



Пожар на танкере. Фото с сайта <http://www.webpark.ru/comment/58370>.

УДК 665.6:551.35.051+552.578.3



Беленицкая Г.А.

Потоки углеводородов, нефтоседиментогенез и проблемы черных сланцев¹

Часть 1. Аварийные разливы нефти: экологические следствия

Беленицкая Галина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ)

E-mail: Galina_Belenitskaya@vsegei.ru, ankudinovo@mail.ru

Автор обосновывает «нафтогенную модель» накопления высокоуглеродистых (черносланцевых) комплексов. С позиций седиментологии проанализированы следствия аварийных разливов и природных разгрузок углеводородов, их ударные воздействия на бассейновые экосистемы и седиментогенез. В первой части показано, что аварийные нефтяные разливы могут рассматриваться как аналоги природных «очагов разгрузки» углеводородов с обширными растекающимися и мигрирующими «ореолами».

Ключевые слова: аварийные нефтяные разливы, углеводороды, черные сланцы, горючие сланцы, высокоуглеродистые отложения, техногенные и экологические катастрофы, нефтоседиментогенез, микробные биоценозы, альго-циано-бактериальные сообщества, тафоценозы.

Настоящее есть ключ к прошлому.

Ч. Лайель

Нефть носилась поверх воды, прибывалась к берегам и давала там смолистые сланцы, богхед, асфальтовые образования, озокерит и т.д.

Д.И. Менделеев

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 03-05-65100-а, 07-05-00907-а

Введение

Интереснейший геологический объект «черные сланцы» фокусирует в себе узловые проблемы целого ряда дисциплин: седиментологии и литологии, палеоэкологии и событийной стратиграфии, минерагении и нефтегазовой геологии и др. «Черносланцевыми» зачастую именуются даже крупнейшие геологические события, включая глобальные, затрагивающие важнейшие сферы жизни планеты. Повышенному интересу к черным сланцам способствует их необычайно высокий, разнообразный и неуклонно растущий ресурсный потенциал.

Вместе с тем, вопросы генезиса и условий образований этого столь значимого объекта остаются весьма противоречивыми и спорными. Прежде всего это касается его главного компонента – органического вещества (ОВ). Расшифровка этих вопросов составила основную цель исследования.

Для ее реализации в анализ вовлечена информация, характеризующая широкий спектр объектов:

1. Аварийные разливы и выбросы нефтей и других углеводородов (УВ) – техногенные аналоги естественно-природных УВ-разгрузок.
2. Современные естественно-природные УВ-разгрузки и их следствия. Заметим сразу, что масштабные международные морские исследования последних десятилетий выявили чрезвычайно широкое и разнообразное воздействие восходящих флюидных разгрузок, в том числе «холодных» УВ-содержащих, на современные бассейновые экосистемы и седиментационные процессы, обнаружив, что под их воздействием может осуществляться, в частности, и накопление осадков, обогащенных углеродистым веществом, весьма сходным с образующим черносланцевые комплексы.
3. Собственно черносланцевые комплексы осадочных разрезов, которые мы считаем главными седиментационными производными природных УВ-разгрузок – их литологические, биотические, геохимические, морфологические, изотопные и другие особенности, соответствие этих особенностей показателям седиментационных производных современных УВ-разгрузок.
4. Свидетельства былых флюидных разгрузок, содержащих УВ и металлы, – предполагаемых причин и источников углеродо- и металлонакопления в осадках. Все эти вопросы в разные годы обсуждались автором¹.

В первой части публикации рассматриваются результаты анализа объектов первой группы – техногенных аварийных разливов УВ. Мы попытались взглянуть на катастрофические нефтяные разливы и их разнообразные следствия – одну из злободневных проблем современной жизни – глазами седиментолога с целью оценить особенности их последующего отражения в «нафтогенных»² осадках. Иначе говоря, прочитать формирующую ныне эколого-седиментационную запись «нафтогенных событий», ориентируясь при этом на выявление аналогий с известными признаками черносланцевых отложений геологического прошлого.

Нефтяные аварии и их следствия представляют собой по сути своеобразные гигантские антропогенные «модельные эксперименты», охватывающие разные звенья нафтогенной системы: нефтяные разливы и их физико-химические следствия → экстремальные (аномальные) нафтогенные бассейновые экосистемы (нафтогенные биотопы и нафтогенные биоценозы) → нафтогенные осадки. Существенно, что информация об этих системах весьма обширна, а их изученность (вынужденная) ныне значительно превысила таковую их природных аналогов – естественно-природных поступлений (разгрузок) УВ. В отличие от нефтяных, хуже изучены и менее информативны следствия «газовых» техногенных аварий, подобных выбросам и утечкам на подводных газопроводах. (Но зато именно о газовых субаквальных разгрузках и об их экологических и седиментационных следствиях на современных естественно-природных очагах разгрузки – метановых сипах, факелах и подобных им образованиях – в последние десятилетия получен богатый и разносторонний материал). Важно, что при разгрузке как нефтей, так и УВ-газов общая последовательность процессов и их эколого-седиментационные итоги, с одной стороны, достаточно близки³, а с другой – имеют весьма значимые различия, которым по-видимому во многом обязано разнообразие черносланцевых комплексов (по характеру углеродистого вещества, сопутствующей минерализации, геохимическим характеристикам и др.). Так что совместный сравнительный анализ представляется наиболее эффективным.

Возможность использования для познания генезиса черных сланцев данных о техногенных нефтяных раз-

¹ Беленицкая Г.А. Геолого-динамическая модель формирования высокоуглеродистых образований // Всесоюзная конференция «Геохимия, минералогия и литология черных сланцев». Сыктывкар, 1987. С. 107–108; Она же. О роли глубинных флюидов в черносланцевой седиментации. Высокоуглеродистые образования в геолого-генетических моделях галогенеза // Междунар. симп. «Бассейны черносланцевой седиментации и связанные с ними полезные ископаемые». Новосибирск, 1991. Т. 1. С. 21–24; Она же. Углеводородные флюиды в системе восходящих разгрузок в область седиментогенеза. Черные и горючие сланцы в системе седиментационных производных восходящих разгрузок // Всероссийская конференция «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы». Москва, 2008. С. 62–68; Она же. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий геологического прошлого // Рег. геол. и металлогения. 2010. № 42. С. 17–33; Она же. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива) // Пространство и Время. 2012. № 3(9). С. 193–207; Она же. Высокоуглеродистые комплексы как производные нафтидных палеоразгрузок и некоторые проблемы сланцевых углеводородов // Всероссийская конференция с международным участием. «Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы разработки». М.: ГЕОС, 2013. С. 28–31.

² Нафтиды (от нафта – нефть) – термин, объединяющий углеводороды в газовом, жидком, полутвердом и твердом состояниях (т.е. газы, конденсаты, нефти и их естественные производные – мальты, асфальты, асфальтиты, озокериты и пр.) или в виде их смесей (Леворсен А. Геология нефти и газа. М., Мир. 1970. 640 с.; Словарь по геологии нефти и газа. Л.: Недра. 1988. 679 с.); нафтогенные – генетические производные нафтидов.

³ Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Наука. 2009. 576 с.

ливах и о естественно-природных УВ-разгрузках обсуждалась автором в разные годы¹.

Обширная информация об аварийных разливах нефти заимствованы из специальных монографий, публикаций в периодических изданиях и на сайтах Интернета. Наиболее систематические обзоры проблемы выполнены А. Нельсоном Смитом² и И.А. Немировской³. Приводимые ниже материалы были частично опубликованы⁴. Здесь они несколько дополнены новой информацией, в том числе полученной в связи с недавней крупнейшей аварией в Мексиканском заливе на платформе Deepwater Horizon⁵.

Черные сланцы: термины, типоморфные свойства, проблемы генезиса

Термины и типоморфные особенности черных сланцев. Уточним, что такое «черные сланцы», каковы их необычные особенности и что, собственно, желательно разглядеть в их предполагаемых техногенных аналогах.

Термин «черные сланцы» традиционно применяется по отношению к стратифицированным водно-осадочным отложениям, значительно обогащенным (от 1–2% до 20–30%, иногда более) сингенетичным сапропелевым ОВ, обычно темным, преимущественно пелитоморфным, с существенно карбонатно-глинисто-кремнистым (иногда туфовым) составом минеральной (неорганической) массы, нередко с характерным микрослойчатым сложением и часто с повышенной металлоносностью. Близкое определение черным сланцам дают Я.Э. Юдович и М.П. Кетрис⁶. Термин признается исследователями неудачным: сплошь и рядом черные сланцы вовсе не черные (то – серо-коричневые, то – зеленоватые), геологическому понятию «сланцы» они не всегда отвечают, да и другие типоморфные особенности (пелитоморфность, микрослойчатость) выражены далеко не у всех их разновидностей.

Другой довольно часто используемый термин – высокоуглеродистые (или углеродистые) отложения – по своей сути несколько более удачен, поскольку правомерен и в отношении самых разных литологических и фациальных разновидностей, а включают черные, пелитоморфные и микрослойчатые отложения (каковые наиболее отвечают представлению о черных сланцах) лишь как наиболее характерную, доминирующую и легко опознаваемую разновидность.

Еще ряд используемых терминов: «керогенсодержащие комплексы», «углистые аргиллиты» и др. – также имеют существенные ограничения. Предложенный А.Е. Лукиным⁷ термин «гидрокарбопелиты» (где частица «карб» означает углерод) пока не нашел поддержки, возможно, из-за некоторой громоздкости и созвучности общепринятому термину «карбонаты», где та же частица обозначает принадлежность к классу производных угольной кислоты. Часто используются, кроме того, различные региональные наименования – бажениды, кукерситы, доманикиты и др.

Разновидности, наиболее обогащенные ОВ (до 10–20% и более) и содержащие свободные битумы, определяющие их горючесть, принято называть «горючими сланцами».

Еще одно близкое понятие – нефтематеринская свита – применяется преимущественно по отношению к черносланцевым комплексам осадочных чехлов, не метаморфизованным, ограниченно дислоцированным и, благодаря этому, еще не лишенным, как принято считать, нефтематеринского потенциала, т.е. способности в определенных условиях выделять свободные УВ-флюиды – ведущей особенности нефтематеринских свит⁸.

Пока же термин черные сланцы и в меньшей мере высокоуглеродистые (или углеродистые) отложения в отечественной литературе наиболее распространены. Мы будем использовать их как термины свободного пользования.

Теоретический и практический интерес к черным сланцам (этот интерес в разное время проявляли М.Д. Залесский, А.И. Гинзбург, Р.Ш. Мингарев, С.Г. Неручев, Н.В. Лопатин, В.А. Каттай, Я.Э. Юдович, А.В. Лапо, Г.М. Парпарова, И.Б. Волкова, С.И. Жмур, А.Ю. Розанов и др.) – и высокоуглеродистым отложениям в целом – обязан ряду их особенностей, для других пород весьма необычных, а для них типоморфных. Некоторые из них проиллюстрированы на рис. 1. Помимо уже приведенных в определении типоморфных особенностей (прежде всего, аномально высокую обогащенность ОВ, темный, до черного, цвет, преобладающая пелитоморфность, тонкая горизонтальная микрослойчатость, до листоватости), отметим еще ряд наиболее существенных из них:

– преобладание в микрокомпонентном сложении ОВ гомогенных масс: клеточно-микробных, преимущественно альго-циано-бактериальных и/или бесструктурных, изотропных, однозначно не идентифицируемых (соответственно, талломоальгинита и/или коллоальгинита и сорбомиксинита⁹);

– однообразие и бедность таксономического состава макро- и мезобиот, довольно скудно представленных в массе ОВ; при этом – заметное развитие отдельных таксонов, иногда имеющих выраженную

¹ Беленицкая Г.А. Указ. соч.

² Нельсон-Смит. Загрязнение нефтью / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 124 с.

³ Немировская И.А. Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). М.: Научный Мир, 2004. 328 с.; Она же. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный Мир, 2013. 432 с.

⁴ Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий геологического прошлого.

⁵ Беленицкая Г.А. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз...

⁶ Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.; Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука. 1994. 304 с.

⁷ Лукин А.Е. Литогенетические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. Киев: Наукова думка, 1997. 224 с.

⁸ Баженова О.К., Баженова Т.К. Происхождение нефти – фундаментальная проблема геологии (современное состояние проблемы) // Литол. и пол. ископ. 2008. № 5. С. 541–552.

⁹ По: Гинзбург А.И. Органическое вещество петрографических типов горючих сланцев (на примере некоторых месторождений СССР) // Литол. и пол. ископ. 1969. № 4. С. 39–52.

«углеродистую» и/или ту или иную минеральную специализацию (совпадающую, соответственно, со «специализацией» ОВ и/или парагенных ему аутигенных образований);

– широкое распространение обогащенных ОВ продуктов и следов жизнедеятельности организмов – копролитов, ихнитов;

– контрастный (часто многократный) переход по вертикали от «досланцевых» фоновых (нормально-бассейновых) сообществ к «сланцевым» микробным, нередко подчеркнутый богатými и разнообразными пограничными захоронениями, в том числе прижизненными; присутствие тонких отпечатков-слепков, фиксированных блестящими пленками ОВ; резкий возврат от сланцевых сообществ к исходным, лишь несколько измененным;

– наличие обособленных выделений так называемых твердых битумов, порой достаточно крупные его скопления (широко распространенные, например, в кукерситах и других ордовикских сланцевых комплексах Прибалтики, в верхнекембрийских квасцовых сланцах Швеции и др.);

– обогащенность различными мезо- и микроэлементами (P, Ba, Mn, U, V, Mo, Re, Se, Ni, Cu, Zn, Pb, Au, Hg и др.) и аномально высокая, разнообразная и разномасштабная «металлоносность» – наиболее известные и практически значимые особенности черных сланцев;

– согласованность появления, а затем исчезновения всех специфических признаков;

– широкое региональное распространение при выдержанности границ и сравнительно ограниченной мощности пачек и горизонтов (единицы – десятки, реже – первые сотни метров);

– латеральная смена другими литологическими типами отложений (в том числе грубозернистым мелководным и прибрежными), также резко обогащенными углеродистым веществом;

– распространенность среди отложений с разнообразными (практически с любыми) фаціальными, климатическими и физико-химическими характеристиками.

И при этом – устойчивая встречаемость от глубокого докембрия до настоящего времени, с сохранением главных аномальных особенностей.

Интереснейший аспект эпох черносланцевой седиментации – связь с ними разномасштабных биосферных событий, в том числе биотических перестроек, кризисов, мутаций. Их отражением как раз и являются многие из биотических особенностей черных сланцев, благодаря чему сами сланцы признаются их важнейшими литологическими носителями и индикаторами такого рода событий¹.

Все эти и многие другие аномальные особенности черных сланцев делают их наиболее заметными и яркими страницами в летописи осадочных серий. Причем, с одной стороны, безусловно «черными» – кризисными, гибельными, а с другой – наоборот, «золотыми»: с разнообразнейшей и богатейшей минерально-сырьевой продуктивностью – и собственно золотой, и платиновой, и урановой, и «просто» железной, фосфатной и т.д., и, наконец, углеводородной – горючесланцевой и нефтегазовой.

Вопросы генезиса. Ключевым и наиболее спорным в проблеме происхождения черных сланцев является вопрос о причинах «внезапного» накопления аномально высоких концентраций ОВ. Сильно упрощая, можно выделить две основные версии. Представители одной, традиционной, объясняют их накопление повышенной «комфортностью» условий обитания: вспышками биологической продуктивности нормально-бассейновых биоценозов в итоге оптимального сочетания благоприятных для их развития глобальных и региональных факторов – эвстатических, гидрологических, климатических и др. С возникшим же в итоге «перепроизводством» ОВ связывают, в свою очередь, последующую эвтрофикацию – развитие в наддонном слое воды анаэробных восстановительных, часто бескислородных, эвксинских обстановок, способных обеспечить консервацию, захоронение и сохранение ОВ.

Представители другого – альтернативного – направления, обращая внимание на тесную взаимосвязь роста концентраций ОВ с широким комплексом сопряженных аномалий, предполагают в качестве их общей причины стрессовые воздействия интенсивных разгрузок восходящих флюидов и, как итог, условия резко «дискомфортные», неблагоприятные и даже гибельные для нормально-бассейновых сообществ, но одновременно чрезвычайно «комфортные» для микробных цианобактериальных биоценозов, способствовавшие их бурному развитию. В отношении природы таких разгрузок и их состава мнения несколько расходятся. Наиболее известна гидротермальная «урановая» модель С.Г. Неручева², согласно которой оживление процессов рифтогенеза и вулканизма ведет к поступлению в биосферу избытка урана и других металлов, вызывая цветение цианобактерий и формирование осадков, обогащенных ОВ и ураном.

Иную модель образования черносланцевых формаций в связи с реакциями диспропорционирования с участием углерода предложил А.А. Маракушев³. Углеродную специфику флюидные потоки, идущие из земного ядра приобретают за счет углерода мантии, который в высокотемпературных условиях существует в виде СО и СН₄.

¹ Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. 2-е изд. СПб.: ВНИГРИ, 2007. 328 с.; Циклическая и событийная седиментация / Пер. с англ. под ред. Г. Эйзеле, А. Зейлахера. М.: Мир, 1985. 504 с.; Катастрофы в истории Земли. Новый униформизм / Пер. с англ. под ред. У. Берггрена и Дж. Кауверинга. М.: Мир, 1986. 471 с.; Корень Т.Н., Бутрова Э.Н., Гаврилова В.А. и др. Использование событийно-стратиграфических уровней для межрегиональной корреляции фанерозоя России. Метод. пособие. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 166 с.

² Неручев С.Г. Указ. соч.

³ Маракушев А.А. Природа самородного минералообразования // Докл. РАН, 1995. Т. 341. № 6. С. 807–812.

Рис. 1. Черные и горючие сланцы и характерные организмы-продуценты ОВ (монтаж из: Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий...), а-г, ж - фото автора: а, б - среднеордовикский горючий сланец-кукерсит, залегающий на светлом известняке с богатой бентосной фауной; многочисленные минерализованные ходы червей (а - поперечные сечения, б - продольные); Алексеевский карьер (Ленинградская обл.); в - колониальные цианобактерии *Gloeocapsomorpha prisca* Zal., широко распространенные в массе горючего сланца-кукерсита (типичные участники углеводородоокисляющих циано-бактериальных симбиозов); диаметр колоний ~50-60 мкм; петрографический шлиф, проходящий свет; г - прослой нижнеордовикского черного диктионемового сланца, залегающего на оболовых песчаниках и перекрываемого глауконитовыми; длина масштабной линейки 10 см; обнажение на р. Саблинка (Ленинградская область); д, е - граптолиты - морские колониальные организмы, типичные представители фауны ордовикских и силурийских черных сланцев (д - *Dictyonema*, силур, е - *Tetraraptus*, ордовик); ж - конкреция антраконита (Са-Mg-Fe-карбоната с примесью битуминозного вещества) из диктионемового сланца; диаметр 6 см; пришлифовка; обнажение на р. Поповка (Ленинградская обл.).

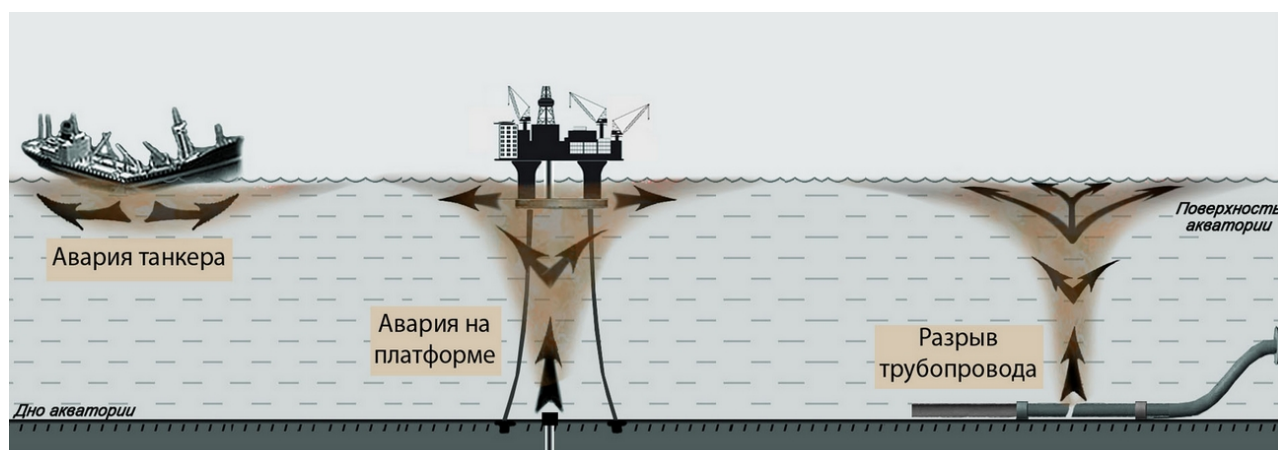
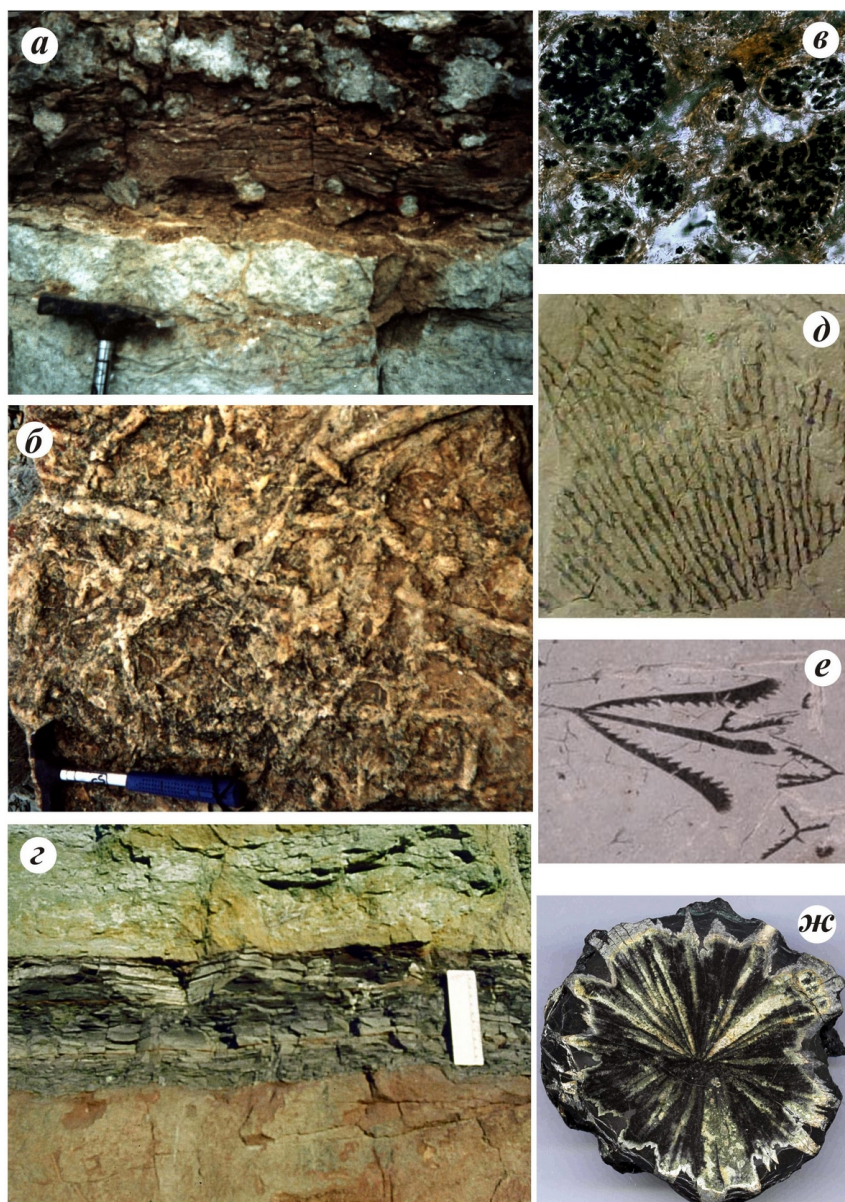


Рис. 2. Основные типы залповых аварийных нефтяных разливов. Стрелки - основные направления перемещения нефти.

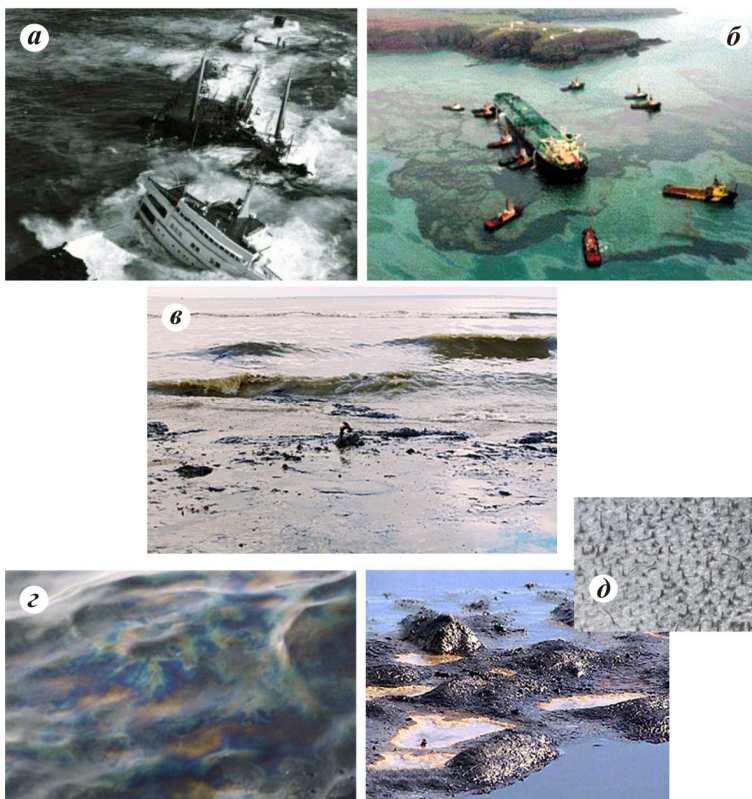


Рис. 3. Катастрофы нефтяных супер-танкеров Torrey Canyon (а) и Sea Empress (б); аварийные разливы нефти с образованием нефтяных пленок (б, в); нефтяные слики (г); нефтяные эмульсии (д) (монтаж фото из: Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий...).

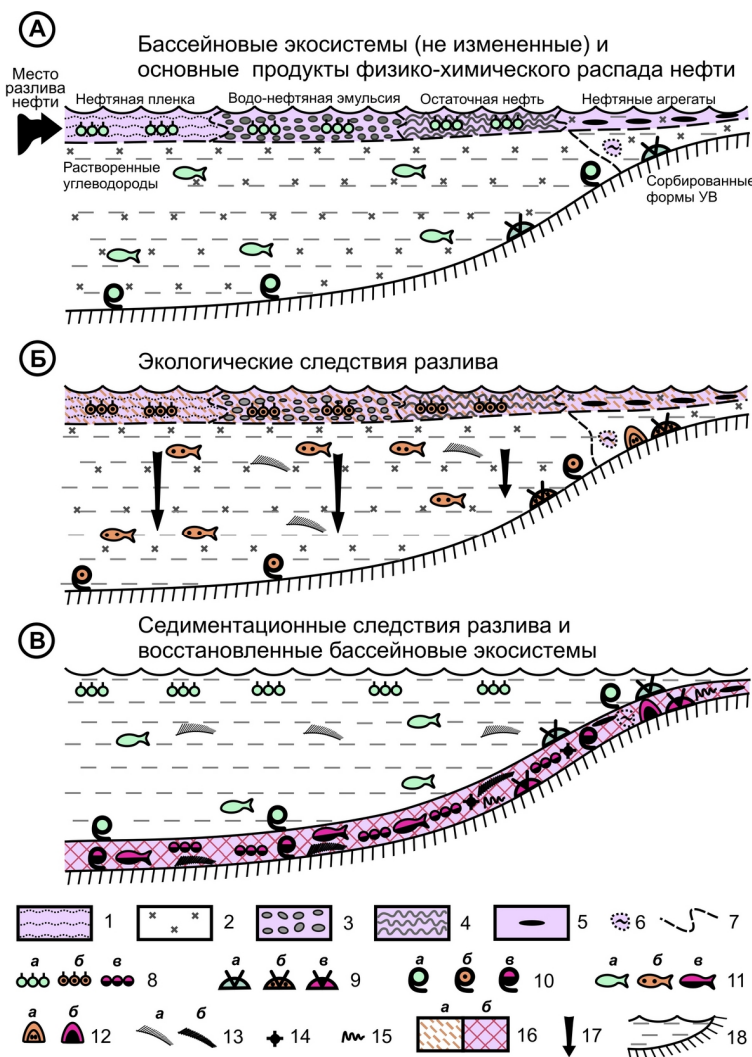


Рис. 4. Распространение продуктов физико-химического распада нефти при аварийных нефтяных разливах (А), экологические (Б) и седиментационные (В) следствия. Сост. Г.А. Беленицкая.

1 - 6 - основные продукты физико-химического распада нефти и ореолы их распространения: 1 - нефтяная пленка, 2 - растворенные УВ, 3 - водо-нефтяная эмульсия, 4 - остаточная нефть, 5 - нефтяные «агрегаты», 6 - сорбированные формы УВ; 7 - ориентировочные границы между разными типами ореолов; 8 - 11 - основные группы бассейновых «нафтофобных» биоценозов (а - до нефтяного воздействия, б - после воздействия, в пределах нефтяных ореолов, в - в осадке): 8 - планктонные, 9 - бентосные фитоценозы, 10 - бентосные зооценозы, 11 - нектонные; 12, 13 - «спутниковые» биоценозы (а - в пределах нефтяных ореолов, б - в осадке): 12 - фитобентосные, 13 - зоопланктонные и зоонектонные; 14 - продукты жизнедеятельности (преимущественно копролиты); 15 - следы жизнедеятельности; 16 - микробные УВ-окисляющие биоценозы и продукты их жизнедеятельности (а - в пределах нефтяных ореолов, б - в осадке); 17 - осаднение продуктов деградации нефти и жертв нефтяного воздействия; 18 - водоем.

При выходе на дно акваторий и резком охлаждении реакции смещаются вправо с образованием самородного углерода. Одновременно за счет аналогичных реакций диспропорционирования из комплексных соединений высвобождаются самородные металлы, которые вместе с углеродом и определяют геохимическую специфику формации.

Аналогичный, но, вероятно, более интенсивный процесс осаждение сажи и самородных металлов происходит при продувке восстановленными газами ледниковых покровов, например в Гренландии¹.

Другая, менее известная модель этой же группы – «нафтогенная» – определяющую роль отводит присутствию в составе восходящих флюидных разгрузок (также инициированных ростом эндогенной активности) углеводородов – нефтей, газов, нефтяных вод, часто металлоносных. Участие в накоплении черных сланцев природных нефтей, выплеснутых из недр в водоемы, предполагал, как следует из эпиграфа, еще Д.И. Менделеев. На основании геохимических сопоставлений сходная мысль о таком участии была высказана Е.М. Поплавко с соавт.² Однако, эта мысль, не получив достаточного обоснования, либо не была услышана, либо просто, без каких-либо комментариев, названа «совершенно фантастической точкой зрения»³ или «столь же красивой, сколь и фантастической»⁴. Возможность участия УВ в процессах накопления высокоуглеродистых отложений допускал А. Леворсен. Он писал: «Осадки смешивались с нефтью, асфальтом или битумом в процессе осадконакопления. После этого они были погребены под более молодыми отложениями... Такие скопления нафтидов могут рассматриваться как первичные»⁵. Автор в разные годы посвятил разработке этой модели и ее обоснованию с разных точек зрения целый ряд исследований, в том числе выполненных при поддержке РФФИ⁶. Близкие взгляды развиваются ныне Б.М. Валяевым⁷, Р.М. Готтих и Б.И. Писоцким⁸.

В некоторых работах привлекается еще одна модель – «пепловая». В качестве одной из важных причин возникновения черных сланцев и их высокой металлоносности она предполагает поступления пеплового материала. Участие такого материала в эпохи сланценакопления, характеризовавшиеся повышенной эндогенной активностью, весьма вероятно, однако для оценки его значимости в рассматриваемых процессах необходимо серьезное обоснование самого факта «обычного» присутствия в черных сланцах пеплового материала, а также изучение его возможного геохимического вклада.

В связи с развитием нафтогенной модели нами был проведен целенаправленный эколого-седиментологический анализ техногенных разливов нефти и их следствий как возможных аналогов современных и бывших естественно-природных событий, ведущих к накоплению осадков с повышенной углеродистостью. Рассмотрим начальные звенья намеченной нафтогенной системы: нефтяные разливы и их физико-химические следствия → нафтогенные экосистемы (биотопы и биоценозы).

Судьба разлитой нефти: нефтяные «очаги разгрузки» и «ореолы влияния»

Введем аварийные разливы и выбросы нефти, т.е. ее техногенные потоки, в систему факторов седиментогенеза – в качестве источника вещества для субаквального осадконакопления. Наиболее значительные разливы возникают при авариях на нефтяных супертанкерах, буровых платформах, фонтанирующих скважинах, трубопроводах, а также при сбросах нефтяных вод (балластных, очистных и др.) (рис. 2, 3 а, б).

В настоящее время из таких источников в акватории ежегодно выбрасывается от 1,5–2 до 10 млн. т нефти. (табл. 1). Часто ее сопровождает эквивалентное количество нефтяных газов и вод. Важно, что все эти выбросы УВ образуют залповые поступления – «ударные» для окружающей среды.

Сопоставим некоторые цифры. При крупной аварии выброс нефти соизмерим с запасами небольшой залежи УВ, т.е. эквивалентен «мгновенному» разрушению такой залежи и локализованной разгрузке УВ в акваторию. Частота аварий, сопровождаемых разномасштабными разливами нефти, для крупных акваторий может быть оценена величиной 1–10 в год. А это – цифры одного порядка с частотой проявления некоторых природных высокочастотных факторов, ответственных за возникновение в осадках микрослойчатости, например, сезонных, сейсмических и др.

Качественные характеристики УВ в аварийных разливах – их химический, элементный, групповой, изотопный состав, содержание микроэлементов – отражают, прежде всего, природные особенности УВ в регионах нефтедобычи. По макро- и микрогеохимическим показателям наиболее интересны техногенные «нефтяные воды», которые (как и их природные аналоги), как правило, в большей мере, чем нефти, насыщены целым рядом макро- и микрокомпонентов.

¹ Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и геоэкологические проблемы приграничных территорий России. [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 3. Вып. 1: Специальный выпуск «Пространство и время границ». Режим доступа: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%203%20Vip%201/rubr6-estestvennyye-granicy-st3-syvorotkin-2013.pdf>.

² Поплавко Е.М., Иванов В.В., Орехов В.С., Тархов Ю.А. Особенности металлоносности горючих сланцев и некоторые предположения об их генезисе. Геохимия. 1978. № 9. С. 1411–1417.

³ Неручев С.Г. Указ. соч.

⁴ Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. С. 175.

⁵ Леворсен А. Указ. соч. С. 36.

⁶ Беленицкая Г.А. Геолого-динамическая модель формирования высокоуглеродистых образований; Она же. О роли глубинных флюидов в черносланцевой седиментации...; Она же. Углеводородные флюиды в системе восходящих разгрузок в область седиментогенеза...; Она же. Аварийные разливы нефти как модель...; Она же. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз...; Она же. Высокоуглеродистые комплексы как производные нафтидных палеоразгрузок...

⁷ Валяев Б.М. Нетрадиционные ресурсы и скопления углеводородов: особенности распространения и процессов нефтегазонакопления // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. М.: ГЕОС. 2011. С. 390–404.

⁸ Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. К вопросу о формировании нефтематеринских толщ // Георесурсы. 2006. № 4. С. 6–10; Гусев М.В., Минеев Л.А. Микробиология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 384 с.

Таблица 1

Крупнейшие (свыше 100 тыс. т) техногенные разливы нефти
(обобщение по опубликованным работам и материалам Интернета)

Авария	Год	Место	Вытекло, тыс. т
АКВАТОРИИ			
Аварии скважин на нефтяных платформах			
Месторождение Экофиск, 1 скв. (8 суток)	1977	Северное море, Норвежский сектор	120
Месторождение Иксток-1, оценоч. скв. (10 мес.)	1979	Мексиканский зал., ЮЗ (Кампече), шельф	400–460
Платформа Рон Таппмейер	1980	Красное море	150
Скв. Deerwater Horizon	2010	Мексиканский зал., СВ, шт. Луизиана, континент. склон	600–780
Платформа в Атлантическом океане	2001	Атлантическом океан, у берегов Бразилии	125
Аварии танкеров			
Sea Star	1972	Оманский залив	115
Torrey Canyon	1967	О-ва Сцилли, Англия	119
Urquiola	1976	Ла Коруна, Испания	100
Amoco Cadiz	1978	Вблизи Бретани, Франция	223
Atlantic Empress и Aegean Captain (столкновение)	1979	Карибском море	290
Irenes Serenade	1980	Залив Неварино, Греция	100
Castillo de Bellver	1983	Индийский океан, 100 км от Кейптауна	252
Odyssey	1988	700 миль от Нова Скотия, Канада	132
ABT Summer	1991	700 миль от Анголы	260
Haven	1991	Генуя, Италия	144
СУША			
Аварии скважин (фонтаны, пожары)			
Скв Сан-Диего-39 (Дос-Бокас)	1908	Галф-Кост, Мексика, провинция Фаха-де-Оро, прибрежная суша	~1500
Скв Потреро-дель-Льяно-4	1909	Там же	~14000
Скв Касиано-7	1910	Там же	~2600
Lakeview Gusher	1910–1911	Калифорния, США	~1300?
Месторождение Тенгиз, скв. 37, гл. 4209 м	1985–1986	Прикаспийская впадина, побережье и шельф Каспийского моря	~3500–000
Месторождение Минбулак, скв.	1992	Ферганская долина	~300
Аварии на трубопроводах			
Нефтепровод Харьяга-Уса	1994	Усинский р-н, Тимано-Печорская провинция, респ. Коми	100?
АКВАТОРИИ И СУША			
Война, открыты задвижки нефтяных терминалов	1990	Персидский залив, Кувейт	1500

С момента поступления нефти в водную среду начинаются интенсивные процессы ее физико-химических превращений, образующих широкий спектр компонентов¹. Главные среди таких компонентов: летучие и водорастворимые, нефтяные пленки и слики, водо-нефтяные и нефте-водяные смеси-эмульсии, нефтяные (смоляные) «агрегаты», обволакивания или налипания на компонентах взвеси и осадка, сорбированные на взвешенных частицах и аккумулированные водными организмами, и, наконец, тяжелый погружающийся остаток. Ареалы распространения каждого из компонентов, разрастаясь и мигрируя, создают обширнейшие подвижные нефтяные ореолы – аналоги «ореолов влияния» очагов природной флюидной разгрузки. При крупных авариях они достигают гигантских размеров – десятков тысяч кв. км и более. По преобладанию тех или иных продуктов физико-химических превращений нефти различаются соответствующие типы нефтяных ореолов (рис. 4 а, 3 б–д).

Наиболее распространены и масштабны ореолы, образованные нефтяными пленками, агрегатными и сорбированными формами. В пленках и сликах, мощностью менее 0,1 мм (до 10⁻²–10⁻³ мм) (рис. 2 б, в, г) сосредоточены значительные массы УВ – десятки тысяч тонн. Содержания нефтяных агрегатов также весьма внушительны (часто – десятки мкг/кв. м), а их суммарный вес² на всей акватории океана составляет не менее 0,5 млн. т. Наибольшей сорбционной способностью обладают пелитовые частицы³ – органические и неорганические, количество сорбированных ими нефтепродуктов может превышать 40 л/куб. м⁴. Осаждаясь, они существенно повышают общее содержание УВ в осадке.

¹ Нельсон-Смит. Указ. соч.; Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.; Немировская И.А. Указ. соч.

² Немировская И.А. Указ. соч.

³ Частицы размером менее 0,01 мм (так называемая пелитовая фракция) – независимо от вещественного (химического, минерального) состава и генезиса. (Прим. ред.).

⁴ Гольдберг В.М., Зверев В.П., Арбузов А.И. и др. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М.: Наука. 2001. 125 с.

Приведем еще некоторые простые количественные сопоставления. Одна тонна нефти может образовать нефтяную пленку на поверхности в сотни тысяч кв. м (до 1 кв. км и даже более, в зависимости от степени истончения пленки). Т.е. при авариях крупных танкеров нефтяные пленки способны загрязнить поверхность акваторий, площадь в сотни тысяч и даже миллионы кв. км. А при фонтанировании высокодебитных аварийных скважин нефть может покрыть поверхность в десятки и сотни тысяч кв. км. Эти площади сравнимы в первом случае с крупнейшими черносланцевыми формациями мира (например, баженовской в Западной Сибири), а во втором – с менее грандиозными по площади, но часто еще более значительными по концентрациям ОВ, горючесланцевыми формациями (например, с верхнедевонской Припятского бассейна, верхнеордовикской Прибалтийского бассейна, докембрийской шунгитовой Прионежского бассейна, и др.). Иначе говоря, аварийный излив в море или озеро, проецируясь на дно, может влиять на возникновение (как мы покажем ниже) по крайней мере одного регионально распространенного высокоуглеродистого микро-(или нано-) слоя, подобного тем, какие слагают черносланцевые комплексы.

Несомненно, залповые аварийные разливы нефти являются фактором разнообразного и масштабного воздействия на бассейновую среду. Особое значение имеют такие их показатели, как объемы разовых выбросов, дискретность (залповость, ударность), очаговый характер первоначальной локализации, разнообразие качественных макро- и микроособенностей нефти, геологически высокая частота и др. Важны пространственные характеристики ореолов нефтяного влияния: их «всюдность» (вплоть до «захвата» целиком любых акваторий, в пределе – глобальность), полифациальность (при максимальной локализации в пределах шельфов и побережий), разноглубинность, поликлиматичность (при наличии зависимости количественных и качественных показателей от конкретных типов обстановок). Уже из приведенных выше типоморфных характеристик ЧС видно, что масштабы и особенности пространственно-временного распространения физико-химических производных техногенных разливов весьма близки типичным для черносланцевых комплексов.

Экологические следствия нефтяных разливов

Экологические следствия и биоценотические эффекты аварийных нефтяных разливов масштабны, многообразны и при этом разнонаправлены – одновременно и губельны, и созидательны (рис. 4 Б, 5 А).

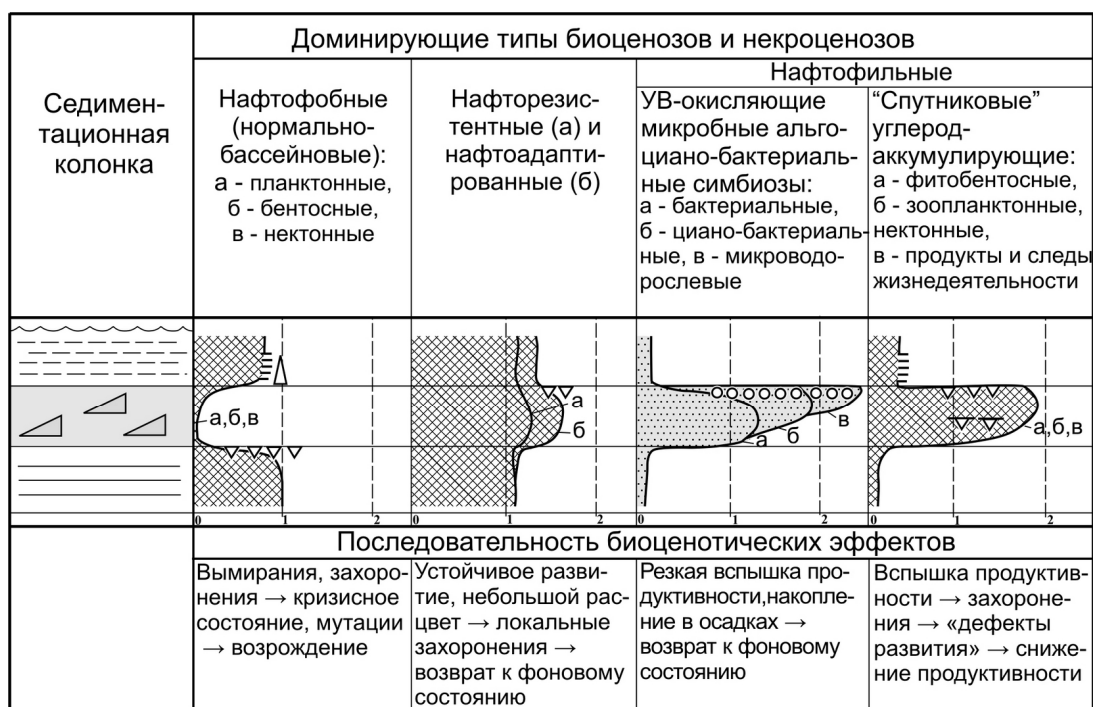


Рис. 5. Сопоставление биоценологических и тафоценологических эффектов, вызываемых нефтяными разливами (А), и восстановленных на уровнях развития черных сланцев (Б). Сост. Г.А. Беленицкая.

А – событие «нефтяной разлив», современная формирующаяся седиментационная колонка, Б – событие «черносланцевое», литологическая колонка.

1–5 – биоценологические эффекты (а – вызываемые современными нефтяными стрессовыми воздействиями, б – восстанавливаемые на уровнях развития черных сланцев): 1, 2 – изменение интенсивности развития биоценозов (1 – микробных, 2 – преимущественно мезо-, макро- и смешанных), 3, 4 – уровни массовых захоронений (3 – микробных, 4 – мезо-, макро- и смешанных), 5 – уровни радиации (диверсификации); 6 – интервалы проявления «дефектов развития», смены доминирующих форм; 7 – условная шкала интенсивности развития биоценозов (продуктивности и разнообразия); 8 – слоев осадочного нафтогенного ОВ; 9 – подстилающие осадки; 10 – бассейновые воды; 11 – горизонт черных сланцев; 12 – отложения, подстилающие и перекрывающие черные сланцы; 13 – индексы (цифры в кружках) доминирующих типов биоценозов, по-разному реагирующих на нефтяное воздействие.

Разрушая и уничтожая существующие бассейновые сообщества, не любящие и «боящиеся» нефти – нафтофобные, они в то же время формируют свои новые, «нефтелюбивые» – нафтофильные; небольшая же часть биоценозов обнаруживает относительную нейтральность – устойчивость (нафторезистентность) или приспособляемость (нафтоадаптированность). Если негативные, пагубные следствия наглядны и о них много сказано, то созидательные, по сути, не менее масштабные, но типичные, главным образом, для мира микроорганизмов, менее очевидны и в таком аспекте обсуждаются реже. Рассмотрим кратко каждый тип.

Кризис и мор нафтофобных биоценозов. Загубленные природные ландшафты, черные приливы и зоны смерти, липкие «нефтяные объятия», катастрофические заморы моллюсков, рыб, птиц, млекопитающих, вязкая смесь с нефтью планктона, прибрежных водорослей и т.д. – все эти плачевные следствия аварийных разливов стали практически их атрибутами. Гибель миллионов мидий, многих десятков тысяч птиц – вот трагический «актив» всего одной аварии супертанкера. Лишь одна тонна нефти вызывает массовые заморы на площади до 10 кв. км. Максимально «эффективны» воздействия на экосистемы в наиболее продуктивных зонах акваторий, особенно в природных «сгущениях жизни» (по В.И. Вернадскому) – планктонных, бентосных, прибрежных.

Чрезвычайно агрессивны нефтяные пленки. Тончайшая пленка нефти, покрывая все живое, ведет к мгновенной гибели и погребению беспозвоночных, млекопитающих, птиц, рыб (рис. 4 Б, 6, 7). Стрессовые воздействия разных компонентов распада нефти так или иначе затрагивают всю паутину трофических и энергетических связей, нарушая их структуру и экологический баланс в целом¹. Наряду с летальным исходом, у молодежи различных организмов отмечаются дефекты развития, аномалии внутренних органов, отклонения в поведении, слабость и т.д. Очевидно, что для основной массы аборигенных обитателей, прежде всего, их макро- и мезоформ, нефтяной разлив – это кризис, своеобразный «нефтяной биоцид», отражающийся во множестве захоронений – тафоценозов.

Еще одна особенность захоронений весьма важна для седиментологических и палеоэкологических реконструкций. Мгновенная гибель животных и растений под нефтяными гидрофобными пленками-убийцами может обеспечить (и обеспечивает!) фиксацию на них точнейших слепков-оттисков поверхностей живых тканей. Эти отпечатки насильственно прерванных жизней (своеобразные «Нефтяные Помпеи» – сообщества смерти и ее свидетельства) по способу образования напоминают слепки-«реплики», искусственно получаемые на коллоидных или целлюлозно-ацетатных пленках. По сути, они представляют собой модели возникновения ископаемых отпечатков исключительно хорошей сохранности (рис. 6, 7), весьма частых на поверхностных наложениях черных сланцев. Впечатляющими примерами неоднократного появления таких природных отпечатков, в том числе и в наши дни, являются знаменитые «смоляные ямы» Ла-Брея в Южной Калифорнии, где в углеводородах замурованы остатки и отпечатки множества разнообразных организмов великолепной сохранности (моллюсков, многоножек, черепах и др.)². Эти «смоляные ямы», представляющие собой группы заполненных битумом озер, образованы жидкими углеводородами, высачивающимися из неглубоко залегающих высокопродуктивных нефтеносных пластов.

Теперь обсудим обратные – *созидательные* – биоценологические эффекты.

Расцвет нафтофильных биоценозов: УВ-окисляющие микробные сообщества. Казалось бы: что живое может противостоять нефти? На самом же деле сообщества УВ-окисляющих микроорганизмов жадно ее утилизируют, одновременно подкармливая другие сообщества и накапливая новое «микробное» ОВ. Уникальная способность микроорганизмов разлагать и утилизировать нефть, как и многие другие «великие дела маленьких существ» (по В.О. Таусону), хорошо известна микробиологам. Этим малюткам вполне «впрок» именно то, что другим – и, прежде всего, «гигантам» – гибель. На этой стороне деятельности микроорганизмов, для обсуждаемой проблемы чрезвычайно важной, остановимся чуть подробнее.

Процессы бактериального окисления нефтяных УВ стали активно изучаться, начиная с 1930–1940-х гг. нефтяными микробиологами в лабораторных экспериментах и природных условиях (Т.Л. Гинзбург-Карагичева, E. Bastin, С.Е. ZoBell, В.О. Таусон, Л.Д. Штурм, Г.А. Могилевский и др.³). Особенно эффективными были опыты, в которых слои нефти, разлитой на питательной среде, в течение короткого времени оказались полностью «биодegradированными», превратившись в хлопьевидный органический осадок, состоящий из массы бактериальных тел. Дополнительным импульсом развитию исследований послужила острая необходимость решения двух казалось бы совершенно разных биотехнологических проблем глобального значения: «очистить» мир и «накормить» его. Первая призвана решать эколого-санитарные задачи ликвидации нефтяных

¹ Цыбань А.В., Симонов А.И. Процессы микробного окисления нефти в море // Человек и биосфера. Вып. 3 / Под ред. В.Д. Федорова. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1979. С. 143–159.

² Куллини Дж. Леса моря. Жизнь и смерть на континентальном шельфе / Пер. с англ. под ред. А.А. Добровольского. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 280 с.; и др.

³ См., в частности: Гинзбург-Карагичева Т.Л. Очерки микробиологии нефти / Под ред. проф. В.С. Буткевича. М. – Л.: ОНТИ, Глав. ред. горно-топливной литературы, 1936; Bastin E.S., Greer F.E. "Additional Data on Sulphate-Reducing Bacteria in Soils and Waters of Illinois Oil Fields." *AAPG Bulletin* 14.2 (1930): 153–159; Bastin E.S., Greer F.E., Merritt C.A., Moulton G. "The Presence of Sulphate Reducing Bacteria in Oil Field Waters." *Science* 63.1618 (1926): 21–24; ZoBell C.E. "Bacterial Release of Oil from Oil-Bearing Materials.[Gradual Release of Oil from Tar Sands]." *World Oil* 126 (1947): 36–47; Idem. "Bacterial Release of Oil from Sedimentary Materials." *Oil and Gas Journal* 46.13 (1947): 62–65; Idem. "The Occurrence, Effects and Fate of Oil Polluting the Sea." *Advances in Water Pollution Research*. Ed., E.A. Pearson. Oxford, London, New York, Paris: Pergamon Press, 1964, vol. 3, pp. 85–109; Таусон В.О. Бактериальное окисление сырых нефтей // Нефтяное хозяйство. 1928. Т. 14. № 2. С. 220–230; Таусон В.О., Шапиро С.Л. Общее направление окисления нефти бактериями // Микробиология. 1934. Т. 3. Вып. 1. С. 79–87; Штурм Л.Д. Исследование по ассимиляции углеводородов микроорганизмами. // Микробиология. 1958. Т. 27. № 6. С. 740–752; Могилевский Г.А., Оборин А.А., Королев В.К., Ившина И.В., Бердичевская М.В. Микробиологическое воздействие на нефтяной пласт. И.: ВНИИОЭНГ, 1979.



а



б



в

Рис. 7. Рыбы – жертвы современных нефтяных техногенных и древних природных катастроф (монтаж фото из: Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель чернослапцевых событий...); а, б – массовая гибель рыб в аварийных нефтяных разливах (проборазы «рыбных слоев»); в – отпечаток древней рыбы.



а



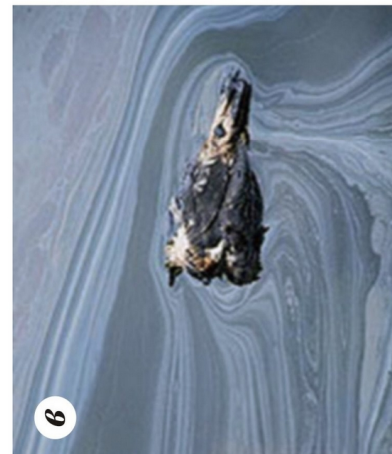
б



а



б



в

Рис. 6. Птицы – жертвы современных нефтяных техногенных (а-г) и древних природных (д) катастроф (монтаж фото из: Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель чернослапцевых событий...).

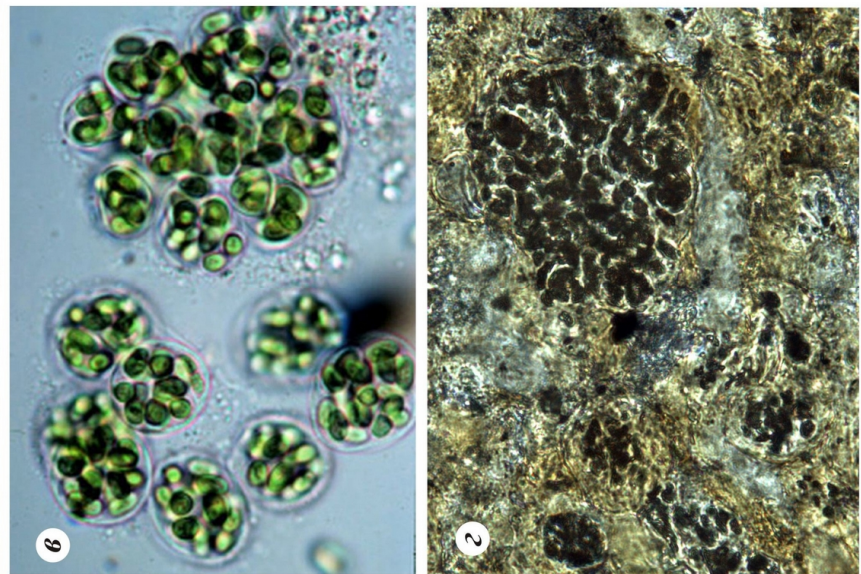


Рис. 8. Бактерии и цианобактерии - представители УФ-окисляющего микробного симбиоза: а, б - УФ-окисляющие палочковидные бактерии рода *Psudomonas*; диаметр палочек ~1,5–2,0 мкм; электрон-микроскоп; (монтаж фото из: Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий...); в, г - колонииальные цианобактерии, класс *Cyano-sossaseae*, род *Gloeo-sarcomorpha* - типичные участники УФ-окисляющих циано-бактериальных симбиозов: в - современные; диаметр колоний ~30 мкм; г - ископаемые (*Gloeo-sarcomorpha ritca Zal.*) из среднеродовских горючих сланцев-кукерситов (Ленинградская область); петрографический шлиф, проходящий свет; диаметр колоний ~50-60 мкм; фото автора.

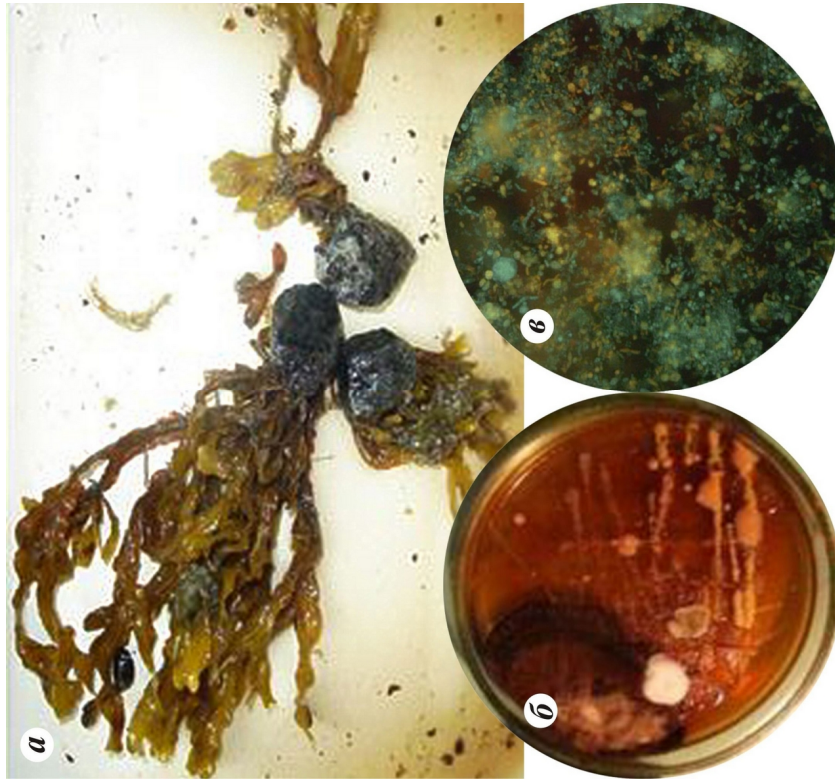


Рис. 9. Развитие УФ-окисляющих бактерий под пленкой нефти на «спутниковых» бурых водорослях (по: Степаньян О.В., Воскобойников Г.М. Влияние нефти и нефтепродуктов на морфофункциональные особенности морских макроводорослей // Биология моря. 2006. Т. 32. №4. С. 241-248): а - бурые водоросли в естественной среде на дне водоёма (ум. 2); б - обрастание таллома бурых водорослей колониями УФ-окисляющих бактерий под пленкой нефти; диаметр поля ~20 см; в - полная колонизация поверхности таллома бактериями; микрофотография отпечатка поверхности таллома, диаметр поля ~60 мкм.

загрязнений, а вторая – задачи биосинтеза – получения искусственной биогенной «нефтяной пищи». Иначе говоря, одна нацелена на уничтожение нефтепродуктов (деструкцию УВ), другая – на накопление их бактериальных производных. (Обратим внимание, что по сути это – как раз две составляющие рассматриваемой нами модели.) Именно микробы получили (и выполнили) оба «социальных заказа». Позже они способствовали решению и ряда других важных прикладных задач, в том числе по повышению эффективности методов поисков, разведки и эксплуатации месторождений УВ. В ходе всех этих исследований была накоплена обширная и разносторонняя информация о сообществах микроорганизмов, которые формируются на нефтяных субстратах, осуществляя деструкцию нефтяных УВ, о специфике функционирования этих сообществ, о продуктах их жизнедеятельности, условиях возникновения и т.д.¹ Приведем некоторые наиболее важные данные, которые непосредственно характеризуют обсуждаемые нафтогенные процессы.

Способность окислять УВ присуща многим группам микроорганизмов, главным образом, бактериям, актиномицетам и грибам. Описано около 70 родов, свыше сотни видов, до тысячи штаммов микроорганизмов, перерабатывающих нефть. Основное значение имеют представители родов *Pseudomonas* (рис. 8 а, б), *Mycobacterium*, *Micrococcus* и др. Общую схему процессов окисления нефти (ее биотрансформации) в аэробных условиях можно записать последовательностью: УВ + H₂O + УВ-окисляющие микроорганизмы → промежуточные продукты, метаболиты + микробная биомасса → CO₂, H₂O + *остаточные нефтепродукты* + *микробная биомасса*.

УВ нефтей и нефтяных газов, будучи предельно восстановленными соединениями, представляют собой один из наиболее концентрированных энергетических источников – доноров электронов. Для самих микроорганизмов, для их роста и размножения, УВ являются источником как энергии, так и вещества (углерода – строительного материала новых клеток, особей, колоний). К микробному окислению чувствительны все виды природных нефтей и практически все входящие в их состав компоненты, хотя устойчивость разных компонентов различна.

В природных водных средах «переработку» нефти обычно осуществляют целые микробные сообщества (микробоценозы), которые используют в своем жизненном цикле углерод нефтяных УВ и их последовательных производных². Бактерии-нафтотрофы (питающиеся нефтью) в пищевых системах выступают в качестве начальных звеньев, переводя углерод нефтей (для других организмов «малосъедобный») в формы, доступные как для построения собственного клеточного вещества, так и для жизнедеятельности представителей более высоких уровней, в том числе разных видов фотосинтезирующих цианобактерий (рис. 8в) и микроводорослей, бактериальных гетеротрофов-деструкторов и др. Именно их ассоциации формируют высоко эффективные альго-циано-бактериальные симбиозы, утилизирующие нефтепродукты, производные их биохимического распада и вторичного биогенного метаболизма, а частично и сами образуют первично-бактериальные биомассы. Для всех этих сообществ – и для бактерий-нафтотрофов и для сложных нафтогенных симбиозов в целом – окисляемые УВ служат необходимым энергетическим и пищевым (ростовым, строительным) субстратом.

Микроорганизмы, способные окислять УВ, в природных водных средах присутствуют повсеместно, являясь по сути «всюдными», хотя и рассеянными членами бассейновых экосистем. Правда, «до поры» это лишь слабо активные аборигены, практически незаметные среди господствующих крупных особей, тихо «дремлющие» в ожидании своего часа. При внезапном поступлении УВ – обильного источника энергии и пищи – они резко активизируются и уже через несколько суток счет их клеток идет на миллиарды (в 1 мл)³. В итоге – стремительный рост скорости и эффективности утилизации нефти и производства микробной биомассы. Растущие скопления микробов, локализуясь в пределах нефтяных пленок и других нафтогенных ореолов-биотопов, превращают их в микроинкубаторы – питомники нафтогенных биоценозов. Эти новые сгущения жизни, с доминантой микробных нафтотрофов, замещают бывшие нормально-бассейновые сгущения. Деятельность микробных сообществ продолжается и в выпавшем на дно осадке, хотя здесь их активность обычно снижается, но зато активизируются другие виды бактериальных сообществ.

Скорость процессов биодеградации, их длительность и завершенность контролируются наличием и количеством ряда компонентов: УВ, кислорода (в аэробных условиях), сульфатов, нитратов (в анаэробных) и элементов-биогенов – азота, фосфора и некоторых микроэлементов. Соотношения этих компонентов могут широко варьировать, определяясь скоростями их пополнения и расходования. Но при любых соотношениях чрезмерное воспроизводство потребителей делает неминуемым исчерпание резерва хотя бы одного из этих компонентов и, как итог, – кризис теперь уже нафтофильных биоценозов, их гибель и массовые захоронения с накоплением некромасс.

Подчеркнем еще раз определяющую роль в рассматриваемых взаимодействиях двух главных активных участников – разливающейся нефти и утилизирующих ее микробных сообществ. Именно их теснейше взаимосвязанные, по сути «общающиеся», судьбы: ликвидация одного – *нефтяных УВ* – и накопление другого – *микробных биомасс*, – отражают две стороны единого сложного процесса микробиологического окисления нефти, являясь ключевыми для обсуждаемой нами модели (так же как и для биотехнологических процессов элиминации нефти и

¹ Преобразование нефтей микроорганизмами // Тр. ВНИГРИ. 1970. Вып. 281. 219 с.; Розанова Е.П., Кузнецов С.И. Микрофлора нефтяных месторождений. М.: Наука, 1974. 197 с.; Гусев М.В., Минеев Л.А. Указ. соч.; Заварзин Г.А. Литотрофные микроорганизмы. М.: Наука, 1972. 324 с.; Цыбань А.В., Симонов А.И. Указ. соч.; Миронов О.Г. Взаимодействие микроорганизмов с нефтяными углеводородами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 128 с.; Исмаилов Н.М. Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязненных почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 42–57; Обороин А.А. Нефтегазопроисковая геомикробиология. Автореф. дисс. ... д. геол.-мин. наук. М., 1991, 46 с.; Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л. и др. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: А.П.Н., 2006. 278 с.; Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.; Ильинский В.В. Гетеротрофный бактериопланктон: экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений. Автореф. дисс. ... д. биол. наук. М.: МГУ, 2000. 53 с.; Немировская И.А. Указ. соч.; и др.

² Исмаилов Н.М. Указ. соч.; Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.

³ Преобразование нефтей микроорганизмами...; Цыбань А.В., Симонов А.И. Указ. соч.

синтеза ОВ). При этом микроорганизмы, образующие своеобразные специализированные функциональные сообщества – микробиомы – выступают в роли биологического инструмента, обеспечивающего эффективную реализацию процессов изменения форм нахождения углерода (при сохранении его массы), с частичным переводом его минеральных неживых форм в биологические живые (в «полуфабрикат» будущего ОВ черных сланцев).

Спутники и попутчики нефтофилов. У нефтофильных УВ-окисляющих симбиозов, как правило, имеются «спутники» и из макромира. Возникает ряд ассоциирующихся с ними сообществ, биохимически также зависимых от нефтяного загрязнения, хотя и менее выражено. Некоторые из них и сами могут быть отнесены к нефтофилам. На фоне высокой продуктивности микробных биоценозов, насыщающих среду сравнительно легко усваиваемыми производными нефти и продуктами метаболизма, фиксируется активность ряда их «спутников», способных в разной мере (нередко – весьма интенсивно) использовать эти соединения, иногда накапливая их повышенные количества. Со своей стороны они нередко способствуют развитию микробных ценозов, например, в роли удобной подстилки (прикрепленной или подвижной), служащей субстратом для их локализации.

Намечается ряд спутниковых сообществ, активно развивающихся в обстановках нефтяного загрязнения. Среди зафиксированных сообществ мы условно выделили три разновидности:

1. Фитобентосные – преимущественно макрофиты, в том числе весьма частые и наиболее изученные бурые водоросли, образующие заросли на загрязненных нефтью участках и легко разводимые в лабораторных условиях¹ (рис. 9).

2. Зоопланктонные и зоонектонные (иногда прикрепленные, бентосные), например, скопления веслоногих рачков².

3. Популяции бентосных организмов, образующих в условиях нефтяных загрязнений значительные скопления разнообразных итогов своей жизнедеятельности: физиологических продуктов (копролиты и др.) и механических следов (ползания, зарывания, лежания и др.). Для тех и других характерны повышенные концентрации нефтяных УВ³. Важно, что все эти разновидности обнаруживают сходство с тафоценозами и следами жизнедеятельности, очень широко распространенными в черных сланцах (рис. 1 а, б, д, е, 5), где они довольно хорошо изучены палеонтологами.

Нафторезистентные и нефтоадаптированные сообщества. Среди бассейновой макро- и мезобиоты обнаруживаются не только гибнущие нефтофобные сообщества, но и отдельные относительно нейтральные и даже приспособленческие таксоны – нафторезистентные и нефтоадаптированные. Для них зараженность среды УВ не помеха, а порой и польза, особенно в малых концентрациях. (Вспомним, что и многие из нас испытали на себе благотворно-лечебное действие небольших доз некоторых природных нефтей, нефтяных вод, озокеритов, искусственно изготовляемых «скипидарных ванн» и т.д.)

Например, в Каспийском, Черном морях описываются резистентные, а возможно и адаптированные к нефтяному загрязнению формы фильтраторов, природных очистителей морской воды, добывающих таким образом себе пищу и кислород (некоторые виды моллюсков – мидии, хитоны, кардиумы и др.)⁴. В частности, указывается, что в присутствии мидий количество алифатических УВ в разлитой нефти за сутки резко уменьшается (до 46%). Рассматриваются даже перспективы их использования для переработки парафина.

* * *

Подытожим экологические следствия нефтяных разливов, наиболее значимые для осадконакопления.

Среди биоценозов (и их «кладбищ» – тафоценозов) по характеру реакций на нефтяное воздействие условно выделены три типа: нефтофобные (эффект воздействия сугубо отрицательный), нефтофильные (эффект положительный) и относительно нейтральные (эффект слабо выраженный, иногда скорее положительный). Второй и третий типы объединяют сообщества, живущие (процветают) или хотя бы выживающие) в условиях нефтяного загрязнения; так что их в целом можно обозначить как нефтобионтные.

Питающиеся нефтью бактерии образуют начальные звенья пищевых цепей, доминантой которых становятся микробные альго-циано-бактериальные симбиотические сообщества, потребляющие как продукты трансформации нефти, так и самих трансформаторов. Именно эти сообщества, утилизируя нефтепродукты, определяют взрывной рост биопродуктивности с накоплением в итоге микробных масс и продуктов неполной биотрансформации УВ. Крайне упрощая, можно сказать, что они переводят нефть (во всяком случае, значительную ее часть) в биомассу, а затем в некромассу – по нашему мнению, главный элемент ОВ будущих черных сланцев.

Сама же разлитая нефть выступает одновременно в совершенно разных ролях. С одной стороны – «летальной»: убийцы и виновника вымираний многих аборигенных нормально-бассейновых биоценозов (особенно их высокоразвитых форм), обитателей разных жизненных пленок – планктонных (в максимальной степени), бентосных, пелагических; в роли орудия их мгновенной гибели и прижизненных захоронений – малых «нефтяных Помпей». С другой, – в роли «витальной»: источника энергии и пищи нефтофильных сообществ, инициатора накопления микробных масс и некоторых их спутников. В итоге – сочетание массового «биоцида» (разрушения целых трофических сетей) с интенсивнейшим микробным биосинтезом.

Нафтогенные сообщества по отношению к биосферным экосистемам исполняют важнейшие функции ре-

¹ Степаньян О.В., Воскобойников Г.М. Указ. соч.

² Нельсон-Смит. Указ. соч.

³ Там же; Куллини Дж. Указ. соч.

⁴ Там же; и др.

⁵ Гольдберг В.М., Зверев В.П., Арбузов А.И. и др. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М.: Наука. 2001. 125 с.

зервных защитных микробных сил, стремительно блокирующих враждебные для них вторжения УВ: они атакуют их и «просто съедают». А затем – «уходят» – оседают на дно. Этот невидимый, но надежный страж, с помощью которого биосфера держит своеобразную глобальную микробную оборону, справедливо получил у микробиологов (Г.А. Могилевский, Г.А. Заварзин, А.А. Оборин и др.) образное наименование «бактериального фильтра».

Вызываемая нефтяными разливами общая системная перестройка трофических цепей с нарушением существовавшего экологического баланса и сменой нормально-бассейновых сообществ на экстремальные нефтегенные, позволяет говорить о кризисных нефтегенных сукцессиях¹ как о закономерных следствиях разливов.

Важен также последующий возврат системы к экологическому фону – ее самоочищение и самовосстановление (без вмешательства человека наступающие через несколько лет, а при более значительных повреждениях – через несколько десятков лет). Совмещение в нефтегенных событиях проявлений таксономических, трофических и энергетических эффектов дает основание квалифицировать их как «нефтяные биотические события» (или микрособытия) техногенной природы. Существенно, что эти «события» теснейшим образом сопряжены со взрывами биоаккумуляции и с ростом захороняемых нефтегенных биомасс – главных участников нефтегенного седиментогенеза. Рассмотрению этих процессов будет посвящена специальная статья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженова О.К., Баженова Т.К. Происхождение нефти – фундаментальная проблема геологии (современное состояние проблемы) // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 541–552.
2. Беленицкая Г.А. Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива) // Пространство и Время. 2012. № 3(9). С. 193–207.
3. Беленицкая Г.А. Аварийные разливы нефти как модель черносланцевых событий геологического прошлого // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 17–33.
4. Беленицкая Г.А. Высокоуглеродистые комплексы как производные нафтидных палеоразгрузок и некоторые проблемы сланцевых углеводородов // Всероссийская конференция с международным участием. «Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы разработки». М.: ГЕОС, 2013. С. 28–31.
5. Беленицкая Г.А. Геолого-динамическая модель формирования высокоуглеродистых образований // Всесоюзная конференция «Геохимия, минералогия и литология черных сланцев». Сыктывкар, 1987. С. 107–108.
6. Беленицкая Г.А. О роли глубинных флюидов в черносланцевой седиментации. Высокоуглеродистые образования в геолого-генетических моделях галогенеза // Международный симпозиум «Бассейны черносланцевой седиментации и связанные с ними полезные ископаемые». Новосибирск, 1991. Т. 1. С. 21–24.
7. Беленицкая, Г.А. Последствия нефтяных катастроф глазами седиментолога // Природа. 2010. № 2. С. 25–34.
8. Беленицкая Г.А. Углеводородные флюиды в системе восходящих разгрузок в область седиментогенеза. Черные и горячие сланцы в системе седиментационных производных восходящих разгрузок // Всероссийская конференция «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы». М.: ГЕОС, 2008. С. 62–68.
9. Валяев Б.М. Нетрадиционные ресурсы и скопления углеводородов: особенности распространения и процессов нефтегазоаккумуляции // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. М.: ГЕОС, 2011. С. 390–404.
10. Волкова И.Б. Органическая петрология. Л.: Недра. 1990. 299 с.
11. Гинзбург А.И. Органическое вещество петрографических типов горючих сланцев (на примере некоторых месторождений СССР) // Литология и полезные ископаемые. 1969. №4. С. 39–52.
12. Гинзбург-Карагичева Т.Л. Очерки микробиологии нефти / Под ред. проф. В.С. Буткевича. М. – Л.: ОНТИ, Глав. ред. горно-топливной литературы, 1936
13. Гольдберг В.М., Зверев В.П., Арбузов А.И., Казеннов С.М. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М.: Наука, 2001. 125 с.
14. Готтих Р.П., Писоцкий Б.И. К вопросу о формировании нефтематеринских толщ // Георесурсы. 2006. № 4. С. 6–10.
15. Гусев М.В., Минеев Л.А. Микробиология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 384 с.
16. Заварзин Г.А. Литотрофные микроорганизмы. М.: Наука, 1972. 324 с.
17. Ильинский В.В. Гетеротрофный бактериопланктон: экология и роль в процессах естественного очищения среды от нефтяных загрязнений. Автореф. дисс. ... д. биол. наук. М.: МГУ, 2000. 53 с.
18. Исмаилов Н.М. Микробиология и ферментативная активность нефтезагрязненных почв // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 42–57.
19. Катастрофы в истории Земли. Новый униформизм / Пер. с англ. под ред. У. Бергтрена и Дж. Кауверинга. М.: Мир, 1986. 471 с.
20. Корень Т.Н., Бугрова Э.Н., Гаврилова В.А. и др. использование событийно-стратиграфических уровней для межрегиональной корреляции фанерозоя России. Метод. пособие. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 166 с.
21. Куллини Дж. Леса моря. Жизнь и смерть на континентальном шельфе / Пер. с англ. под ред. А.А. Добровольского. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
22. Леворсен А. Геология нефти и газа. М., Мир. 1970. 640 с.
23. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Наука. 2009. 576 с.
24. Лукин А.Е. Литогеохимические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. Киев: Наукова думка, 1997. 224 с.
25. Маракушев А.А. Природа самородного минералообразования // Докл. РАН, 1995. Т. 341. № 6. С. 807–812.
26. Миронов О.Г. Взаимодействие микроорганизмов с нефтяными углеводородами. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 128 с.
27. Могилевский Г.А., Оборин А.А., Королев В.К., Ившина И.В., Бердичевская М.В. Микробиологическое воздействие на нефтяной пласт. И.: ВНИИОЭНГ, 1979.
28. Нельсон-Смит. Загрязнение нефтью / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 124 с.
29. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный Мир, 2013. 432 с.
30. Немировская И.А. Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). М.: Научный Мир, 2004. 328 с.
31. Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. 2-е изд. СПб.: ВНИГРИ, 2007. 328 с.

¹ Сукцессия (от лат. *successio* — преемственность, наследование) – последовательная смена одного биоценоза другим на определенном участке среды во времени в результате влияния природных факторов или воздействия человека.

32. Оборин А.А. Нефтегазопоисковая геомикробиология. Автореф. дисс. ... д. геол.-мин. наук. М., 1991, 46 с.
33. Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л., Пашковский И.С., Коннов Д.В. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: А.П.Н., 2006. 278 с.
34. Парпарова Г.М., Жукова А.В. Углепетрографические методы в изучении осадочных пород и полезных ископаемых. Л.: Недра, 1990. 308 с.
35. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
36. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
37. Поплавко Е.М., Иванов В.В., Орехов В.С., Тархов Ю.А. Особенности металлоносности горючих сланцев и некоторые предположения об их генезисе // Геохимия. 1978. № 9. С. 1411–1417.
38. Преобразование нефтей микроорганизмами // Тр. ВНИГРИ. 1970. Вып. 281. 219 с.
39. Розанова Е.П., Кузнецов С.И. Микрофлора нефтяных месторождений. М.: Наука, 1974. 197 с.
40. Словарь по геологии нефти и газа. Л.: Недра. 1988. 679 с.
41. Степаньян О.В., Воскобойников Г.М. Влияние нефти и нефтепродуктов на морфофункциональные особенности морских макроводорослей // Биология моря. 2006. Т. 32. № 4. С. 241–248.
42. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и геоэкологические проблемы приграничных территорий России. [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 3. Вып. 1: Специальный выпуск «Пространство и время границ». Режим доступа: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%203%20Vip%201/rubr6-estestvennye-granicy-st3-syvorotkin-2013.pdf>.
43. Таусон В.О. Бактериальное окисление сырых нефтей // Нефтяное хозяйство. 1928. Т. 14. № 2. С. 220–230.
44. Таусон В.О., Шапиро С.Л. Общее направление окисления нефти бактериями // Микробиология. 1934. Т. 3. Вып. 1. С. 79–87.
45. Циклическая и событийная седиментация / Пер. с англ. под ред. Г. Эйнзеле, А. Зейлахера. М.: Мир, 1985. 504 с.
46. Цыбань А.В., Симонов А.И. Процессы микробного окисления нефти в море // Человек и биосфера. Вып. 3 / Под ред. В.Д. Федорова. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1979. С. 143–159.
47. Штурм Л.Д. Исследование по ассимиляции углеводородов микроорганизмами // Микробиология. 1958. Т. 27. № 6. С. 740–752.
48. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.
49. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука. 1994. 304 с.
50. Bastin E.S., Greer F.E. "Additional Data on Sulphate-Reducing Bacteria in Soils and Waters of Illinois Oil Fields." *AAPG Bulletin* 14.2 (1930): 153–159.
51. Bastin E.S., Greer F.E., Merritt C.A., Moulton G. "The Presence of Sulphate Reducing Bacteria in Oil Field Waters." *Science* 63.1618 (1926): 21–24.
52. Garcia de Oteyza T., Grimalt J.O. "GC and GC-MS Characterization of Crude Oil Transformation in Sediments and Microbial Mat Samples after the 1991 Oil Spill in the Saudi Arabian Gulf Coast." *Environmental Pollution* 139.3 (2006): 523–531.
53. Peressutti S.R., Alvarez H.M., Pucci O.H. "Dynamics of Hydrocarbon-Degrading Bacteriocenosis of an Experimental Oil Pollution in Patagonian Soil." *International biodeterioration & biodegradation* 52.1 (2003): 21–30.
54. ZoBell C.E. "Bacterial Release of Oil from Oil-Bearing Materials.[Gradual Release of Oil from Tar Sands]." *World Oil* 126 (1947): 36–47.
55. ZoBell C.E. "Bacterial Release of Oil from Sedimentary Materials." *Oil and Gas Journal* 46.13 (1947): 62–65.
56. ZoBell C.E. "The Occurrence, Effects and Fate of Oil Polluting the Sea." *Advances in Water Pollution Research*. Ed., E.A. Pearson. Oxford, London, New York, Paris: Pergamon Press, 1964, vol. 3, pp. 85–109.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Беленицкая, Г. А. Потоки углеводородов, нефтоседиментогенез и проблемы черных сланцев. Часть 1. Аварийные разливы нефти: экологические следствия / Г.А. Беленицкая // Пространство и Время. — 2014. — № 4(18). — С. 195—210. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271prov_st4-18.2014.91



Мидии – природные фильтры органических загрязнений. Фото с сайта <http://animals.howstuffworks.com/animal-facts/animals-affected-pictures.htm#page=7>