можно считать мегарезервуарами углеводородных скоплений, обладающими огромными запасами. Это определение-понятие, редко используемое в современной литературе [Абукова, Карцев, 1999; Шустер, 2020], было введено еще в работах [Брод, 1951; Еременко, 1961], и, как представляется автору статьи, полностью соответствует скоплениям УВ в углеродсодержащих формациях.

Рассмотрим несколько конкретных примеров распространения протяженных ловушек на территории США, Китая и России, основываясь на публикациях в открытой печати.

Яркий пример подобных резервуаров сланцевых формаций — формация Вудбайнстоун (*Woodbine-stone*), объединяющая Остин Чок (*Austin Chalk*) и Игл Форд (*Eagle Ford*) — геологические образования на востоке Техаса, пласты которой относятся к верхнему мелу. Эти формации продуктивны на гигантском нефтяном месторождении Восточного Техаса, известном как Черный гигант, из которого добыто более 5,42 млрд баррелей (барр.) нефти. Формация Вудбайнстоун нефтематеринских сланцевых отложений на глубине около 1700 км простирается на территориях штатов Техас, Луизиана и Миссисипи на 500 км в длину и 50 км в ширину [Pearson, 2012]. На рис. 2 показана продуктивность формации Остин Чок и типы нефти, генерированные органическим веществом определенных фациальных зон осадконакопления. Отмечено, что по значениям коэффициента отражательной способности витринита эти

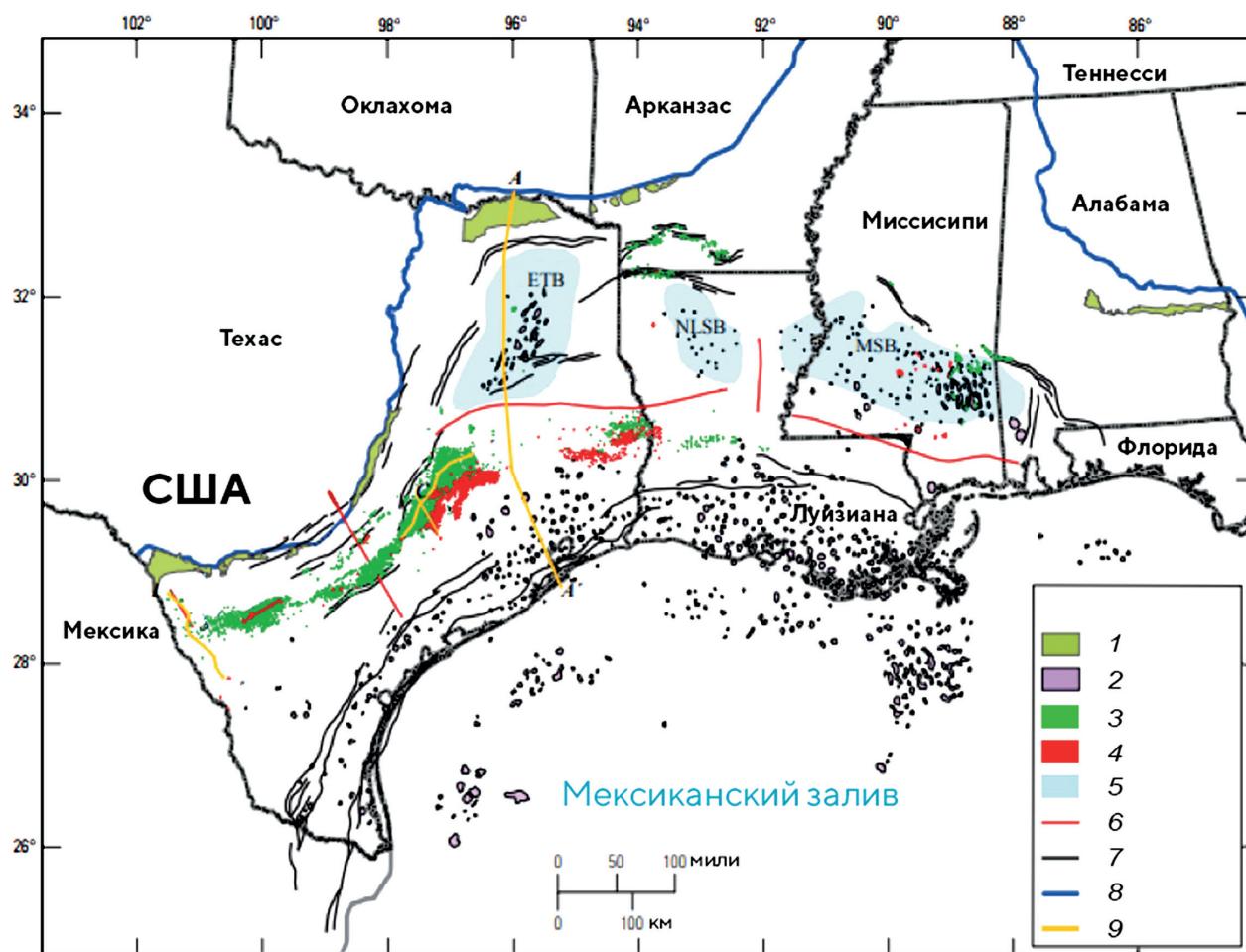


Рис. 3. Основные геологические компоненты формации Остин Чок (Austin Chalk), по [Pearson, 2012]: 1 — обнажение; 2 — диапиры; места добычи нефти и газа из Остин-Чок (IHS Energy Group, 2009a); 3 — добыча нефти; 4 — добыча газа; 5 — нефтегазоносные бассейны (ETB — Восточный бассейн Техаса, NLSB — бассейн Северной Луизианы, MSB — бассейн Миссисипи); 6 — границы тектонических структур; 7 — зоны разломов; 8 — граница нефтегазовой системы (TPS); 9 — линии профильных разрезов

отложения попадают в интервал нефтяного окна (кровля —  $R_o = 0,6\%$ ; основание —  $R_o = 1,2\%$ ) и обладают отличными свойствами нефтематеринских пород, они были производителями-генераторами больших объемов нефти, находясь в современном окне генерации нефти. Наиболее продуктивные интервалы — трансгрессивные осадки морских сланцев, образовавшихся в бескислородной среде с нефтяным типом керогена. Огромная площадь распространения зон добычи нефтяных и газовых скоплений наглядно показана на рис. 3.

По данным [Pollastro et al., 2011], Геологическая служба США провела оценку ресурсов нефти и попутного газа в формации Баккен от верхнего девона до нижней части формации Миссисипи (каменноугольные отложения) в американской части бассейна Уиллистон в штатах Монтана и Северная Дакота, а также в канадской части этого бассейна. Оценка основана на геолого-геохимических элементах всей нефтегазовой системы, включающей распределение материнских пород, их толщину, содержание ОВ, стадийность катагенетических преобразований, условия образования нефти и миграцию, а также тип

**Локально высокие значения содержания промышленно ценных микроэлементов в расчете на золу каустобиолитов ( $C_i^A_{\text{max}}$ ) и их минимальное содержание ( $C_i^A_{\text{min}}$ ), обуславливающие целесообразность их извлечения**

Микро-элементы	$C_i^A_{\text{min}}$ , г/т	$C_i^A_{\text{max}}$ , г/т			
		уголь	черные сланцы	горючие сланцы	нефть
Ag	10	50	5	5	10,8
Au	0,2	4	44	2,0	1,75
Co	100	400	50	50	400
Ge	150	2000	5	5	10
Hg	20	40	1,0	2	3500
Mo	100	300	125	1000	4000
Ni	300	300	300	100	28 000
Re	0,5	20	67,5	5	5,4
Se	50	100	62,5	10	500
V	1000	10 000	750	400	73 000

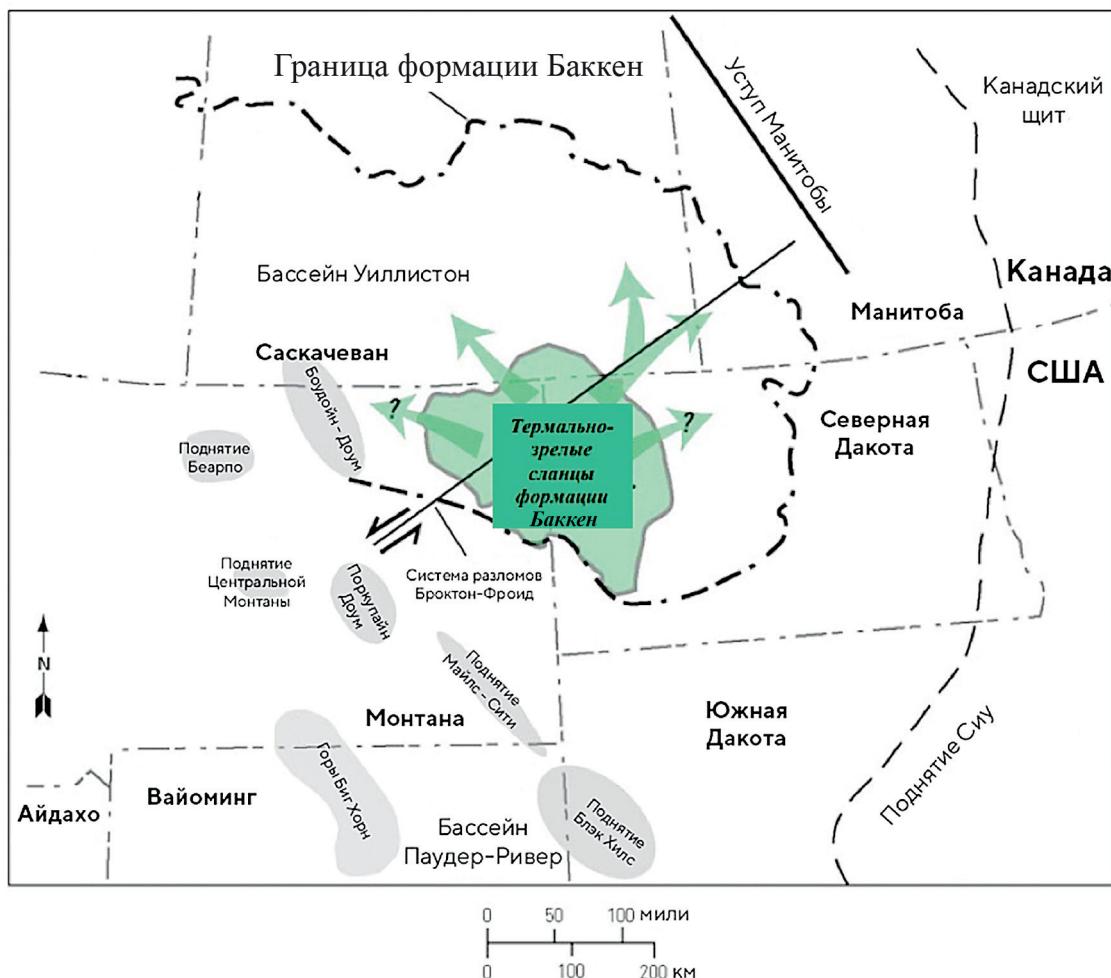


Рис. 4. Площадь распространения термически зрелых материнских пород, генерирующих нефть формации Баккен, и вероятные пути ее миграции, по [Прищепа и др., 2013], на основании данных из [Pollastro et al., 2011]

пород-коллекторов (обычный или непрерывный). На основании этих данных для формации Баккен были количественно оценены неоткрытые ресурсы нефти и попутного газа. Миграцию и формирование резервуаров формации Баккен на большое расстояние иллюстрирует рис. 4.

Латеральная миграция в пределах формации Баккен, возможно, ограничена из-за низкой пористости и проницаемости отложений, однако добыва УВ ведется на большом расстоянии от очагов генерации, что свидетельствует о значительном перемещении микронефти и наличии протяженных ловушек (*continuous*). Существующая система разломов, по мнению [Pollastro et al., 2011], также способствует миграции битумоидов нефтематеринской толщи.

В работе китайских исследователей [Jing-Zhou Zhao et al., 2019] описаны и проиллюстрированы скопления УВ в бассейне Ордос, представляющие собой систему протяженных ловушек, заполняющих продуктивные участки триасовой формации сланцев Яньчань (пласты Чанг 6-8).

Латеральная выдержанность слоев и пачек пород доманиковой толщи Волго-Уральского нефтега-

зоносного бассейна (НГБ) распространяется на всей территории Кашаевского участка (Муханово-Ерховский прогиб) и выходит за его пределы. Учитывая повсеместную нефтенасыщенность доманиковой толщи и связь повышенной пористости пород с кремнисто-карbonатными слоями, обогащенными ОВ, предполагается [Ульмишек и др., 2017], что промышленные притоки нефти при условии применения оптимальной технологии будут получены на всей этой территории из продуктивной части разреза. Результаты аналитических работ [там же] по сопоставлению биомаркеров показывают высокую корреляцию нефти, полученных при опробовании различных интервалов разреза скважины, с битумоидами, экстрагированными из пород в тех же интервалах, это явственно доказывает, что источником нефти в поровом пространстве пород доманиковой толщи является ОВ, содержащееся в тех же породах.

По мнению многих исследователей, в частности [Ступакова и др., 2015; Варламов и др., 2020], высокоуглеродистые тонкослоистые карбонатно-кремнистые отложения доманиковой формации Волго-Уральского НГБ, имеющие широкий страти-

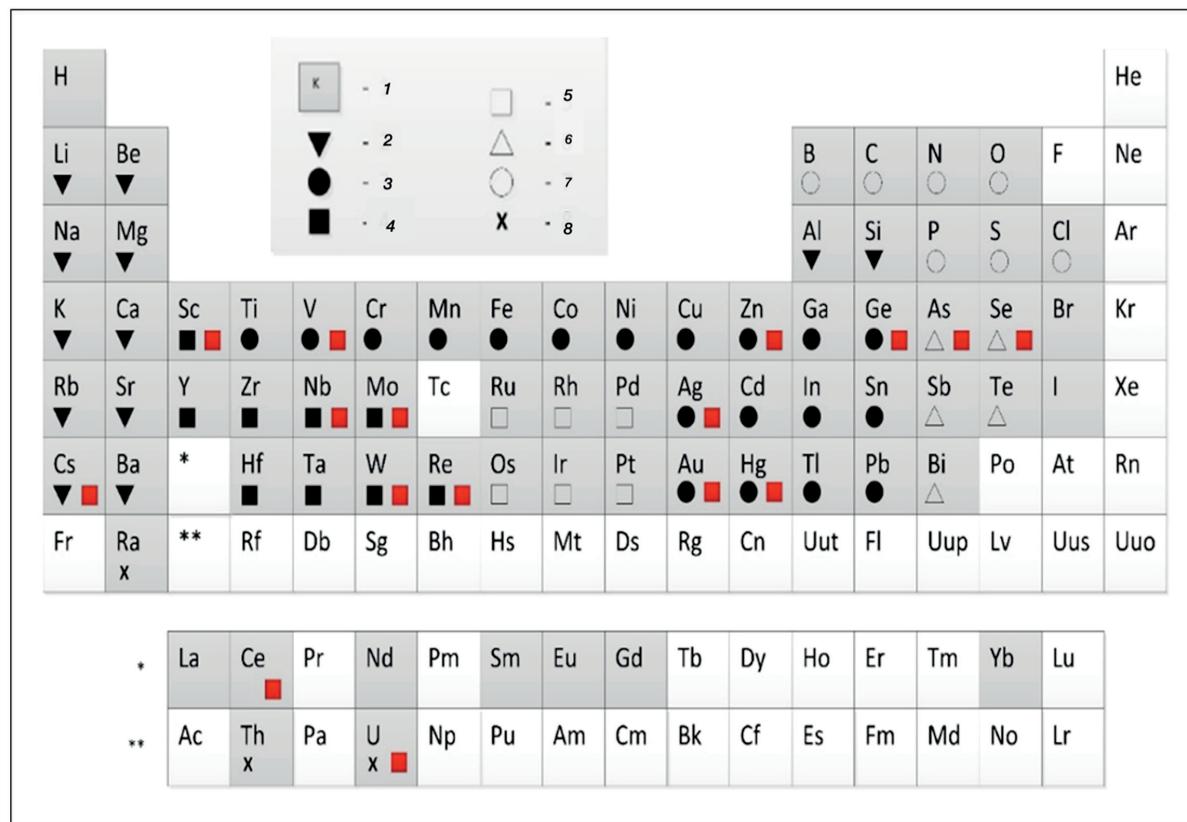


Рис. 5. Характеристика распределения МЭ в сланцах: 1 — МЭ, идентифицированные в каустобиолитах; элементы, согласно классификации А.Н. Заварицкого; 2 — МЭ горных пород; 3 — металлические и группы железа; 4 — редкие; 5 — группы платины; 6 — металлоидные; 7 — магматических эманаций; 8 — радиоактивные

графический диапазон от верхнефранского подъяруса до фаменского яруса верхнего девона и частично турнейского яруса нижнего карбона, — одни из самых перспективных объектов для будущего масштабного освоения сланцевых формаций. К их характерным особенностям относятся повышенная концентрация водорослевого ОВ и высокий генерационный потенциал.

**Обогащенность сланцевых формаций потенциально токсичными элементами (ПТЭ).** На рис. 5 в поле Периодической таблицы Д.И. Менделеева представлена усредненная характеристика обогащенности сланцев МЭ относительно кларков (К) глинистых пород по А.П. Виноградову и с учетом классификации элементов по А.Н. Заварицкому. Анализ этих данных подчеркивает широкое разнообразие состава МЭ в сланцевых отложениях. По величине  $Q_i$  ( $Q_i$  — отношение концентрации элемента в сланцах к кларку этого элемента) нами выделены различные градации статистической оценки [Пунанова, 2020]. В группу элементов, обогащающих каустобиолиты, входят элементы горных пород, группы железа, металлические, редкие, металлоидные, радиоактивные. Величины обогащения оказываются в ряде случаев аналогичны значениям концентрации элементов в рудных месторождениях, что позволяет использовать месторождения сланцевых формаций комплексно, т. е. и как потенциальный источник ряда рудных элементов.

Концентрация Sc, Ce, As, Cs, Au, U, Ge, V, W, Zn, Nb, Re, Se, Ag, Mo, Hg (выделены красным квадратом) в сланцах выше кларков глин (на сухую массу сланцев  $Q_i > 1,4K$ ); причем значения содержания Re, Se, Ag, Mo, Hg превосходят кларки в глинах более чем в 3,5 раза ( $Q_i > 3,5K$ ).

Ранее автором были проведены детальные исследования по оценке содержания МЭ в черных и горючих сланцах на примере отдельных регионов: в доманиковых отложениях Волго-Урала, в баженовской свите Западной Сибири, в куонамской горючесланцевой формации на востоке Сибирской платформы, в сланцах Кендерлыкского месторождения (Казахстан), в сланцах формации Барнетт и Грин Ривер (США), в менилитовых отложениях Польши, в формации Нерке (Швеция), в сланцах Болгарии, Республики Беларусь и др. Так, например, содержание следующих МЭ выше, чем кларки глин (рис. 6) в сланцах Zr, Zn, Cu, Pb, Mo, Ag, V (Польша); Sr, Cr, Pb, Mo, Ag (Грин-Ривер, США); V, Pb, Zn, Mo, Ti (Швеция) [Punanova, Nukenov, 2017; Punanova, 2019].

Сланцевые отложения с повышенным содержанием ряда элементов могут стать источником дополнительной добычи последних. Те каустобиолиты, в которых концентрация одного или нескольких МЭ больше  $C_{min}$  (таблица), называют, как и угли, металлоносными.

Металлоносные сланцы, по существу, представляют собой комплексное сырье для использования

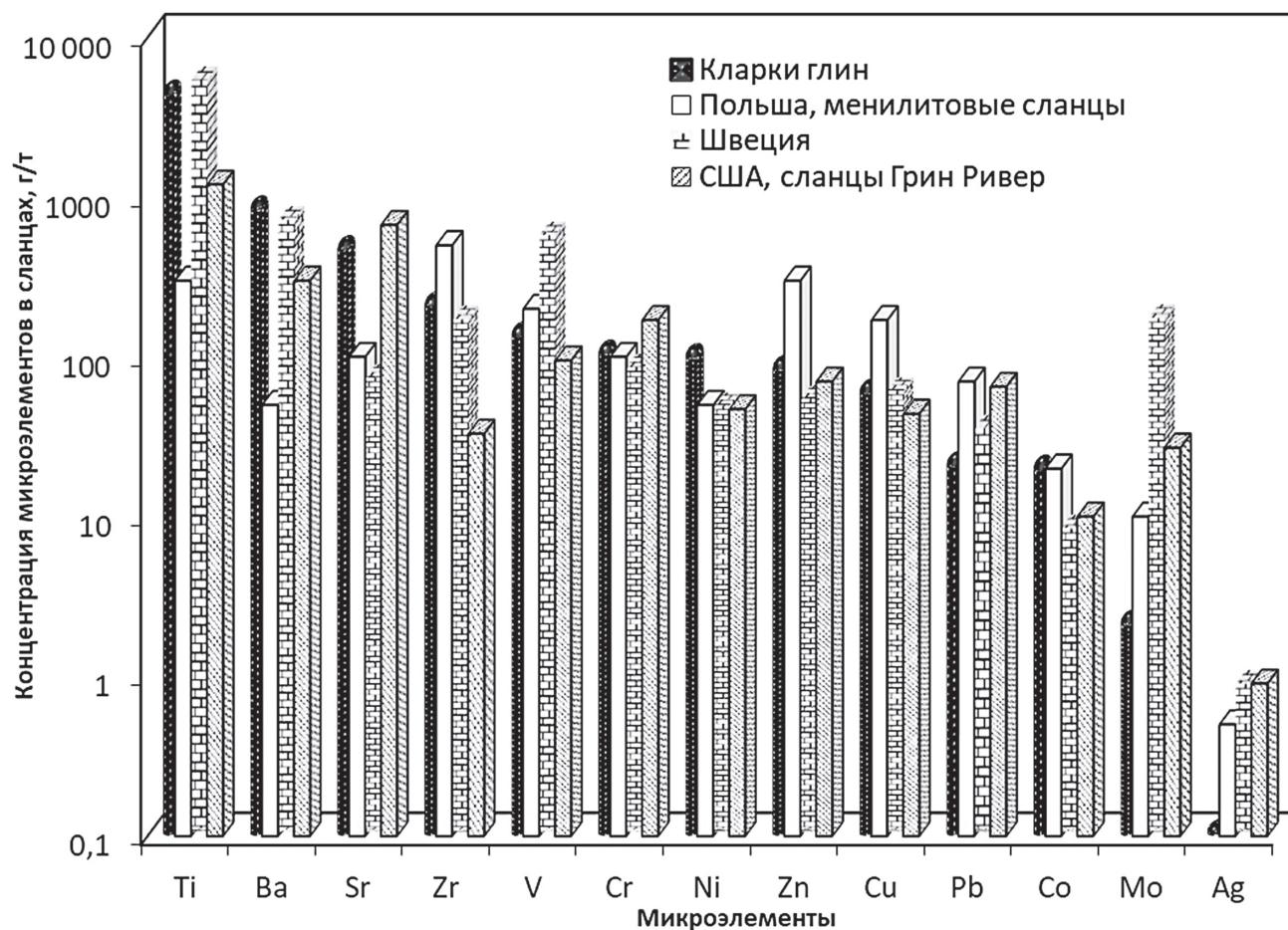


Рис. 6. Концентрация рудных элементов в сланцах различных регионов

МЭ и их энергохимического потенциала. Величины  $C_{min}$  зависят от многих причин, в первую очередь — от возможности рентабельного использования их органических веществ в сланцах и извлечения МЭ из побочных продуктов этих процессов. Горючие сланцы некоторых месторождений, отличающиеся повышенным содержанием U, уже используют для его промышленного получения. Минимальные значения содержания других МЭ, обусловливающие перспективность и рентабельность возможного извлечения их из сланцев, могут быть приняты (в первом приближении) равными значениям содержания  $C_{min}$  (таблица) [Punanova, Shpirt, 2018].

**Экологические риски от разработки сланцевых формаций.** Обогащенность сланцевых формаций разнообразным набором химических элементов, и главное ПТЭ, к которым относят Fe, As, Be, Cl, Co, Cr, F, Hg, Mn, Ni, Pb, Sr, Sb, Se, Tl, V, Zn, U, Th, Rn и некоторые другие, не может не повлиять на процессы разработки сланцевых ресурсов в плане экологической ситуации [Пунанова, Родкин, 2022]. Известно, что многие элементы, содержащиеся в сланцах и УВ сырье, из них добываемом, образуют биологически инертные прочно химически связанные металлоорганические соединения как в сланцах, так и в нефтях и битумах. Однако эти элементы становятся активно опасными в микроди-

сперсном состоянии после техногенного, особенно высокотемпературного ( $>450^{\circ}\text{C}$ ) воздействия на сырье. Тепловое воздействие на пласт, увеличение пластового давления, закачка химических реагентов пропантов и жидкостей при гидроразрыве пласта (ГРП), большое количество перфораций на протяжении длинного горизонтального участка (нетрадиционные многокилометровые ловушки) часто приводят к высвобождению элементоорганических компонентов, образованию газообразных соединений экологически опасных элементов. Образование при этом большой площади новых трещин и в связи с этим новых дополнительных контактов, соответственно, увеличивает возможность их попадания в окружающую среду.

Лабораторное моделирование, проведенное нами, а также данные ряда зарубежных публикаций свидетельствуют о возможности перехода при высоких значениях температуры элементов (V, Mo, Ni, Fe, Pb, Au, Cu, Zn и, вероятно, др.) из ОВ в окружающую среду, возможно, за счет деструкции металлоорганических соединений [Бабаев, Пунанова, 2014; Abaraghani et al., 2020]. Исследования в этом направлении необходимо продолжать.

Исходя из современных реалий пристальное внимание и озабоченность в экологическом аспекте вызывает разработка сланцевых формаций (рис. 7).

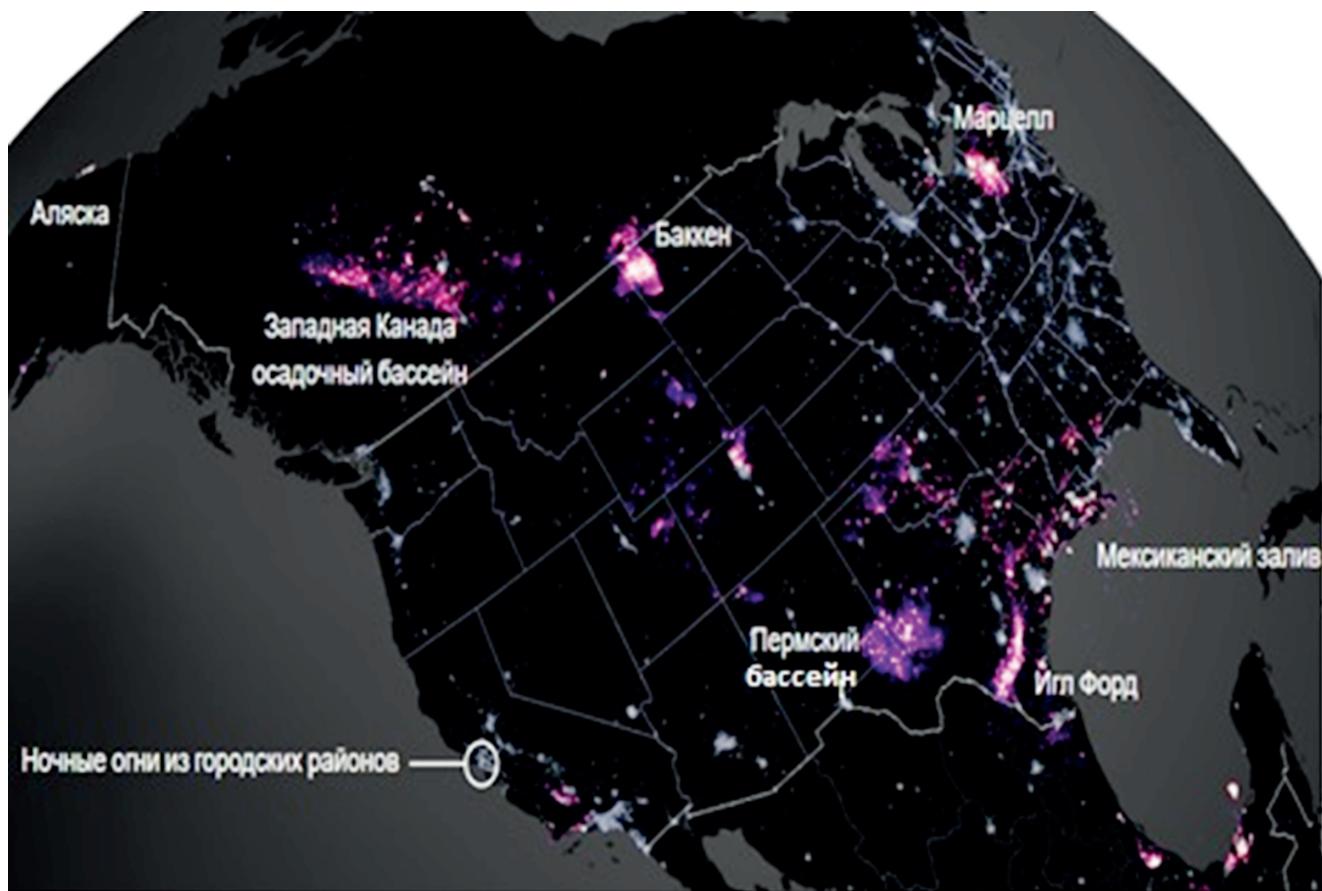


Рис. 7. Факелы природного газа над сланцевыми формациями Северной Америки и Канады, по <https://www.washingtonpost.com/graphics/national/united-states-of-oil/>

Практически до последнего времени продолжают гореть «избытки» газа при разработке сланцевых формаций, выбрасывая в атмосферу вредные, экологически опасные соединения.

Экологические последствия разработки сланцевых формаций, связанные с их обогащенностью ПТЭ, подтверждаются многими примерами. В обобщающей обзорной работе [Parviainen, Loukola-Ruskeeniemi, 2019] отмечено аномальное обогащение подземных и поверхностных вод различными тяжелыми металлами, что фиксируется при разработке сланцевых формаций мира: протерозойских сланцев месторождений Финляндии (Талвиваара), обогащенных Ni, Zn, Cu, Co; кембрийских месторождений в Швеции, обогащенных U и Mo; кембрийско-ордовикских сланцевых месторождений Южной Кореи; кембрийских сланцев месторождений Китая, обогащенных Ni, Mo, РЗЭ; девонских месторождений сланцев в Юконе (Канада) и Кентукки (США), обогащенных Ni, Zn, РЗЭ; пермских сланцевых месторождений Польши и Германии, обогащенных Cu, Ag; и в других регионах. На рис. 8 показаны высокие значения концентрации элементов в подземных и поверхностных водах, связанные с их миграцией

из сланцевых отложений в окружающую среду при разработке.

В сланцевом бассейне Баккен в Северной Дакоте (США) на протяжении длительного периода времени (с 2007 по 2014 г. и позже) отмечен параллельный рост годовой добычи нефти из нетрадиционных коллекторов сланцевого бассейна и количества разливов рассола с ПТЭ. В дополнение к повышенной концентрации растворенных солей (Na, Cl, Br) разливные воды также характеризовались повышенной концентрацией вредных примесей. В них значительно повышены уровень солей и содержание V, Se, Li, Pb, B и Sr в местах разлива рассолов, сохраняющиеся от месяца до 4 лет. Кроме того, выявлено накопление долгоживущих изотопов  $^{226}\text{Ra}$  в отложениях почв на участках разлива [Lauer et al., 2016]. Быстрый рост добычи нетрадиционной нефти в течение последнего десятилетия в регионе Баккен в Северной Дакоте вызывает обеспокоенность общественности в связи с загрязнением воды в результате случайных выбросов в окружающую среду сточных вод при добывче нефти и газа.

На рис. 9 приведена схематическая реконструкция возможных путей загрязнения природной среды

Рис. 8. Минимальные, средние и максимальные значения pH и концентрации Cu, Ni, Zn и U (мкг/л) в подземных (G) и поверхностных водах (S) в отдельных местах расположения черных сланцев, затронутых добычей полезных ископаемых или другой антропогенной деятельностью, по [Parviainen, Loukola-Ruskeeniemi, 2019]

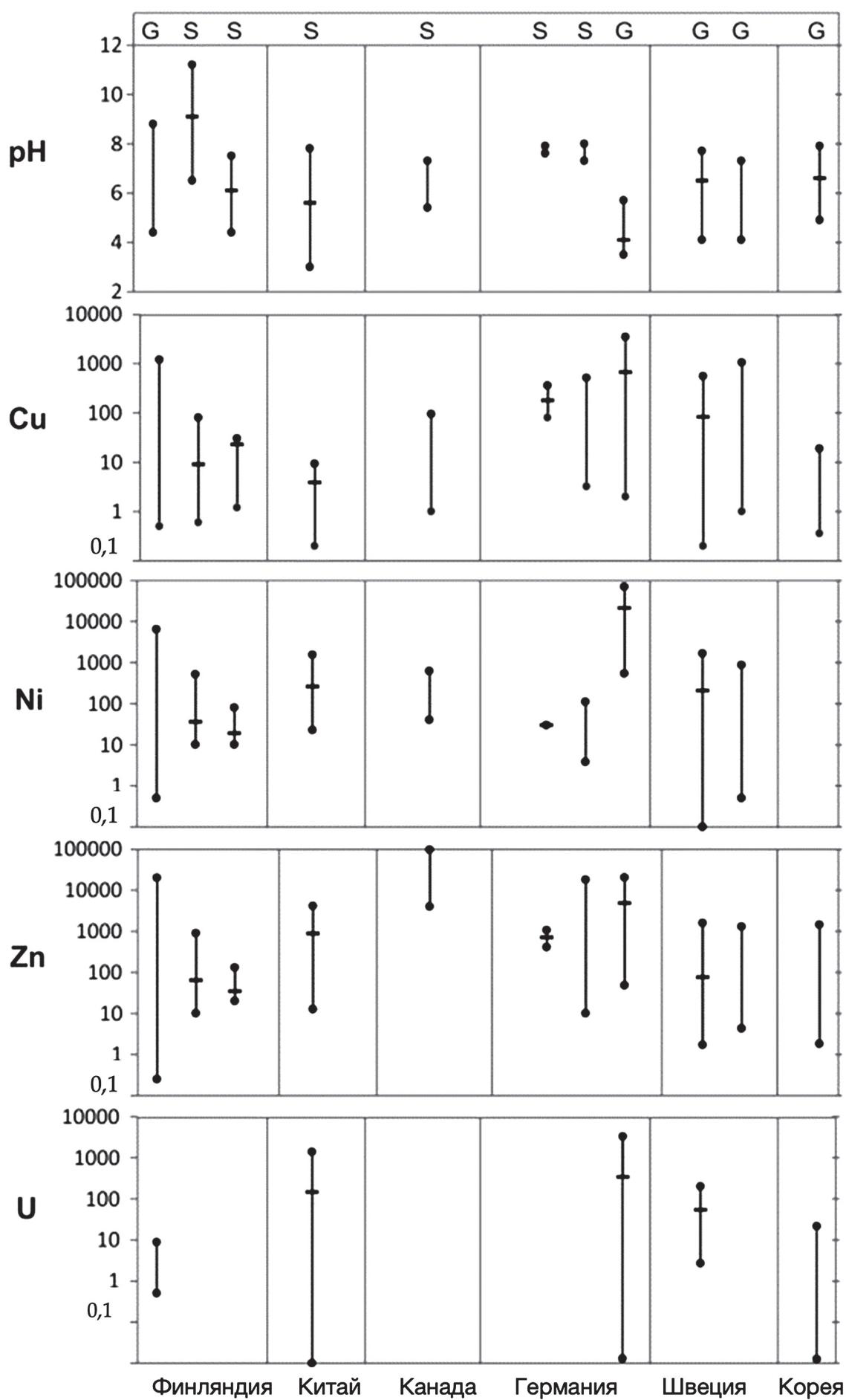




Рис. 9. Суммарный эффект отрицательных коллизий при разработке сланцевых ресурсов, по [Варламов и др., 2013], с добавлениями автора

ПТЭ и другие многочисленные проявления негативного влияния на окружающую среду процесса разработки и извлечения УВ ресурсов из сланцевых формаций.

**Заключение.** В связи с рассмотренными в работе особенностями углеродсодержащих формаций — нетрадиционностью ловушек (большие по площади, протяженные продуктивные мегарезервуары), а также с высокой концентрацией экологически опасных химических элементов — требуется новый подход к их изучению на всех этапах геологоразведочных работ.

При горизонтальном бурении и массовом применении гидроразрывов пласта возникает большой объем новообразованных поверхностей и трещин, что порождает опасность загрязнения геосреды ранее практически изолированными в углеродсодержащих формациях и неактивными металлоорганическими соединениями. Такая опасность особенно

возрастает при тепловой обработке пласта и закачке большого объема химически активных реагентов.

Для учета экологической ситуации на участках, вводимых в разработку, минимизации экологических рисков и принятия решений о комплексной технологии переработки сланцев с извлечением газа, нефти и, возможно, металлов необходимы дополнительные исследования и мониторинг микроэлементного состава сланцевых формаций для проведения экологической экспертизы с целью воспрепятствовать попаданию токсичных элементов в окружающую среду и в буровое оборудование.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: «Научно-методические основы поисков и разведки скоплений нефти и газа, приуроченных к мегарезервуарам осадочного чехла № 122022800253-3».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абукова Л.А., Карцев А.А.* Флюидные системы осадочных нефтегазоносных бассейнов (типы, основные процессы, пространственное распространение) // Отеч. геология. 1999. № 2. С. 11–16.
- Бабаев Ф.Р., Пунанова С.А.* Геохимические аспекты микрэлементного состава нефти. М.: ООО «Изд. дом Недра», 2014. 181 с.
- Брод И.О.* Залежи нефти и газа, формирование и классификация. М.: Гостоптехиздат, 1951. 350 с.
- Варламов А.И., Афанасенков А.П., Пырьев В.И.* и др. Основные виды источников нетрадиционных ресурсов УВС и перспективы их освоения // Докл. Всеросс. совещ. «Методические проблемы геологоразведочных и научно-исследовательских работ в нефтегазовой отрасли», посвященное 60-летию образования ФГУП «ВНИГНИ». М., 2013.
- Варламов А.И., Мельников П.Н., Пороскун В.И.* и др. Результаты изучения и перспективы освоения нетрадиционных залежей нефти в высокоглубоких карбонатно-кремнистых отложениях доманиковой формации Волго-Уральской провинции // Геология нефти и газа. 2020. № 6. С. 33–52. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-6-33-52.
- Вассоевич Н.Б., Вассоевич О.М., Назаревич И.А.* Геохимия органического вещества и происхождение нефти. М.: Наука, 1986. 368 с.
- Вассоевич Н.Б., Высоцкий И.В., Гусева А.Н., Оленин В.Б.* Углеводороды в осадочной оболочке Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1967. № 5. С. 36–48.
- Вассоевич Н.Б., Иванов А.Н.* Учение о биосфере: к 50-летию выхода в свет основополагающего труда В.И. Вернадского «Биосфера» // Тез. докл. Органическое вещество в современных ископаемых осадках: V Всесоюз. семинар. Москва, 8–10 июня 1976 г. М., 1976. С. 15–16.
- Вассоевич Н.Б., Иванов А.Н.* К истории учения о биосфере // Методология и история геологических наук. М., 1977. С. 57–94.
- Вернадский В.И.* Биосфера. 5-е изд. // Библиотека трудов академика В.И. Вернадского. Живое вещество и биосфера. М.: Наука, 1994. 669 с.
- Гольдберг И.С., Мицкевич А.А., Лебедева Г.В.* Углеводородно-металлоносные провинции мира, их формирование и размещение // Проблемы оценки ресурсов и комплексного освоения природных битумов, высоковязких нефти и сопутствующим им металлов. Л.: ВНИГРИ, 1990. С. 49–60.
- Еременко Н.А.* Геология нефти и газа. М.: Гостоптехиздат, 1961. 372 с.
- Прищепа О.М., Аверьянова О.Ю., Высоцкий В.И., Морариу Д.* Формация Баккен: геология, нефтегазоносность и история разработки // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. № 2. URL: <http://www.ngtp.ru/>
- Пунанова С.А.* Микрэлементный состав каустобиолитов и процессы нефтегенерации — от гипотезы Д.И. Менделеева до наших дней // Георесурсы. 2020. Вып. 22, № 2. С. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.45-55>
- Пунанова С.А., Родкин М.В.* Геоэкологические риски при освоении сланцевых углеводородных ресурсов // Геология нефти и газа. 2022. № 1. С. 109–118.
- Соболева Е.Н.* Особенности строения и перспективы нефтеносности отложений доманикового типа в пределах Муханово-Ероховского прогиба // Вестн. Пермского ун-та. Геология. 2020. Вып 19, № 2. С. 183–188.
- Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А.* и др. Поисковые критерии нефти и газа в доманиковых отложениях Волго-Уральского бассейна // Георесурсы. 2015. Вып. 61, № 2. С. 77–86. DOI: 10.18599/grs.61.2.7.
- Тиско Б., Вельте Д.* Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 501 с.
- Ульмишек Г.Ф., Шаломеенко А.В., Холтон Д.Ю., Дахнова М.В.* Нетрадиционные резервуары нефти в доманиковой толще Оренбургской области // Геология нефти и газа. 2017. № 5. С. 57–67.
- Шустер В.Л.* Методический подход к прогнозу в нефтегазоносных бассейнах зон, благоприятных для формирования неантклинальных ловушек // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 29, № 2. С. 64–71. URL: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art5>
- Abarghani A., Gentzis T., Bo Liu et al.* Preliminary investigation of the effects of thermal maturity on redox-sensitive trace metal concentration in the bakken source rock, North Dakota, USA // ACS Omega. 2020. Vol. 13, N 5. P. 7135–7148.
- Dolson J., He Zhiyong, Horn B.* Advances and perspectives on stratigraphic trap exploration-making the subtle trap obvious // Search and Discovery. 2018. Article 60054, 67.
- Jing-Zhou Zhao, Jun Li, Wei-Tao Wu et al.* The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities // Petrol. Sci. 2019. Vol. 16. P. 229–251.
- Lauer N.E., Harkness J.S., Vengosh A.* Brine spills associated with unconventional oil development in North Dakota // Environ. Sci. & Technol. 2016. Vol. 13. P. 1–9. DOI: 10.1021/acs.est.5b06349
- Parviaainen A., Loukola-Ruskeeniemi K.* Environmental impact of mineralized black shales // Earth Sci. Rev. 2019. Vol. 192. P. 65–90.
- Pearson K.* Geologic models and evaluation of undiscovered conventional and continuous oil and gas resources — Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast U.S. // Geol. Surv., Virginia, Reston, 2012.
- Pollastro R.M., Roberts L.N.R., Cook T.A., Lewan M.D.* Assessment of undiscovered technically recoverable oil and gas resources of the Bakken Formation, Williston Basin, Montana and North Dakota. U.S. // Geol. Surv. 2008. Open-File Rep. 2008-1353. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1353/>
- Punanova S.* Trace element composition of shale formations // 29-th International Meeting on Organic Geochemistry (EAGE-IMOG) September 2019, Gothenburg, Sweden. All Abstr. 2019. P. 495–496.
- Punanova S.A., Nukenov D.* The question of environmental consequences at horizontal drilling of shale formations in connection with their enrichment with microelements // Georesursy =Georesources. 2017. Vol. 19, N 3. P. 239–248.
- Punanova S.A., Shpirt M.Ya.* Ecological consequences of the development of shale formations containing toxic elements // Solid Fuel Chemistry. 2018. Vol. 52, N 6. P. 396–405.

Статья поступила в редакцию 09.03.2022,  
одобрена после рецензирования 09.03.2022,  
принята к публикации 31.08.2022