

Д.А. БУШ

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ
ЛОВУШКИ
В ПЕСЧАНИКАХ



С. П. ПЕТРОВИЧ
И. П. ПЕТРОВИЧ
— РАБОТА ПО ТЕХНИКЕ —



**STRATIGRAPHIC TRAPS
IN SANDSTONES
-EXPLORATION TECHNIQUES**

by Daniel A. Busch

Published by
The American Association of Petroleum Geologists
Tulsa, Oklahoma, U.S.A., July 1974

Д.А. БУШ

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ В ПЕСЧАНИКАХ

Методика исследований

Перевод с английского И.П. ЛАВРУШКО и Ю.Г. ТАКАЕВА

Под редакцией и с предисловием
д-ра геол.-мин. наук Н.А. ЕРЕМЕНКО

2028

Издательство "Мир"
Москва 1977



В хорошо иллюстрированной книге на многих конкретных примерах освещены различные вопросы, связанные с поисками месторождений нефти и газа, контролируемых ловушками литологического и стратиграфического типов. Перспективы таких месторождений широко известны. Достаточно сказать, что в США более 40% нефти добывается из подобных залежей. В этой связи книга Д. Буша (публикация Американской ассоциации геологов-нефтяников), обобщающая большой опыт геологов США, представляет значительный научный и практический интерес.

Книга явится ценным пособием для геологов-практиков и сотрудников научно-исследовательских организаций, занимающихся поисками, разведкой и выяснением условий образования месторождений нефти и газа, а также для студентов при изучении методики геологоразведочных работ на эти полезные ископаемые.

Редакция литературы по вопросам геологических наук

Copyright 1974 by
The American Association of Petroleum Geologists
All rights reserved

Б 20804 - 138 138-77 © Перевод на русский язык, "Мир", 1976
041(01) - 77

Предисловие

Предлагаемая вниманию советского читателя книга Д.А.Буша "Стратиграфические ловушки в песчаниках", изданная Американской ассоциацией геологов-нефтяников, безусловно, заинтересует геологов широкого профиля, занимающихся вопросами палеогеографии, а также изучением прибрежных фаций и песчаных формаций. Но особенно большой интерес эта книга должна вызвать у геологов-нефтяников. В книге детально рассматриваются проблемы, связанные с образованием стратиграфических и литологических ловушек в прибрежных условиях, имеющие первостепенное значение для США, так как более 40% добычи нефти и газа в этой стране ведется из таких ловушек или их комбинаций с антиклинальными структурами.

В СССР изучению нефтегазовых месторождений подобного типа до сих пор уделялось явно недостаточное внимание. Объясняется это различными причинами и в первую очередь, по-видимому, наличием достаточно большого числа антиклинальных структур, расположенных в благоприятных условиях. Разведка залежей, связанных с антиклинальными складками, значительно проще и соответственно экономически более эффективна. Однако в последние годы в ряде нефтегазоносных областей, особенно в старых нефтегазоносных районах Европейской части страны и Кавказа, все более и более ощущается "структурный голод". Назрела насущная необходимость заняться изучением и разведкой залежей нефти и газа, приуроченных к стратиграфическим и литологическим ловушкам.

Впервые в нашей стране залежи в литологических ловушках, так называемые "рукавообразные залежи", были описаны акад. И.М.Губкиным в 1911 г. Им же была разработана методика разведки таких залежей. На основе исследований Хельквиста, Бальзамова и многих других краснодарских геологов были разработаны теория образования и методика поисков и разведки "заливообразных залежей". Поиски и разведка литологических и стратиграфических залежей в других районах страны носили спорадический характер. Такого типа залежи открывались главным образом лишь попутно при разведке антиклинальных складок. Отсутствие существенных успе-

хов в значительной степени обусловлено отставанием теоретических исследований, некоторым пробелом в знаниях, прежде всего относящихся к оценке условий образования коллекторов-резервуаров залежей подобного типа. Предлагаемая книга восполняет этот пробел в части изучения литологических ловушек в песчаных коллекторах, образовавшихся в прибрежных обстановках.

Американские геологи не выделяют литологические ловушки в самостоятельную группу, как это принято в нашей стране, а рассматривают их вместе со стратиграфическими ловушками. Это положение отразилось в названии настоящей книги. В русском переводе было сохранено оригинальное название книги, хотя в ней в основном рассматриваются именно литологические ловушки.

Американскими геологами приобретен большой опыт по детальному изучению литологических ловушек, методам их картирования и разведки в них залежей нефти и газа.

Книга Д.А.Буша дает советскому читателю возможность ознакомиться с опытом американских геологов в этом направлении. Она является ярким примером использования актуализма в геологии не только в теоретическом плане, но и для решения конкретных практических задач разведки залежей определенного типа.

Н. Еременко

*В память моего сына
Дэниела Эндрю Буша
(21 января 1942 — 5 декабря 1966)*

Предисловие к английскому изданию

Данная книга представляет собой модифицированный вариант курса из 12 лекций о песчаниках, которые были прочитаны 55 группам геологов. Большая часть курса соответствовала программе повышения квалификации Американской ассоциации геологов-нефтяников.

Книга издана в связи с тем, что многие лица, прослушавшие курс, просили предоставить им материалы лекций. Несмотря на то что в книге содержится много сведений, которые не представляют собой ничего нового для геологов, работающих в научно-исследовательских лабораториях, надо иметь в виду, что лишь относительно небольшое число геологов-производственников имеют доступ к материалам таких лабораторий. Данная книга должна быть особенно полезной геологам-разведчикам, которые работают в небольших компаниях, независимым предпринимателям, а также консультантам-геологам, которые не имеют возможности активно участвовать в исследовательских работах.

В книге дается краткий обзор опубликованных данных о современных и древних осадках, который дополнен представлениями самого автора и примерами из его личной практики. Автор не ставил своей целью дать полное изложение каждой статьи. Проанализированы лишь аспекты, имеющие отношение к тем внутренним и внешним особенностям слагающих резервуары песчаников, которые могут быть непосредственно использованы в практике проведения поисково-разведочных работ на нефть и газ. Там, где было необходимо, рассмотрены гипотезы и теории происхождения песчаных тел; это сделано для того, чтобы вооружить читателя достаточным объемом знаний по изучаемому вопросу, а также в целях лучшего понимания обсуждаемых в книге методов поисково-разведочных работ на нефть.

Помещенный в конце книги список литературы подразделен на семь категорий. Он не полный, но тем не менее содержит достаточное число работ по каждому типу песчаников и поэтому может оказаться очень полезным для любого геолога, который захотел бы

изучить тот или иной тип песчаников. Число вошедших в список литературы учебников очень незначительно, так как большая часть описанных в данной книге представлений в них не рассматривается.

Во время многочисленных неофициальных дискуссий со слушателями моих лекций я извлек для себя очень много полезного. Я особенно признателен Артуру А.Мейергоффу и Пегги Райс за то, что они просмотрели и подвергли конструктивной критике рукопись книги, а также Деборе Зикмунд за ее тщательное редактирование текста. Я благодарен господину и госпоже Говард Кларк, которые изготовили многочисленные фоторепродукции рисунков, использованные во время чтения лекций и помещенные в книгу. Я также благодарю Джона К. Уорна за фотографию его гипсовой модели меандрирующего пояса.

Талса, Оклахома
март 1973 г.

Джилл А. Буш

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ

Практика современных поисково-разведочных работ требует знания основ стратиграфии. Геолог-нефтяник должен для овладения предметом постичь основные принципы минералогии, осадочной петрологии, седиментологии, стратиграфической палеонтологии и геоморфологии. Хотя все эти предметы обычно изучают отдельно, они тем не менее, будучи взаимосвязанными, перекрывают друг друга. Практическое знание всех этих предметов является основой понимания проблем стратиграфии толщ, залегающих на глубине. Особого внимания заслуживают следующие области исследования: принципы отложения осадков, обстановки осадконакопления, синхронные стратиграфические маркирующие горизонты, стратиграфические и палеогеоморфологические ловушки.

Обсуждение проблем, связанных с трактовкой принципов осадконакопления, является неотъемлемой частью курса седиментологии. Эти принципы применены к широкому разнообразию энергетических обстановок, каждая из которых должна рассматриваться отдельно, что дает возможность определить, какой из типов песчаных тел может образоваться в данной обстановке. Общая классификация энергетических обстановок включает в себя четыре основных обстановки осадконакопления: континентальную, озерную, прибрежную и морскую. Каждая из этих обстановок характеризуется различными противоположными друг другу энергетическими особенностями осадконакопления, в которых происходит аккумуляция большого количества кластических осадков. В табл. 1 представлена одна из классификаций обстановок осадконакопления.

По голоценовым отложениям, образовавшимся в большинстве обстановок, перечисленных в таблице 1, опубликована многочисленная литература. По аналогичным древним обстановкам осадконакопления, которые были изучены на основании данных обнажений, также имеются публикации. Однако выделению и прослеживанию этих древних обстановок на глубине посвящено слишком мало работ. Обсуждение в данной книге проблемы происхождения песчаников дает возможность определить методы изучения последовательности зале-

Таблица I

Классификация обстановок осадконакопления

- I. Континентальные
 - A. Аллювиальных равнин
 - Б. Русел рек
 - В. Дюн
 - Г. Проллювиальных конусов выноса
 - Д. Осьпей
 - Е. Ледниковая
- II. Озерная
- III. Морские прибрежные
 - A. Прибрежных равнин
 - Б. Пляжей
 - 1. Фронтальная часть пляжа
 - а) барьерный или прибрежный бар
 - 2. Тыловая часть пляжа
 - В. Низких гряд (ченьеров) и равнин, в пределах которых развиты последние
 - Г. Бухт и лагун
 - Д. Приливно-отливных равнин
 - Е. Песчаных банок приливно-отливной полосы
 - Ж. Дельты
 - 1. Дельты в форме птичьей лапы
 - 2. Дельты, приуроченные к эстуариям
 - 3. Полукруглые дельты
 - 4. Остроконечные дельты
 - 5. Лопастевидные дельты
- IV. Морские
 - A. Континентального шельфа
 - Б. Континентального склона, континентального подножья, батиметрической и абиссальной зон
 - 1. Турбидиты
 - а) русел
 - б) глубоководных конусов выноса
 - в) ложа бассейна

гания комплексов на глубине и представляет в распоряжение исследователя ряд примеров. В книге рассматривается проблема выделения и использования синхронных литологических маркирующих горизонтов (реперов). С помощью синхронного маркирующего репера при условии критического подхода к этому вопросу можно: 1) определить тип песчаного тела, 2) установить связь его формы с

условиями среды осадконакопления и 3) предсказать распространение этого тела на глубине в дополнение к тому, что можно узнать об этом на основании имеющихся контрольных данных.

Детальные исследования показывают, что среди ловушек в песчаниках значительное количество относится либо к стратиграфическим, либо палеогеоморфологическим. Выявление обоих типов ловушек и их анализ лучше всего проводить посредством их привязки к синхронным литологическим маркирующим горизонтам. Известно, что как тот, так и другой тип ловушек часто содержит нефть и газ. Можно с уверенностью сказать, что большая часть запасов нефти и газа в пределах континентальной части Северной Америки будет обнаружена в этих двух типах ловушек.

Геолог, изучающий развитые на глубине отложения, использует пробы, отобранные пробоотборником, шлам, керн и диаграммы каротажа. Основными типами каротажа являются электрический, радиоактивный и акустический, хотя применяют также более 30 типов механического каротажа. Совершенно необходимо, чтобы геолог-разведчик в совершенстве владел всеми этими методами.

В книге намеренно приведены примеры по осадочным породам различного возраста и по многим осадочным бассейнам. Таким образом, читатель должен себе ясно представлять, что обсуждаемые принципы и методы применимы к проблеме поисков нефти и газа во всех частях земного шара.

РАНЕЕ ПРИМЕНЯВШИЕСЯ МЕТОДЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА НЕФТЬ И ГАЗ

С тех пор как при поисках нефти и газа стали применяться геологические знания, методика поисково-разведочных работ, как и другие прикладные дисциплины, претерпела эволюцию. Когда геологи воспользовались специализированными знаниями в области строения земной коры для поисков нефти, их основные усилия были направлены на выяснение стратиграфии и строения толщ пород, слагающих обнажения. Был изучен, описан и детально нанесен на карты множество обнажений. В целях выбора под лицензии и разбуривание участков выделялись один или несколько маркирующих горизонтов и строились структурные карты поверхности.

Вскоре для геологов, занимающихся изучением поверхности, стало очевидным, что ударное бурение открывает новые возможности. Путем исследования под микроскопом шлама оказалось возможным установить природу, глубину залегания и распространение изучаемых формаций, а не только строить предположения на этот счет. Впервые были выделены и закартированы целые комплексы, не обнажающиеся на поверхности. При интерполяции отложений, обнажаю-

щихся на поверхности, и их корреляции с породами, развитыми на глубине, выяснилось, что большая часть первых образовалась в условиях древней прибрежно-морской шельфовой зоны. В связи с тем что осадки отлагались преимущественно в районах побережья, для толщ, сформировавшихся в этой обстановке, характерно наличие очень многочисленных поверхностей несогласия. Отдельные поверхности несогласия, которые наблюдаются вблизи обращенного к морю края шельфовой зоны осадконакопления (шарнирной линии), по направлению к береговой линии обычно сближаются и даже сливаются друг с другом.

Причины несогласия многочисленных тонких пластов, сближения поверхностей несогласия и часто встречающихся фациальных изменений в условиях шельфа не были полностью поняты до тех пор, пока геологи не получили возможность изучать образцы пород, извлекаемых с глубины.

В начале 30-х годов, когда в практику нефтяной промышленности был введен механический каротаж, геолог получил в свое распоряжение точный инструмент для измерения глубины залегания слоя, его мощности и т.д. Стало возможным сопоставлять литологию пород, основанную на анализе данных изучения образцов, с электрокаротажными диаграммами, полученными путем измерения спонтанной поляризации и электрического сопротивления.

С годами в нефтяную промышленность были внедрены более совершенные методы механического каротажа. Применение этих видов каротажа в сочетании с описанием образцов пород использовалось для точной корреляции развитых на глубине напластований. Совместная интерпретация этих данных позволила построить структурные карты ряда районов, для которых имелись лишь немногочисленные данные о наличии складчатых и разрывных структур или они вообще отсутствовали. На основании анализа образцов и диаграмм механического каротажа можно построить карты изопахит для различных типов стратиграфических комплексов. В тех районах, где анализ обнажений не дает возможности выяснить глубинное строение, можно построить структурные карты и карты изопахит толщ, залегающих под поверхностями несогласий.

Грабау [115] в своей книге "Принципы стратиграфии" выдвинул идею о взаимосвязи литофаций. Однако лишь Крамбейн [163, 164] и Дэйпле и др. [62]¹⁾ показали, что карты литофаций четко отражают конфигурацию бассейнов осадконакопления и географию развития основных литологических разновидностей для условно выбранных стратиграфических единиц. Эти работы явились первым, действи-

¹⁾К сожалению, автор книги не знаком с советской литературой. Подобные работы проводились в нашей стране еще в 30-е годы. См., например, работы Н.М. Страхова, В.П. Батурина, Л.В. Пустовалова и др. — *Прим. ред.*

тельно обоснованным подходом к количественной интерпретации и графическому изображению материала, который ранее представлял собой лишь большой объем описательных стратиграфических данных. Предложенные методы позволили использовать данные поверхностных наблюдений и бурения по отдельности, а также совместно.

Такая методика представляла собой значительный шаг вперед по сравнению с традиционными картами изопахит, так как она позволяла отобразить графически количественное соотношение различных по литологическому составу пород и тем самым выделить пояса осадконакопления, благоприятные для аккумуляции в их пределах нефти и газа. Такие карты особенно полезны при изучении осадочных бассейнов и проведении региональных стратиграфических исследований. Однако в процессе выявления конкретных объектов под бурение они имеют ограниченное значение.

В течение последних 10–15 лет геологи-нефтяники, занимающиеся поисками и разведкой нефтяных и газовых залежей, стали все больше и больше осознавать, что все осадочные породы являются производными обстановок осадконакопления или эпигенеза или же того и другого одновременно. Геометрическая форма многих осадочных образований, особенно песчаников, непосредственно связана с палеообстановкой осадконакопления. Так, например, форма, размер и простираание отдельного песчаного слоя во многих случаях генетически связаны с палеогеоморфологическими особенностями. Эти общие взаимосвязи хорошо описаны в работе Мартина [189]. Другой относящийся к этому вопросу пример приводится в работе Петерсона и Осмонда [211]. Обе упомянутые работы получили большое признание среди геологов-нефтяников как примеры наиболее современных направлений мышления.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОБСУЖДАЕМОЙ ПРОБЛЕМЕ

Наука о стратиграфии залегающих на глубине отложений, столь важная для нефтяной промышленности, развивалась мучительно медленно, что, вероятно, обусловлено тремя главными причинами.

Первая причина связана с тем, что авторы большинства учебников для университетов редко имеют возможность углубляться в изучение стратиграфии залегающих на глубине отложений. Большинство профессоров-геологов, занимающихся стратиграфией, гораздо больше внимания уделяют стратиграфии отложений, обнажающихся на поверхности. Таким образом, их работы носят петрологический и палеонтологический характер. Очень немногие ученые имеют доступ к многочисленным данным бурения, и еще меньшее их число заинтересовано в изучении проблем глубинной геологии.

Второй причиной медленного развития основных представлений о стратиграфии залегающих на глубине пород, по-видимому, надо считать общий недостаток эрудиции в таких дисциплинах, как седиментология, стратиграфическая палеонтология и геоморфология. Это замечание относится к большинству геологов-нефтяников, проводящих поисково-разведочные работы. Решение этой проблемы, по-видимому, заключается в самообразовании специалистов.

Третья причина состоит в том, что возможность публикации материалов опытными исследователями, работающими в компаниях, сдерживается руководством компаний. Значительная часть ценных в этой области исследований проводится, пожалуй, в шести научно-исследовательских лабораториях. Результаты этих исследований обычно освещены в секретных отчетах компаний, и их не разрешается публиковать в открытой печати до тех пор, пока то или иное конкурентноспособное достижение не будет реализовано. Во многих научно-исследовательских лабораториях крупных нефтяных компаний ведется разработка самых разнообразных важных геологических проблем. Некоторые из них относятся к категории основных и требуют длительных фундаментальных исследований, тогда как другие могут быть разрешены и внедрены в практику в более короткие сроки.

Очень важным источником информации о стратиграфии развитых на глубине толщ является литература по голоценовым отложениям. Весьма значительный скачок в осуществлении таких исследований отмечался в период после второй мировой войны. Обширные исследования голоценовых отложений были проведены рядом научных организаций Северной Америки, в том числе Скриппсовским океанографическим институтом, океанографическим институтом в Вудс-Холе, департаментом США по эрозии пляжей, Американским нефтяным институтом, Геологической обсерваторией Ламонт-Дохерти Колумбийского университета, а также береговой и геодезической службой США, институтом по исследованию побережья Университета штата Луизиана и Канадским институтом Арктики.

Многие исследования современных осадков проводятся не для изучения стратиграфии залегающих на глубине отложений, а совсем в других целях. В связи с этим на геологах-нефтяниках лежит обязанность отыскать в материалах этих исследований сведения, которые представляют потенциальную ценность или уже сейчас могут использоваться для решения проблемы поисково-разведочных работ на нефть и газ. Освещая проблему песчаников с этих позиций, автор заимствовал много сведений из статей по голоценовым осадкам, стараясь показать необходимость использования любых данных из всевозможных источников для того, чтобы получить представление о стратиграфии развитых на глубине отложений и разработать методы исследования.

ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ КОНЦЕПЦИИ О ВЗАИМОСВЯЗЯХ
МЕЖДУ ФАЦИЯМИ

Большая часть нефти и газа, добываемая из некарбонатных пород, обнаружена в коллекторах, отложившихся в обстановке морского побережья. Из табл. 1 видно, что различные типы резервуаров, относящихся к категории, связанной с обстановкой морского побережья, имеют особое значение для геолога-нефтяника. Обстановка морского побережья в противоположность континентальным, озерным и истинно морским обстановкам характеризуется относительно высоким энергетическим уровнем. Это район, в пределах которого береговая линия меняет свое положение. Такие латеральные смещения береговой линии могут быть результатом приливных процессов, тектонических движений, эвстатических изменений уровня моря или следствием проявления всех трех факторов одновременно. Латеральные перемещения береговой линии независимо от характера вызвавших их причин сопровождаются аналогичными смещениями зон, в пределах которых отлагаются определенные типы осадков. Для проведения целевого стратиграфического анализа важно обладать достаточными знаниями о существующих взаимосвязях между фациями, образующимися в этой обстановке, поэтому желательно рассмотреть здесь основополагающие понятия и принципы, относящиеся к этой проблеме, и проиллюстрировать их наглядными примерами.

Понятия о морской трансгрессии и регрессии рассматриваются как основополагающие. Однако не все геологи вкладывают в эти термины один и тот же смысл. В словаре терминов по геологии и смежным наукам Американского геологического института [137] определение термина *трансгрессия* не приводится, а вместо этого читатель отсылается к терминам *трансгрессивное прилегание* и *трансгрессивное перекрытие*. Термин *трансгрессивное прилегание* (onlap) трактуется так же, как и термин *трансгрессивное перекрытие* (transgressive overlap). В этом же словаре термин *регрессия* трактуется как *регрессивное прилегание* (offlap). Отмечается, что термин *регрессивное прилегание* некоторыми геологами отождествляется с термином *регрессивное перекрытие* (regressive overlap). Совершенно очевидно, что понятие о *процессе* было спутано с понятием о его *результате*: стратиграфические взаимоотношения являются результатом процессов трансгрессии и регрессии. В новом словаре Американского геологического института [105] термины *трансгрессия* и *регрессия* определяются как процессы, что в большей степени соответствует представлениям автора.

Предлагаются следующие определения трансгрессии и регрессии. *Трансгрессия* — миграция береговой линии в направлении к суше. *Регрессия* — миграция береговой линии в сторону моря. В приведенном здесь определении эти термины могут применяться как к

морским, так и озерным обстановкам. Ни одно определение не подразумевает выклинивания осадочных пород в сторону бассейна осадконакопления или в противоположном направлении. Только там, где стратиграф сопоставляет пачки пород, синхронных по времени образования, и отмечает, что залегание определенных пачек осадочных пород имеет трансгрессивный или регрессивный характер, применимы такие термины как *трансгрессивное прилегание*, *трансгрессивное перекрытие*, *регрессивное прилегание* и *регрессивное перекрытие*. Более того, только изучая подобные физические взаимосвязи, можно сделать заключение о том, как трансгрессировала или регрессировала древняя береговая линия. Понятие трансгрессии и регрессии, определяемое по взаимоотношениям сравнительно мелководных отложений с более глубоководными, исключительно полезно для геологов, ведущих поиск и разведку нефти и газа, при этом необходимо выяснить ряд важных обстоятельств, часть которых перечисляется ниже:

1. Палеогеоморфология граничащей с морем суши. Имела ли эта суша глубоко изрезанный, расчлененный рельеф или представляла собой пологий ундулирующий пенеплен или приливно-отливную равнину?

2. Природа источника сноса осадков. Были ли это изверженные, осадочные, метаизверженные, метаосадочные породы или все перечисленные типы пород вместе?

3. Палеообстановка осадконакопления. Какая существовала палеообстановка и в какой степени она контролировала направление развития, распределение и мощность песчаных тел?

4. Механизм осадконакопления. Какие процессы осадкообразования имели место в пределах каждого участка и до какой степени они предопределили форму и внутреннее строение песчаного тела?

5. Прочие миграции береговой линии. Являлось ли перемещение береговой полосы результатом эвстатических изменений уровня моря? Если это так, то фации должны были смещаться в латеральном направлении как в сторону моря, так и в сторону суши. Если же эти подвижки были обусловлены тектоническими явлениями (например, воздымание Скалистых гор в плиоцене), то должно отмечаться обильное поступление терригенных осадков и регрессия береговой линии.

Среди других более академических аспектов, связанных с понятием трансгрессии — регрессии, являются следующие:

1. Время. Как давно в геологическом прошлом были отложены те или иные осадки?

2. Скорость поступления осадков.

3. Рассеивание осадков.

Это некоторые из наиболее трудных проблем, связанных с трансгрессиями и регрессиями. Решение любой из них может оказаться важным при поисках нефти и газа.

Глава 2

ОТЛОЖЕНИЕ ТЕРРИГЕННЫХ ОСАДКОВ В ПРЕДЕЛАХ ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ РАЙОНОВ

2028

Взаимоотношения между трансгрессивно перекрывающимися друг друга и выклинивающимися осадками, отложившимися в прибрежно-морских заливах, могут быть сложными. Однако всегда прослеживаются признаки, указывающие на поведение поверхности осадконакопления, — ее опускание, воздымание или стабильность. Эти взаимоотношения отражают также природу тектонических движений: были ли они последовательными (однонаправленными) или циклическими. Можно также определить и скорость поступления осадков относительно скорости погружения или воздымания поверхности осадконакопления. В табл. 2 приводятся сводные данные о тех факторах, которые влияют на процесс осадконакопления в обстановке морского побережья.

Сопоставление скоростей накопления осадков и погружения бассейна в табл. 2 (А.1.а и А.1.б) приведено по данным Грабау [115],

Таблица 2

Факторы, влияющие на процесс отложения терригенных осадков в прибрежно-морских районах

А. Опускание дна

1. Постепенное погружение

- а. Скорость накопления осадков меньше скорости погружения
- б. Скорость накопления осадков больше скорости погружения
- в. Скорость накопления осадков равна скорости погружения

2. Циклическое (прерывистое) погружение

- а. Ограниченное поступление песка и обильное поступление ила
- б. Умеренное поступление песка и обильное поступление ила
- в. Ограниченное поступление песка и ила
- г. Обильное поступление ила
- д. Пески долин, развитых по простиранию слоев

Б. Поднятие дна

1. Постепенное воздымание

- а. Ограниченное поступление песка
- б. Поступление песка от умеренного до обильного



Продолжение табл. 2

2. Циклическое (прерывистое) воздымание

а. Постоянное поступление песка

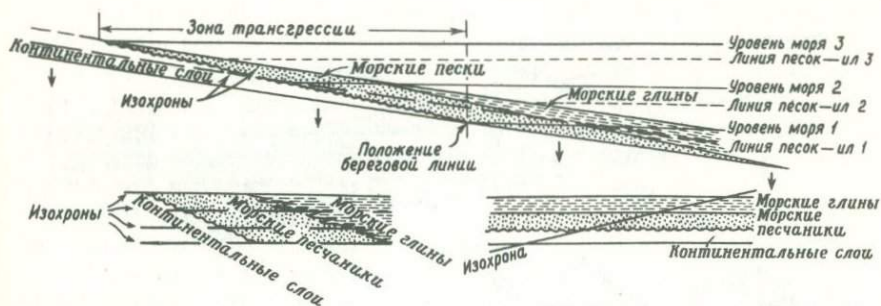
В. Стабильное положение дна

который первым признал существование взаимосвязи между этими двумя факторами. В этой таблице также собраны и систематизированы связи между накоплением определенного типа осадка, с одной стороны, и циклическим погружением и воздыманием, а также постепенным воздыманием — с другой (А.2, Б.1, Б.2). Уонлесс и Уэллер [286] впервые указали на существование циклических серий пластов в разрезах угольной свиты в пределах Восточного Внутреннего бассейна. Рассмотрение циклических разрезов осадков, отложившихся в прибрежно-морских условиях, свидетельствует о том, что принцип циклического отложения применим к осадкам от палеозойского до голоценового возраста. До какой степени процесс циклического осадконакопления связан с циклическим характером тектонических движений (поднятие и понижение морского дна) или с циклическими изменениями уровня моря, не известно. Характер отложения осадков, который показан на профилях фиг. 1—10, более удобно связать с изменением уровня моря. Такой же характер осадконакопления имел бы место, если уровень моря оставался постоянным, а поверхность осадконакопления воздымалась или понижалась постоянно или циклически. На всех этих схематических рисунках вертикальный масштаб увеличен.

ПОСТЕПЕННОЕ (НЕПРЕРЫВНОЕ) ПОГРУЖЕНИЕ

Скорость поступления осадков меньше скорости погружения.

На фиг. 1 схематически изображен разрез осадочной толщи, отложившейся в прибрежно-морских условиях, когда погружение поверхности осадконакопления шло быстрее, чем поступление осадочного материала. В результате этого береговая линия постепенно трансгрессировала справа налево. В пределах района, который в целом претерпел трансгрессию, морские песчаники залегают несогласно на пластах континентального происхождения. Несколько линий, разделяющих зоны развития песков и илов, являются "условными" линиями, которые определяют максимальную глубину действия волн для нескольких последовательных положений уровня моря, отмеченных на рисунке. Район аккумуляции морских песков выше этой линии характеризуется высоким энергетическим уровнем среды. Выше такой условной линии энергия волн и прилива достаточно велика, чтобы большинство алевритистых и глинистых частиц находилось во взвешенном состоянии. Эти мелкие частицы остаются во взвешенном состоянии до тех пор, пока они не будут перенесены в

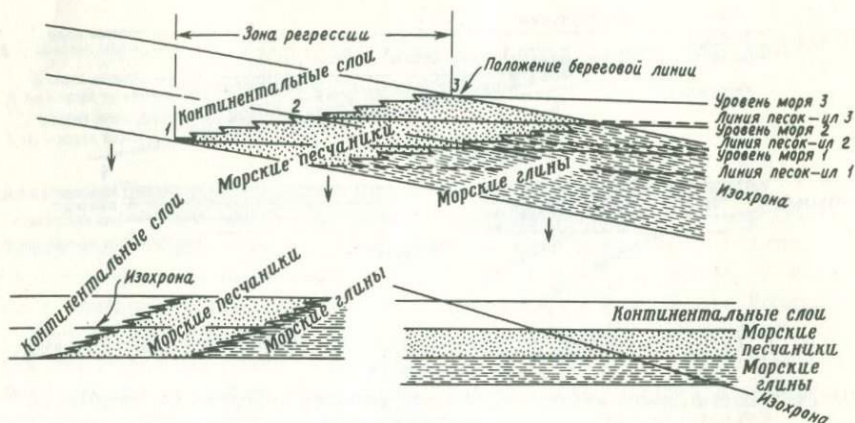


Ф и г. 1. Осадочная толща, образовавшаяся в прибрежно-морской обстановке [115 с изменениями].

Осадки накапливались медленнее, чем погружалась поверхность осадконакопления.

условия, характеризующиеся более низким энергетическим уровнем (т.е. в защищенную от действия открытого моря бухту или лагуну), где они оседают и образуют либо алевритистые глины, либо глины. Ниже линии, разделяющей зоны развития песков и илов, толща воды находится в довольно спокойном состоянии. В связи с этим глинистые и алевритистые частицы, осаждаясь в этом районе, образуют толщу, которая по времени формирования эквивалентна образовавшимся ближе к берегу морским песчаникам. Фиг.1 иллюстрирует условия, когда количество поступающего осадочного материала в два раза меньше необходимого для того, чтобы береговая линия сохраняла постоянное положение. Такие условия могут свидетельствовать о наличии сглаженного бордерленда, дренируемого спокойными потоками. Литологические единицы (континентальные пласты, морские песчаники и глины) явно трансгрессивно секут временные линии (изохроны). Разрез, представленный в левой нижней части фиг.1, построен с использованием изохрон, взятых в качестве условных линий отсчета. Это позволяет графически отразить одновременность накопления всех трех литологических единиц. В нижней правой части фиг. 1 в качестве поверхностей отсчета условно приняты литологические границы. При таком изображении временная эквивалентность нескольких литологических единиц в большинстве случаев затушевывается. Основной смысл фиг.1 заключается в том, что он дает наиболее вероятное объяснение образования непрерывного покрова морского базального песчаника.

Скорость поступления осадков больше скорости погружения. На фиг. 2 изображен разрез осадочной толщи, образовавшейся в прибрежно-морской обстановке, когда скорость поступления осадков



Ф и г. 2. Разрез осадочной толщи, образовавшейся в прибрежно-морской обстановке [115 с изменениями].

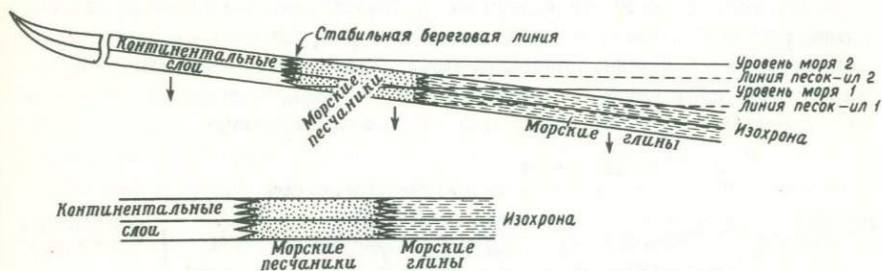
Скорость поступления осадков больше скорости прогибания бассейна. Скорость поступления осадков в два раза превышает скорость, которая необходима для того, чтобы береговая линия сохраняла постоянное положение.

к месту их накопления была выше скорости прогибания бассейна. В данном случае скорость поступления осадков в два раза превышала скорость, необходимую для того, чтобы береговая линия сохраняла постоянное положение. Так же как и на фиг. 1, расположение участков образования морских песчаников и глин в основном контролируется положением линии, отделяющей зоны развития песков и илов в вертикальной плоскости. Три основных литологических типа пород залегают явно регрессивно по отношению к изохронам. Эта взаимосвязь, по-видимому, свидетельствует о том, что изображенный в левой части фигуры участок сноса дренируется потоками, характеризующимися уклоном русла от среднего до большого. В таких условиях континентальные (неморские) слои имеют большую мощность по сравнению с эквивалентными им по времени образования слоями морского происхождения. В левой части фиг. 2 в качестве условных поверхностей приняты изохроны. При этом методе изображения подчеркивается, что континентальные слои образовались в период регрессий и что они эквивалентны по времени своего образования и условиям залегания морским песчаникам и морским глинам. Показанные в правой нижней части рисунка литологические границы условно используются в качестве поверхностей отсчета. Характер "пересечения" изохрон тремя регрессивными литологическими пачками противоположен изображенному на фиг. 1.

Из сравнения фиг. 1 и 2 видно, что стратиграфическая последовательность, изображенная на фиг. 1, состоит из континентальных слоев, несогласно перекрытых песчаниками, на которых залегают глины. На фиг. 2 изображена обратная стратиграфическая последовательность: на глинах залегают песчаники, которые перекрыты континентальными отложениями; несогласного залегания¹⁾ пород здесь нет.

Местами, где присутствующие комплексы фауны непосредственно связаны со средой осадконакопления, латеральное смещение (трансгрессивное или регрессивное) зоны накопления песков или илов сопровождается таким же латеральным смещением области развития фауны, особенно бентоса. В результате этого каждый из литофациальных комплексов, характеризующихся свойственной только ему фауной, может как трансгрессивно, так и регрессивно пересекать изохроны.

Скорость поступления осадков равна скорости погружения. Фиг. 3 характеризует условия, при которых скорость осадконакопления равна скорости погружения бассейна, в результате чего береговая линия



Ф и г. 3. Разрез осадочной толщи, образовавшейся в прибрежно-морской обстановке [115 с изменениями].

Скорость осадконакопления равна скорости погружения бассейна; береговая линия сохраняет постоянное положение.

¹⁾ Типы несогласий, которые упоминаются в этой книге, взяты из работы Данбара и Роджерса [73] и определяются следующим образом. *Несогласие* (nonconformity) — слоистые породы лежат на неслоистых магматических или метаморфических породах; *угловое несогласие* (angular unconformity) — две слоистые пачки пород залегают под углом друг к другу; *стратиграфическое (эрозионное) несогласие* (disconformity) — толща состоит из параллельно залегающих пластов, однако контакт между пластами представлен неровной эрозионной поверхностью; *параллельное несогласное напластование* (paraconformity) — контакт между залегающими последовательно друг на друге толщами представлен в виде простой поверхности напластования, на уровне которой предполагается наличие перерыва в осадконакоплении.

сохраняет стабильное состояние. Поскольку береговая линия не трансгрессирует и не регрессирует, накапливаются мощные толщи континентальных осадков, песчаников (включая песчаники-коллекторы) и глин. Примером может служить олигоценовый песчаник барьерного бара Фрио в пределах тхасского побережья Мексиканского залива [33], максимальная мощность которого составляет 1525 м.

Возраст песчаников и глин, отложившихся в условиях, показанных на фиг. 3, один и тот же, а переходные зоны, отделяющие морские песчаники с одной стороны от континентальных слоев, а с другой — от морских глин, расположены почти вертикально. Поверхности напластования и синхронные поверхности по существу совпадают и пересекают переходные зоны под прямыми углами. Очень большая мощность толщи морских песчаников обусловлена тем, что скорость погружения бассейна была равной скорости отложения осадков.

ЦИКЛИЧЕСКОЕ (ПРЕРЫВИСТОЕ) ПОГРУЖЕНИЕ¹⁾

Ограниченное поступление песка и обильное поступление ила.

На фиг. 4 приведен довольно распространенный пример фациальных взаимосвязей, которые являются результатом циклического характера погружения. Скорость поступления материала недостаточна, чтобы превысить скорость прогибания дна, и поэтому происходит трансгрессия береговой линии. В данном примере песчаный



Ф и г. 4. Циклическое (прерывистое) погружение бассейна при очень ограниченном поступлении песка и обильном поступлении ила и алевроита.

Выклинивающиеся песчаные линзы упираются в поверхность несогласия, свидетельствуя о том, что толща осадков откладывалась в условиях неподвижной береговой линии в течение общего периода морской трансгрессии.

¹⁾Здесь и далее под циклическим погружением автор понимает прерывистое погружение с остановками (фиксацией) положения береговой линии во времени. *Прим. ред.*

материал поступает в ограниченном количестве, а глинистый и алевритистый — в большом количестве. По существу количество поступающего песка недостаточно для того, чтобы на поверхности несогласия образовался сплошной покров отложений. Существование таких условий приводит к возникновению серии линз пляжевых песков, которые упираются в поверхность несогласия и выклиниваются по направлению к внутренней части бассейна. В вертикальном разрезе они залегают кулисообразно друг к другу. Положение и форма каждого песчаного тела, показанного на фиг. 4, очень схематизировано и соответствует неподвижному состоянию береговой линии в период максимального развития морской трансгрессии. Толщи алевритистых и глинистых осадков, разделяющие выклинивающиеся песчаные пачки, образуются в процессе циклического погружения (в условиях ограниченного поступления песчаного материала), при котором трансгрессия идет слишком быстро, чтобы обеспечить накопление песка. Характер процесса осадконакопления в условиях пляжевой обстановки обсуждается и иллюстрируется ниже. Каждая из показанных на фиг. 4 песчаных линз состоит из осадков, отложившихся в пределах верхнего и нижнего участков фронтальной части берега. Поэтому одна и та же песчаная линза, как схематически показано на фигуре, может частично состоять из пляжевого песка, а частично быть представленной песками одного или большего количества баров. Серия непротяженных, кулисообразно расположенных по вертикали карбонатных слоев может сопровождать песчаные линзы с внутренней стороны бассейна. В большинстве районов эти карбонатные слои состоят из претерпевшего диагенетические изменения кластического материала. Толща алевритистых и глинистых осадков, разделяющая любую пару карбонатных слоев, обычно имеет постоянную мощность, причем если мощность меняется, то она немного увеличивается в сторону внутренней части бассейна. Каждый карбонатный слой отлагался одновременно с расположенным ближе к берегу песчаным телом и на одном уровне с ним. Карбонатные слои имеют очень большую протяженность параллельно береговой линии, их ширина в направлении, перпендикулярном береговой линии, изменяется от нескольких километров до 16–24 км. Таким образом, они представляют собой замечательные синхронные маркирующие горизонты, которые могут быть использованы для проведения детальных стратиграфических исследований. Самая верхняя часть фиг. 4 свидетельствует об источнике источника сноса песка; здесь осадочная толща целиком состоит из переслаивающихся друг с другом тонких слоев карбонатных осадков алевритов и глин.

Если построить карту изопахит стратиграфического интервала от поверхности несогласия до одного из нескольких тонких прослоев карбонатных пород, показанных в верхней части фигуры, то она

будет отражать рельеф поверхности, существовавший до периода морской трансгрессии. Неровности этой поверхности несогласия непосредственно определяют изгибы береговой линии на той или иной стадии циклического погружения дна. В свою очередь направление береговой линии часто определяет характер извилистости контура той части района прибрежно-морской обстановки, в которой откладываются пески. Градиент падения поверхности несогласия в сторону моря также является фактором, определяющим не только изменчивость простираания зоны осадконакопления, но и изменения ширины того или иного песчаного тела. Построение такой карты изопакит является превосходным средством для того, чтобы проследить и спроецировать каждый из кулисообразно расположенных тел песчаника по простираанию зоны осадконакопления.

Умеренное поступление песка и обильное поступление ила. Условия осадконакопления и разрез отложений, показанные на фиг. 5, сходны с теми, которые приведены на фиг. 4, за исключением того, что в данном случае из источника сноса поступает умеренное количество песка и большое количество ила. Образовавшиеся слои аргиллита переслаиваются с многочисленными маломощными прослоями известняка. Количество песка было достаточным для того, чтобы он отложился сплошным покровом на поверхности несогласия. Главным свидетельством цикличности (прерывистости) процесса погружения бассейна является наличие гальки в верхней части песчаной толщи, а также кулисообразное расположение маломощных карбонатных слоев, которые отлагались ближе к внутренним частям бассейна от выклинивающихся язычков песчаного тела. Хотя такое песчаное тело вполне может обладать значительной пористостью и проницаемостью, оно может содержать и отдельные



Ф и г. 5. Циклическое (прерывистое) погружение бассейна при среднем количестве поступающего песка и обильном количестве поступающего ила.

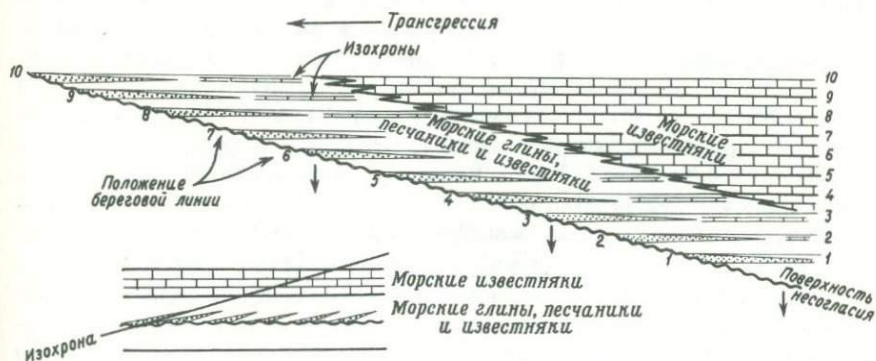
Песчаники сплошным покровом залегают на поверхности несогласия. Верхняя граница тела песчаников представлена серией кулисообразно выклинивающихся язычков, каждый из которых соответствует положению береговой линии в период покоя.

хорошо выраженные резервуары, благоприятные для аккумуляции углеводородов. Причиной образования этих резервуаров могут быть либо структурные, либо стратиграфические факторы. Наклон толщ пород после завершения процесса осадконакопления против часовой стрелки мог превратить каждый язык "галечниковых" песчаников в обособленный резервуар с собственными водо-нефтяным и газо-водяным контактами. При таких условиях основное песчаное тело на участках его залегания на поверхности несогласия может содержать только воду.

Палеорельеф поверхности несогласия можно восстановить путем построения карты изопакит глинисто-алевритовой толщи, залегающей между поверхностью несогласия и любым из нескольких маломощных карбонатных слоев, который выбирается в качестве плоскости отсчета. В связи с тем что каждый карбонатный слой имеет ограниченное географическое распространение, в районах, расположенных за пределами карбонатного пласта, выбранного в качестве поверхности отсчета, может возникнуть необходимость в выделении "условного" горизонта.

Ограниченное поступление песка, умеренное поступление ила и обильное поступление карбонатного материала. На фиг. 6 показан пример циклического характера погружения, при котором в бассейн поступает ограниченное количество песка, среднее количество ила и много карбонатного материала.

Здесь так же, как и на фиг. 4, отдельные тела пляжевых песков отложились кулисообразно (как видно на вертикальном разрезе) вдоль склона поверхности несогласия. Каждому телу соответствует



Фиг. 6. Циклическое (прерывистое) погружение бассейна при ограниченном поступлении песка, умеренном поступлении ила и обильном поступлении карбонатного материала.

Каждый из выклинивающихся пластов песчаника отлагался параллельно последовательно смещавшейся береговой линии, примыкая к ней.

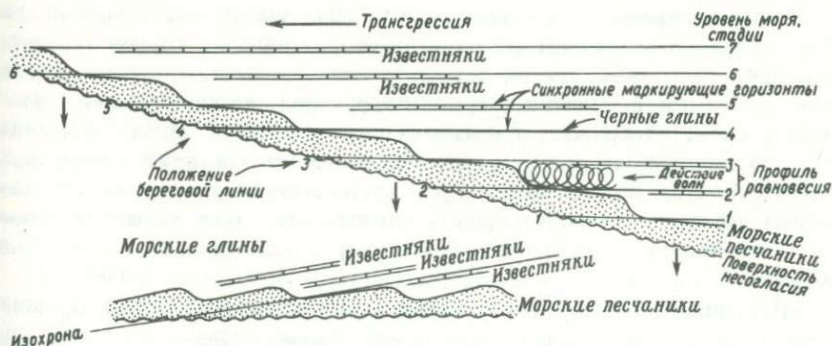
эквивалентный по времени образования карбонатный слой, который формировался в более внутренних частях бассейна. Пляжевые пески отлагались параллельно простирацию последовательно смещавшейся береговой линии. Рельеф поверхности несогласия может быть восстановлен тем же способом, который был описан при рассмотрении фиг. 5; для построения карты изопахит интервала разреза, расположенного выше поверхности несогласия, в качестве поверхности отсчета можно также использовать кровлю выклинивающейся карбонатной толщи. Наиболее примечательной чертой обсуждаемой фигуры является относительно постоянная мощность глинисто-алевроитовой толщи, заключенной между поверхностью несогласия и выклинивающейся карбонатной толщей. Глинисто-алевроитовая толща может протягиваться в виде непрерывной литологической единицы на расстояние сотен миль как перпендикулярно зоне осадконакопления, так и параллельно ей.

Согласно записке Американской комиссии по стратиграфической номенклатуре [3] и положению, принятому в геологической службе Канады, осадочная формация определяется как "...имеющее четко выраженный литологический состав образование, возникшее в результате по существу непрерывного процесса осадконакопления и выделенное из локального разреза отложений как объект, удобный для картирования, описания и использования в качестве условного репера". Это определение относится к тем комплексам пород, выделение которых не основывается на временных взаимоотношениях. Толща преимущественно глинисто-алевроитовых пород на фиг. 6 является явно трансгрессивной по отношению к изохронам; все слои, расположенные справа от изохрон, имеют явно более древний возраст. Большая часть из присутствующей в разрезе фауны распределяется аналогичным образом. Схема, изображенная на фиг. 6, построена на основании данных разреза нижнесилурийских пород самой западной части Аппалачской геосинклинали. Несмотря на существующую точку зрения о том, что основной источник сноса материала, поступавшего в этот бассейн, располагается на востоке, фигура также свидетельствует о том, что протягивающаяся в северо-восточном направлении западная окраина этого узкого залива, как правило, трансгрессировала на северо-запад. Горизонты гальки, последовательно встречающиеся в разрезе пляжевых песков, отлагавшихся вдоль этого северо-западного берега, несомненно, свидетельствует либо о циклическом характере погружения поверхности осадконакопления, либо о циклическом поднятии уровня моря. Глины и песчаники, показанные на фиг. 6, принадлежат к формации Клинтон; выклинивающийся известняк (силурийско-девонского возраста) известен у буровиков под названием "Биг Лайм". Тонкие слои известняков, расположенные кулисообразно среди клинтонских глин,

названы буровиками "Пакер Лайм". Они являются литологическими временными маркирующими горизонтами и используются в качестве поверхностей отсчета при построении карт изопахит интервалов разреза клинтонских глин, которые залегают ниже этих поверхностей.

Глины Чаттануга представляют собой другой пример пачки морских глин хорошо выдержанной мощности, которая залегает трансгрессивно по отношению к временным линиям (изохронам). В типовом разрезе близ города Чаттануга эта пачка содержит позднедевонскую фауну. В направлении к северу она прослежена на 645 км вдоль восточного склона купола Нашвилл и через штат Кентукки в центральную часть штата Огайо вдоль восточного склона свода Цинциннати. Это непрерывная литологическая пачка. На востоке центральной части штата Огайо глины этой пачки имеют раннемиссисипский возраст, а под ними залегают глины Бедфорд и песчаники Берия (самый ранний миссисипский). Глины Чаттануга представляют собой трансгрессивную пачку; в юго-западных районах они имеют девонский возраст, в северо-восточных — миссисипский. Приведенные выше примеры свидетельствуют о том, что каждая глинистая пачка, мощность которой остается постоянной на значительном расстоянии в направлении, перпендикулярном простирацию береговой линии, вероятно, либо трансгрессивна, либо регрессивна по отношению к изохронам.

Обильное поступление песка и ила. На фиг. 7 приведен пример циклического погружения дна при обильном поступлении песка и ила. В результате этого образуется сплошной покров базальных



Ф и г. 7. Циклическое (прерывистое) прогибание бассейна при обильном поступлении песка и ила.

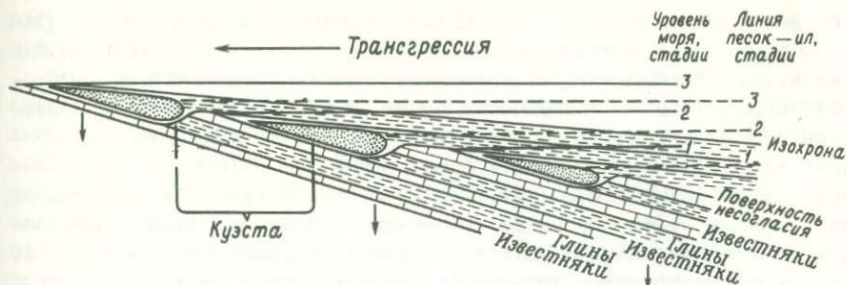
Песчаник залегает на поверхности несогласия в виде сплошного мощного покрова. Террасированная верхняя поверхность песчаной толщи образовалась в результате эрозионного действия волн в периоды, когда уровень моря не изменялся.

песков, несогласно залегающий либо на морских, либо на континентальных слоях. Мощность песков обычно большая, однако она меняется в значительных пределах. Песчаный покров залегает явно трансгрессивно по отношению к изохронам. На фигуре показаны два различных типа синхронных маркирующих горизонтов — мало-мощные слои известняка и черной глины. Последний более удобен для использования в данных обстоятельствах в качестве поверхности отсчета, так как он более протяженный. Черные глины могут распространяться в пределы зоны развития прибрежных песчаников (фиг. 7). Такие маломощные слои черной глины выделяются на кривой кажущегося сопротивления электрокаротажной диаграммы по характерным минимумам.

Неровный профиль верхней поверхности песчаника является следствием волновой эрозии в течение последовательно сменяющихся друг друга периодов неподвижного положения уровня моря. В результате эрозионных процессов образуются серии песчаных гребней, более крутые склоны которых обращены к морю. Изменение наклона этой толщи в направлении против часовой стрелки после завершения осадконакопления может создать идеальные для скопления нефти и газа ловушки вдоль самых приподнятых участков отдельных гребней. Для того чтобы закартировать структуру верхней поверхности такого песчаного тела, необходимо интенсивное разбуривание. Такая карта может оказаться полезной для прогнозирования местоположения и условий залегания отдельных террас (или гребней), а также для того, чтобы установить, имел ли место наклон против часовой стрелки.

Такие построения можно сделать, если выбрать в качестве литологического маркирующего горизонта тонкий слой черной глины и измерить расстояние по вертикали от него до кровли залегающего ниже или выше песчаника. Карта, построенная по данным этих замеров, будет отображать подводный палеорельеф поверхности песчаника. В дальнейшем вычерченную на кальке структурную карту, которая строится по условному литологическому маркеру, можно наложить на карту палеорельефа. Сочетание этих карт помогает геологу-поисковику оконтурить районы, где можно ожидать наличие ловушек.

Песчаники, выполняющие долины, развитые по простиранию пород. На фиг. 8 показана обстановка осадконакопления, которую трудно классифицировать согласно принципу, положенному в основу табл. 2. Несмотря на то что данная фигура представлена в качестве примера циклического характера прогибания бассейна (А.2.д), ее также логично рассматривать как пример постепенного прогибания бассейна, который в табл. 2 значится под индексом А.1.г. В этом примере поверхность несогласия, располагающаяся ниже песчаных



Ф и г. 8. Циклическое или постепенное погружение, в процессе которого в долинах, развитых по простирианию пластов между куэстами древней поверхности, отлагаются асимметричные каплевидные линзы песчаников.

В сторону суши песчаные линзы выклиниваются постепенно, а в сторону моря — резко. Они могут быть сильно вытянутыми и протягиваться параллельно долинам, в которых они отлагались.

тел, определяет их простириание и площадь распространения. Поверхность несогласия представляет собой эрозионную поверхность наклонной толщи, сложенной известняками и глинами. В результате возникла серия субпараллельных куэст и долин, вытянутых по простирианию пород. Уступы сложены устойчивыми к эрозии породами, а долины, параллельные простирианию пород, образовались там, где субсеквентные потоки прорезали менее крепкие породы. Субсеквентные потоки являются притоками консеквентных, которые возникли на только что претерпевшей поднятие поверхности земли. В связи с тем что позднее в долинах, развитых по простирианию слоев, образовались линзовидные тела песчаников, логично предположить, что в пределах консеквентных долин могут быть распространены песчаные тела, протягивающиеся в поперечном направлении. Такие песчаники должны быть одинаково ориентированы по отношению к долинам, развитым по простирианию слоев, так как консеквентные потоки текут почти под прямым углом к субсеквентным потокам.

Песчаные тела, отложившиеся в долинах по простирианию слоев, в поперечном разрезе имеют асимметричную каплевидную форму (фиг. 8). В сторону суши они выклиниваются постепенно, а в сторону моря — резко. По простирианию они могут протягиваться на много километров. Между отдельными песчаными телами и расположенной ниже поверхностью несогласия обычно залегают глины мощностью до нескольких футов. Глины могут представлять собой перестолженную почву. Показанные на фиг. 8 песчаные тела расположены кулисообразно по отношению друг к другу, поэтому при классификации для удобства их можно относить к типу песчаников,

образовавшихся в процессе циклического погружения бассейна. Однако такое расположение асимметричных, субпараллельных песчаных тел может явиться результатом постепенного прогибания в условиях ограниченного поступления песка. Какие энергетические факторы обусловили такое расположение песчаных линз, точно не установлено. Предполагают, что песок сносился с приподнятого района, расположенного влево от фиг. 8. Можно также предположить, что энергия вдоль берегового течения и волн заставила привнесенный с суши алевролитистый и глинистый материал находиться во взвешенном состоянии, тогда как грубозернистый песчаный материал осаждался в лагунообразном понижении между двумя соседними уступами. В пределах таких лагунообразных заливов волновая база находится ближе к поверхности, чем в обычных прибрежно-морских условиях, где волны свободно бьют о берег. Там, где лагунообразный участок оказывается изолированным двумя куэстами, при наступлении моря более выдвинутая в море куэста в конце концов погружается под воду. Вертикальное положение гребня куэсты по отношению к уровню моря определяет эффективную глубину волновой базы.

Литологический состав и строение толщи, залегающей ниже поверхности несогласия, имеют очень важное значение для установления типа песчаного тела, которое отлагается вдоль кромки наступающего залива. Как правило, обнаружить на глубине песчаники рассмотренного в данном разделе типа трудно, хотя они и являются совершенно обычными образованиями.

Песчаники, выполняющие долины по простиранию, фактически представляют собой особый тип русловых песчаников. Несмотря на то что они развиты в долинах, которые некогда были эродированы субсеквентными потоками, следует иметь в виду, что два субсеквентных потока, впадающих в один и тот же или в разные консеквентные потоки, могут течь в противоположных направлениях: либо удаляясь друг от друга, либо навстречу друг другу. Таким образом, описываемые песчаники могут находиться в разных частях одной и той же долины, развитой по простиранию пород.

В связи с тем что песчаные тела, выполняющие долины, развитые по простиранию пород, скорее всего отлагались параллельно древней береговой линии и представляют собой вытянутые линзовидные тела, их можно легко принять за встречающиеся на глубине древние прибрежные бары. Критерии, позволяющие отличить первые от вторых, рассмотрены ниже.

На фиг. 8 срезанная несогласием толща известняков и глинистых сланцев погружается в сторону моря. Первое (самое древнее) песчаное тело, выполняющее долину, развитую по простиранию пород (справа на фиг. 8), залегают на самой молодой по возрасту части стратиграфического разреза под поверхностью несогласия, и, наобо-

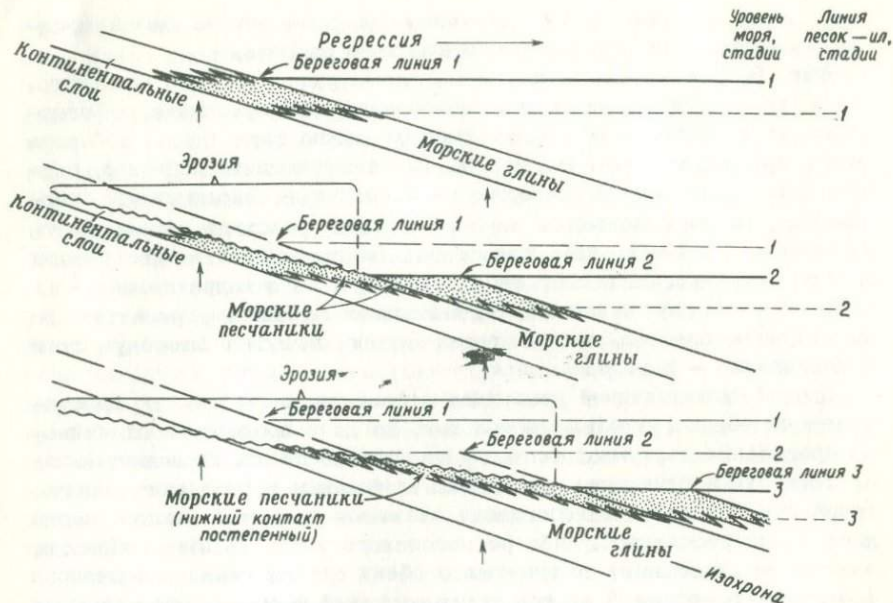
рот, самое молодое из трех песчаных тел залегает на самой древней по возрасту части стратиграфического разреза.

Фиг. 8, так же как и фиг. 1-7, схематична и служит для того, чтобы графически изобразить основополагающие концепции. Безусловно, к представленным иллюстрациям можно было бы добавить много других, которые явились бы их модификацией. Например, песчаные тела, по типу близкие, но не идентичные описываемым песчаникам, могли отложиться на определенных участках поверхности несогласия, а именно там, где срезанные поверхностью несогласия пласты погружались в сторону от залива, а не в направлении к нему. В этом случае песчаники, выполняющие долины, развитые по простиранию пластов, должны резко выклиниваться в сторону суши и постепенно — в сторону моря.

Другой модификацией концепции о долинах, развитых по простиранию слоев, могут служить условия, когда в процессе постепенного прогибания поступает большое количество песка. В зависимости от скорости поступления осадков по отношению к скорости прогибания вся поверхность несогласия окажется покрытой чехлом песка либо трансгрессивного, либо регрессивного типа. Таким образом, вместо изолированных вытянутых с обеих сторон линз песчаника формируется песчаный покров асимметричной формы с основанием в виде "стиральной доски" и плоской верхней поверхностью. В условиях циклического погружения, когда песок поступает в количестве от умеренного до обильного, образующееся песчаное тело будет иметь асимметричную в виде "стиральной доски" подошву; верхняя граница такого тела будет образовывать серию кулисообразно расположенных языков, проникающих в глинистые сланцы. Между довольно отчетливо выделяющимися верхней и нижней поверхностями будет залегать покров трансгрессивного песчаника. На основании этих немногих описанных модификаций основных типов песчаников становится очевидным, что в природе может существовать и много других сочетаний.

ПОСТЕПЕННОЕ ВОЗДЫМАНИЕ

Ограниченное поступление песка и обильное поступление ила. На фиг. 9 изображен случай, когда поверхность осадконакопления постепенно поднимается, а песок поступает в ограниченных количествах. В этих условиях породы, слагающие берег, постепенно разрушаются, а пески и глины залегают регрессивно. На первой стадии прибрежно-морские пески отлагаются между береговой линией и линией пересечения границы зон развития песков и илов с расположенной под водой поверхностью осадконакопления. На второй стадии происходят выветривание и эрозия песчаных и континентальных слоев в условиях постепенно обнажающегося дна моря и



Ф и г. 9. Постепенное воздымание бассейна при ограниченном поступлении песка.

Осадки, слагающие берег, непрерывно подвергаются эрозии; в процессе регрессии моря происходит перетолжение прибрежно-морских песков. Нижний контакт песчанников с подстилающими их глинами постепенный, а верхний частично является несогласным, частично согласным по отношению к отложившимся позже осадкам.

ограниченного поступления песка. Верхняя поверхность песчаных и континентальных слоев (первая стадия) на второй стадии представляет собой поверхность несогласия. Более того, на этой стадии береговая линия отступает (регрессирует) и занимает новое положение. Эродированный материал, образующийся в процессе второй стадии, переносится к кромке залива, где в результате волнения происходит его сортировка и песок отделяется от алевролита и глины. Таким образом, на второй стадии происходит перетолжение морских песков и континентальных слоев, образовавшихся в первую стадию. На третьей стадии все континентальные слои и большая часть морских песчанников, отложившихся на первой стадии, эродируются. Более того, пески, отложившиеся на второй стадии, подвергаются активному выветриванию и эрозии. Зоны осадения песков и ила постепенно смещаются еще дальше в море. Контакт песчаного тела с подстилающей глиной постепенный. Часть верхнего

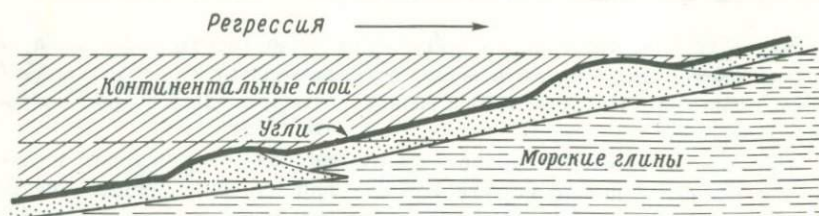
контакта представляет собой эрозионную поверхность несогласия, а другая часть, выдвинутая в море, залегает согласно с вышележащими осадками. На всех трех стадиях литологические границы секут изохроны.

При таком сочетании условий, а именно когда происходит постепенное поднятие поверхности осадконакопления при ограниченном поступлении осадков, отлагающиеся морские песчаные тела характеризуются незначительной шириной, однако в длину они могут протягиваться на десятки миль. Если бы началось опускание поверхности осадконакопления, то линзовидное песчаное тело, образовавшееся на третьей стадии, оказалось бы полностью изолированным, так как поверх него отложился бы ил. Такие залегающие в глинах полностью изолированные линзы песчаников явились бы идеальными ловушками для углеводородов. Подобные условия осадконакопления существовали во многих районах побережья Мексиканского залива в кайнозойское время.

Песок и ил поступают в количествах от умеренных до обильных. Визуальное представление о характере распространения осадков в условиях постепенного обнажения дна при поступлении песка и ила в количествах от умеренных до обильных можно получить, рассматривая фиг. 2, хотя последняя приведена в качестве примера, иллюстрирующего условия постепенного погружения, когда скорость поступления материала превышает скорость погружения. Источник сноса осадков и место их окончательного отложения одновременно поднимаются с одной и той же скоростью. На фиг. 2 показан случай, когда трудно определить, происходит погружение поверхности осадконакопления или ее выход над уровнем моря. В такой ситуации обычно можно провести точный анализ для выяснения вопроса: образовались ли толщи осадков, залегающие непосредственно над и под этой поверхностью, в период ее погружения или появления над уровнем моря?

ЦИКЛИЧЕСКОЕ (ПРЕРЫВИСТОЕ) ВОЗДЫМАНИЕ

Постоянное поступление песка в умеренных количествах и обильное поступление ила. В ряде мест наблюдается циклический характер выхода поверхности осадконакопления над уровнем моря. На фиг. 10 показано взаимоотношение отложений, сформировавшихся в результате такого циклического воздымания в условиях, когда осадки поступают постоянно и в умеренных количествах. В общем регрессивный покров песчаника со стороны моря (справа) ограничен морскими глинами, а со стороны суши (слева) — углями и континентальными отложениями. Этот песчаник, однако, отличается от песчаника, показанного на фиг. 2, тем, что в отдельных участках он имеет большую мощность. Каждый из таких участков



Ф и г. 10. Циклическое воздымание при постоянном поступлении песка в умеренных количествах.

Каждый из участков, где наблюдается локальное увеличение мощности песчаников, характеризует период устойчивой пляжевой обстановки. Покровные песчанники формировались в периоды относительно быстрой регрессии береговой линии.

характеризует период устойчивой пляжевой обстановки в процессе циклической регрессии береговой линии. Маломощные песчанники, развитые на участках между локально распространенными мощными песчанниками, образовались в результате довольно быстрой регрессии. Мощность этого покрова песчаников непосредственно зависит от скорости регрессии и количества поступающего песка. Пунктирными горизонтальными линиями на фиг. 10 показаны изохроны. Каждая изохрона сечет толщу осадков, что свидетельствует об одновременном отложении четырех литологических пачек, изображенных на фигуре слева направо: континентальных слоев, болотистых углеобразующих осадков, морских песков и морских илов. В данном случае, когда угольный пласт перекрывает регрессивный морской песчанник, его нельзя использовать в качестве поверхности отсчета для проведения стратиграфического анализа залегающих на глубине отложений. Дело в том, что этот угольный пласт сформировался в пределах узкого, располагавшегося по окраине залива болота, которое сначала регрессировало, а затем трансгрессировало и характеризовалось то континентальными, то морскими условиями осадконакопления. В обстановке, изображенной на фиг. 10, встречающийся местами мощный песчанник, по-видимому, содержит хорошо сортированные песчаные зерна, имеет более высокую пористость и проницаемость по сравнению с маломощным покровом, который не отличается хорошей сортировкой зерен, более тонкослоист и даже может включать прослой глины.

СТАБИЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ДНА БАССЕЙНА

Разрез дельтовых отложений. На фиг. 11 изображена взаимосвязь между фациями, образовавшимися в условиях стабильного положения поверхности осадконакопления. Характер распространения



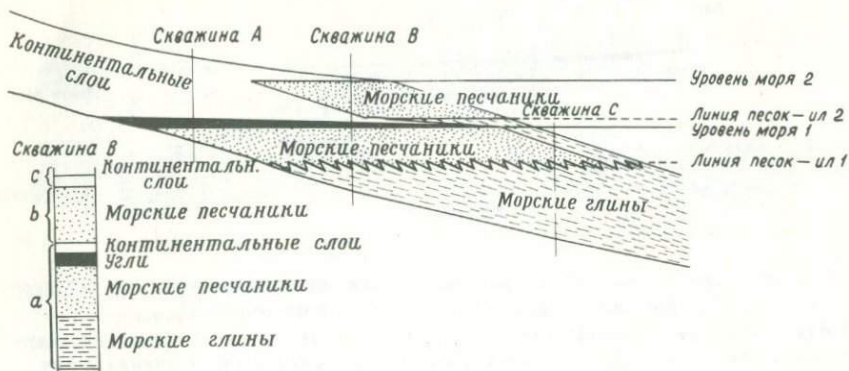
Ф и г. 11. Стабильное положение поверхности осадконакопления при равномерном поступлении осадков [115 с изменениями].

В таких условиях береговая линия регрессирует. Изображенный разрез очень типичен для дельтовой обстановки. Наклон передовых слоев в пределах прибрежно-морского участка развития дельты сильно увеличен. Изохроны обращены вогнутой стороной кверху, а их взаимоотношение со всеми четырьмя изображенными литологическими типами пород имеет регрессивный характер.

отложений не зависит от скорости поступления осадков. Последовательные положения регрессирующей береговой линии пронумерованы, чтобы показать направление ее движения.

В связи с тем что мощность слоев глинистых сланцев постепенно уменьшается в направлении внутренней части бассейна, изохроны имеют изогнутую форму. Континентальные слои отделены от залегающих ниже морских песчаников угольным пластом, который, так же как и на фиг. 10, не может быть использован в качестве региональной поверхности отсчета. Условия, изображенные на фиг. 11, очень типичны для дельтовой обстановки осадконакопления, однако они показаны в слишком упрощенном виде. Обычно бывают развиты покрывающие, передовые и подстилающие слои. Однако в прибрежно-морских условиях ни один из них, по-видимому, не отложился бы при столь больших углах наклона поверхности осадконакопления, какие показаны на фиг. 11; особенно велики углы падения передовых пластов. Крутопадающие передовые слои образуются только в очень специфических условиях, которые обсуждаются и иллюстрируются в разделе о дельтах.

Нижняя часть фиг. 12 представляет собой вдвое увеличенное изображение фиг. 11. Оно приведено для того, чтобы показать некоторые трудности, с которыми обычно сталкивается стратиграф при сопоставлении каротажных диаграмм различных скважин. Например, три пробуренные скважины вскрыли резко отличающиеся друг от друга, но тем не менее генетически связанные между собой пачки осадочных пород. Скважина А вскрыла преимущественно континентальные слои, ниже которых залегает гораздо менее мощ-



Ф и г. 12. Три стадии осадконакопления.

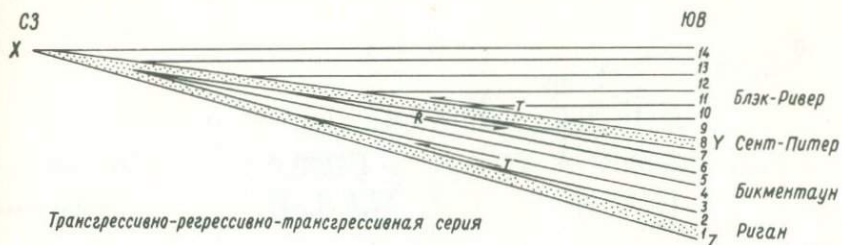
a — неподвижная поверхность осадконакопления с регрессирующей береговой линией; *b* — быстрое прогибание, скорость которого превосходит скорость поступления осадков, с трансгрессирующей береговой линией; *c* — неподвижная поверхность осадконакопления с регрессирующей береговой линией.

ная толща углей, подстилаемая морскими песчаниками. Скважиной *B* вскрыт более изменчивый разрез отложений с частично повторяющимися слоями. Скважина *C* пересекла преимущественно морские глины, в толще которых залегает тонкий слой морских песчаников. Реконструкция истории осадконакопления, как видно на профиле, позволяет представить себе формирование изображенного разреза отложений следующим образом: *a*) регрессивное осадконакопление в условиях неподвижного дна (табл. 2, *B*); *b*) прогибание бассейна со скоростью, превышающей скорость накопления осадков (*A.1.a*); *в*) регрессивное осадконакопление в условиях неподвижного дна (*B*).

ПРИМЕРЫ ФАЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ¹⁾

Трансгрессивно-регрессивный характер кембрийско-ордовиковой толщи пород, развитой в Аппалачской геосинклинали, был установлен еще Грабау [115]. На фиг. 13 изображен поперечный разрез этой толщи в направлении с северо-запада на юго-восток. Песчаники *X-Z* залегают трансгрессивно и являются эквивалентом песчаников Риган. Изохроны 1-5 (цифры справа) последовательно упираются в верхнюю поверхность песчаников Риган, подчеркивая трансгрессивный характер этой формации. Формация *X-Y* представлена песчаниками Сент-Питер, которые являются как регрес-

¹⁾Этот раздел написан по материалам Грабау [115].



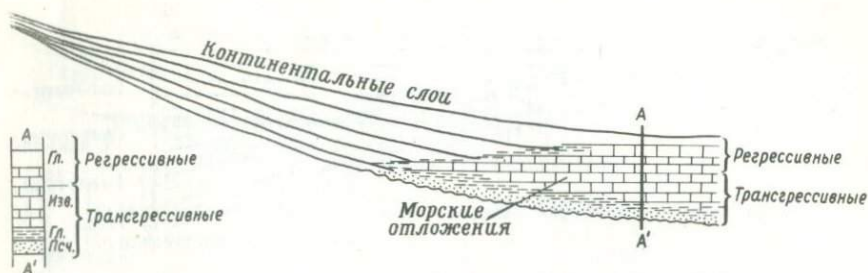
Ф и г. 13. Схематический поперечный разрез кембрийско-ордовикской толщи, развитой в Аппалачской геосинклинали [115 с изменениями].

Песчаник Риган трансгрессивный, тогда как песчаник Сент-Питер как регрессивный, так и трансгрессивный. Изохроны 1 - 8 параллельны друг другу, но не параллельны изохронам 9 - 14.

сивными, так и трансгрессивными по происхождению. На регрессивное залегание песчаников указывает то, что изохроны 6 и 7 последовательно упираются в основание этих песчаников. Между песчаниками Риган и Сент-Питер залегают доломиты Бикментаун, которые отлагались как в трансгрессивных, так и регрессивных условиях. Песчаник Сент-Питер (X - Y) перекрыт карбонатными породами Блэк-Ривер, представляющими собой трансгрессивную толщу, мощность которой уменьшается по направлению к северо-западу. То обстоятельство, что изохроны 9 - 14 последовательно упираются в верхнюю поверхность песчаников Сент-Питер, свидетельствует о трансгрессивном характере не только верхней части этих песчаников, но также и карбонатных пород Блэк-Ривер. В песчаниках Сент-Питер (X - Y) должна иметься внутриформационная поверхность несогласия, поскольку они формировались сначала в регрессивных, а затем трансгрессивных условиях. Возможно, что большая часть песчаников Сент-Питер, отложившихся в период регрессии, была эродирована до начала отложения осадков трансгрессивной фазы. Четко выраженная поверхность несогласия в кровле толщи Бикментаун, установленная в штате Огайо, могла быть следствием этой эрозии. Калверт [46, 47] наглядно продемонстрировал, что толща Бикментаун постепенно срезается в северо-западном направлении по мере того, как постепенно исчезают доломиты Чепултелек и Колпер-Ридж.

Изохроны 9 - 14 параллельны между собой, но не параллельны изохронам толщи Y - Z (2 - 7). Отсутствие параллелизма между двумя группами изохрон свидетельствуют о том, что эти две толщи явно отличаются друг от друга по своему происхождению.

В том случае, если регрессивная часть разреза (изохроны 6 - 8) отделена от толщи Y - Z, становится очевидным наличие третьей,



Ф и г. 14. Толща, представленная сочетанием трансгрессивных и регрессивных морских песчаников, глин и известняков и перекрытая регрессивными континентальными слоями [115 с изменениями].

отличной по своему генезису группы слоев. Из фиг. 13 должно быть ясно, что для детального стратиграфического анализа кембрийско-ордовикской толщи Аппалачской геосинклинали необходимо расчленить ее на отчетливые, генетически связанные между собой группы слоев.

Фиг. 14 представляет собой схематический поперечный разрез толщи, сложенной морскими и неморскими отложениями [115]. Базальные морские песчаники в правой половине разреза имеют трансгрессивный характер. Они перекрыты маломощным чехлом морских глин, над которыми залегают морские известняки. Все три литологических типа пород отлагались в море, которое трансгрессировало до тех пор, пока береговая линия не достигла района, расположенного в средней части рисунка. В это время в результате воздымания источника сноса (слева на фиг. 14) началось обильное накопление континентальных осадков, которое шло вдоль окраинных частей морского залива, а также ближе к внутренней части моря. Таким образом, регрессия береговой линии была вызвана либо тем, что скорость поступления осадков превышала скорость прогибания бассейна, либо тем, что обильное поступление осадков происходило в условиях постепенного воздымания. Или регрессия проходила столь быстро, что песок, отсортированный волнами, не успевал образовывать регрессивный песчаный покров, или в районе, примыкающим к заливу, количество песчаного материала было недостаточным для того, чтобы он подвергся переработке и сортировке.

Глава 3

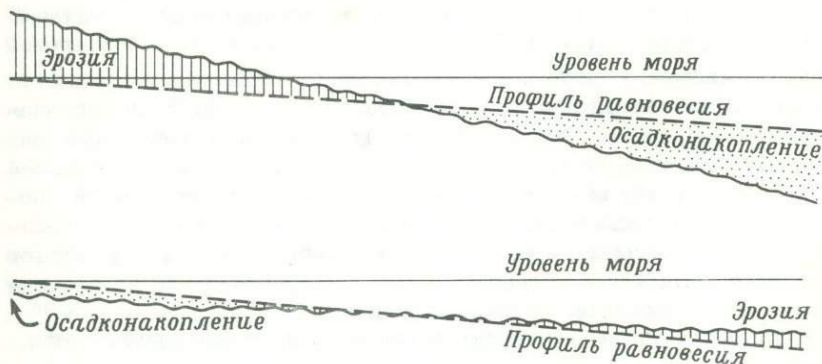
ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ КОНЦЕПЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ОСАДКАМ ПРИБРЕЖНО-МОРСКОЙ ЗОНЫ

ПРОФИЛИ РАВНОВЕСИЯ

На фиг. 1–10 показаны линии, разделяющие зоны развития песков и илов. Ранее указывалось, что эти линии определяют максимальную глубину действия волн. Они также определяют глубину, выше которой осаждаются прибрежно-морские пески, а ниже – алевриты и глины. Сила действия волн варьирует в широких пределах. Данбар и Роджерс [73] указывали, что "при тихой погоде глубина действия волн почти равна нулю, тогда как в сильные штормы волны проникают до глубины 100 м и более. Глубина воздействия волн меняется изо дня в день в зависимости от штормов, а также от сезона к сезону в процессе смены погоды. Меняются также и течения, возникающие в результате действия ветров; с изменением направления ветров обычно меняются направления течений". Все это приводит к тому, что положение линии, разделяющей зоны развития песков и илов, меняется по вертикали. Лозе [185] указывал на то, что главным фактором, определяющим возникновение течений и поверхностных волн и вызывающим перемещение береговой линии в северо-западной части Мексиканского залива, является дующий вблизи поверхности земли ветер. Он различал "...преобладающие (prevailing) ветры, которые дуют большую часть времени, и господствующие (predominant) ветры, обладающие большей энергией и обычно выполняющие больший объем геологической работы". В юго-западной части Техаса господствующие ветры посредством возникающих в результате их действия волн распределяют осадочный материал и определяют форму "...заливов, лагун, береговых валов, проливов и песчаных покровов".

Береговые склоны имеют не одинаковую крутизну; кроме того, они не везде бывают ровными. В идеальных условиях по склону переносится ровно столько же материала, сколько его поступает к берегу. В этом случае не происходит преимущественного переноса обломков пород ни в сторону суши, ни в сторону моря (исключение составляет лишь находящийся во взвешенном состоянии алевритистый и глинистый материал), вследствие чего поддерживается профиль равновесия. Фон Энглен и Кастер [283] указывали на то,

что профиль равновесия не может сформироваться сразу же после окончания воздымания или прогибания прибрежной равнины. Обращенный к внутренней части бассейна склон может быть либо слишком пологим, либо слишком крутым. Если он слишком пологий, в результате совместного действия волн и приливов происходит размыв донных осадков и их перенос в направлении к суше, как показано в нижней половине фиг. 15. Таким образом, вследствие отложения осадков вблизи и непосредственно у береговой линии пляж расширяется в сторону моря. Здесь мы имеем дело с регрессией береговой линии, не зависящей ни от скорости воздымания или погружения берега, ни от скорости поступления осадков. Если обращенный к морю склон слишком крут, чтобы мог образоваться профиль равновесия, тогда происходит размыв берега и формируется волноприбойная терраса, а размывтый материал переносится в сторону моря и осаждается, как показано в верхней половине фиг. 15. С того момента как образовался профиль равновесия, независимо от того, какой из изображенных на фигуре вариантов при этом имел место, не происходит ни заметной эрозии осадков, ни их отложения. Равновесные условия редко сохраняются на протяжении длительного периода времени, из-за значительных изменений энергии волн в периоды между штормами и относительно спокойной погодой и сезонных изменений силы ветра. В сущности можно только удивляться тому, что при таких изменчивых условиях все-таки существует какая-то закономерность в осадконакоплении.



Ф и г. 15. Профили равновесия по фон Энглену и Кастеру [283].

Вверху: Первоначально крутопадающая поверхность (волнистая линия) впоследствии превратилась в более пологий склон. Внизу: Первоначально пологий склон (волнистая линия) стал более крутым.

ТОЛЩА НЕПРЕРЫВНОГО НАРАЩИВАНИЯ МОЩНОСТИ
И ГЕНЕТИЧЕСКИ ВЗАИМОСВЯЗАННАЯ ТОЛЩА

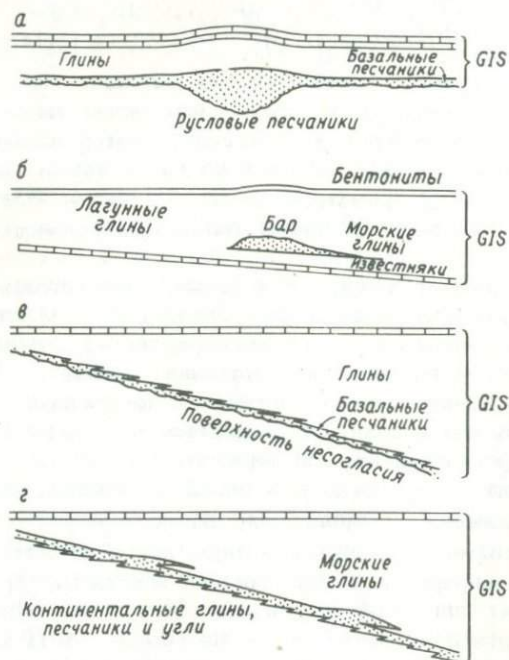
Из вышеизложенного с очевидностью вытекает, что существуют генетически связанные друг с другом ассоциации типов осадков, развитых в прибрежно-морской обстановке. Автор выделяет два типа таких ассоциаций [44]. Первый из них — толща непрерывного наращивания мощности (*genetic increment of strata — GIS*), а второй — генетически взаимосвязанная толща (*genetic sequence of strata — GSS*).

Под *GIS* понимается осадочная толща, представляющая собой один седиментационный цикл, в котором каждый литологический компонент генетически связан со всеми другими; верхней границей *GIS* могут быть синхронный маркирующий горизонт, поверхность несогласия или смена фаций от морских к неморским. Такая толща включает в себя все осадки, отложившиеся в течение одной стадии циклического прогибания или циклического воздымания. К *GIS* также можно отнести пачку осадочных пород, отложившихся в течение одной стадии постепенного прогибания или постепенного воздымания.

Под *GSS* понимается сочетание двух или большего количества смежных толщ непрерывного наращивания мощности, образовавшихся в процессе более или менее непрерывного процесса осадконакопления; угловых несогласий в *GSS* быть не может, тогда как стратиграфические несогласия ограниченного распространения могут иметь место.

Как для первой, так и для второй ассоциации отложений крайне важно понятие о временном литологическом маркирующем горизонте. Маркирующим горизонтом может быть тонкий пласт известняков, углей, бентонитов, черных глинистых сланцев или алевролитов. Самыми надежными считаются маркирующие горизонты, сложенные бентонитами. Мощность толщи глин, залегающей между двумя маркирующими горизонтами, в пределах ограниченного участка обычно бывает очень постоянной. В региональном плане в направлении к внутренним частям бассейна обычно происходит расхождение маркирующих пластов. Резкое изменение расстояния между маркирующими горизонтами обычно обусловлено фациальными изменениями, наличием поверхностей несогласия или сбросов нарастания (*growth fault*). Причем, прежде чем использовать понятия *GIS* и *GSS*, необходимо ясно себе представить значение каждого из перечисленных факторов. Графически *GIS* изображается в виде особого типа карты изопакит ограниченного интервала отложений, а *GSS* — в виде специального типа карты изопакит большого интервала отложений.

Основное понятие о *GIS* и *GSS* относится не только к песчанникам и глинам; его можно также применить и к карбонатно-эвапоритово-глинистым толщам. На фиг. 16 в схематическом виде



Ф и г. 16. Схематическое изображение толщи непрерывного наращивания мощности GIS [44].

а — русловые и покровные песчаники, перекрытые глинами и известняками; верхняя граница GIS проводится по временному литологическому маркирующему горизонту, а нижняя — по поверхности несогласия; *б* — песчаный бар с одной стороны ограничен глинами лагунного происхождения, а с другой — морскими глинами; верхняя и нижняя границы GIS проводятся по литологическим временным маркирующим пластам (бентонит и известняк); *в* — покровный песчаник, образовавшийся в процессе циклического прогибания, перекрыт толщей морских глин увеличивающейся в мощности в сторону внутренней части бассейна; верхняя граница GIS проводится по литологическому маркирующему горизонту, а нижняя — по поверхности несогласия; *г* — покровный песчаник в двух участках, характеризующих стабильное положение древней береговой линии, имеет увеличенную мощность; верхняя граница GIS проводится по литологическому маркирующему пласти, а нижняя — по изменению фаций от континентальных к морским.

приведены три примера GIS. На фиг. 16, *а* GIS сверху ограничена пластами известняков, а снизу — поверхностью несогласия. Русловой песчаник не принадлежит к песчаникам заполнения; нижние три четверти песчаного тела эквивалентны по времени своего образования непосредственно примыкающим к нему глинам. Это пример одновременно отлагающихся илов и русловых песков. Практическое

значение представленной на фиг. 16, а *GIS* состоит в том, что она свидетельствует о последовательном увеличении мощности в сторону внутренней части бассейна. Большинство песчаных тел простирается в направлении увеличения их мощности. Изопахиты песчаника приблизительно параллельны простиранию палеобереговой линии, у которой происходило осадконакопление.

Палеоуклон русла определяется путем построения карты изопахит интервала между основанием песчаника и верхним (маркирующим горизонтом) известняком. Эти два условных горизонта последовательно расходятся, причем степень их расхождения приблизительно отвечает уклону первичной долины потока.

Песчаник, показанный на фиг. 16, б, отличается по своему происхождению от песчаника, изображенного на фиг. 16, а. Это песчаное тело, образовавшееся в море на удалении от берега, простирается почти параллельно береговой линии. Нижняя граница *GIS* представлена маломощным пластом известняка, а верхняя — маломощным пластом бентонита. Карта изопахит этой *GIS* показывает, что эти пласты расходятся в направлении слева направо. Параллельно простиранию изопахит либо развивается подобие террасы, либо протягивается зона увеличенной мощности *GIS*. Такая зона может возникнуть из-за более слабой уплотняемости барового песчаника по сравнению с вмещающими его глинами. Положение и простирание этого песчаного бара можно установить, определив путем картирования изменение мощности лагунных и морских глин. Для прослеживания песчаного тела пользуются оправдавшим себя методом построения карты изопахит уменьшающейся в мощности глинистой толщи, которая залегает над самой мощной частью песчаника. Этот метод рекомендуется применять в тех районах, где заборы большинства продуктивных нефтяных и газовых скважин не дошли до водо-нефтяного контакта и лишь немногие из них вскрыли *GIS* на полную мощность.

Другой идеализированный тип *GIS* показан на фиг. 16, в. Здесь *GIS*, верхняя граница которой представлена маломощным слоем известняка, а нижняя — поверхностью несогласия, сложена мощной выклинивающейся пачкой глинистых сланцев и базальным покровом песчаника. Изохроны параллельны пласту известняка, залегающему в кровле, и пересекаются покровным песчаником. Карта изопахит этой *GIS* дает приблизительное представление о палеорельефе расположенной в основании поверхности несогласия. Описанный метод картирования полезен при прослеживании палеотрендов пляжевых песчаников в тех районах, где отдельные тела песчаников изолированы и расположены кулисообразно по отношению друг к другу вследствие имевшего место циклического прогибания.

На фиг. 16, г приведена *GIS*, нижняя граница которой проводится по смене континентальных отложений морскими. Ни поверхности

несогласия, ни временного литологического горизонта в основании *GIS* не наблюдается. На фиг. 17 показана взаимосвязь *GIS* и *GSS*. Здесь *GSS* включает в себя три разных типа *GIS*. Самая верхняя *GIS* снизу и сверху ограничена маломощными маркирующими пластами известняков и сложена преимущественно глинами. Средняя *GIS* ограничена подобным же образом, однако она содержит слой песчаников, который внизу переходит в рустоподобные песчаники. Самая нижняя *GIS* сверху ограничена маркирующим пластом, а снизу — поверхностью несогласия. В направлении к внутренней части бассейна (вправо) эта поверхность несогласия исчезает, а в основании *GIS* залегает маркирующий пласт.

Основное значение понятия *GSS* состоит в том, что им можно воспользоваться для реконструкции контура палеобассейна осадконакопления. Большинство осадочных бассейнов столь велики по своим размерам, что интерес может представлять лишь какой-то один сегмент в их пределах. Карта изопахит *GSS* дает возможность установить: 1) форму бассейна, 2) палеотренды осадконакопления и 3) положение шельфовой зоны, шарнирной линии и менее стабильных районов бассейна. Этот тип карты изопахит можно строить, используя контрольные замеры, редко разбросанные на обширной территории. Такая карта имеет существенное значение в период предварительных исследований и выяснения характера стратиграфического разреза и строения отдельных участков осадочных бассейнов на ранней стадии поисково-разведочных работ. Изучение же *GIS* обычно наиболее целесообразно проводить при детальном исследовании отдельных тел песчаников. Значение шельфовых условий для аккумуляции песчаников, которые могут служить коллекторами, рассматривается Уэйричем [288].

Три нижние стратиграфические пачки, показанные на фиг. 17, по отдельности не представляют собой *GIS*, и в то же время все



Ф и г. 17. Взаимоотношение между генетически взаимосвязанной толщей (*GSS*) и толщей непрерывного наращивания мощности (*GIS*) [44].

вместе они не образуют GSS в районе, где их кровлей служит поверхность несогласия. Однако в направлении к внутренним частям бассейна, на удалении от поверхности несогласия, их уже можно рассматривать как три GIS и как одну GSS.

ПЛЯЖЕВАЯ ОБСТАНОВКА ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

В условиях пляжевой обстановки осадконакопления образуется несколько важных типов песчаников-коллекторов. Однако, прежде чем приступить к их рассмотрению, следует осветить общие аспекты проблемы условий осадконакопления на современных пляжах. Коллегия по эрозии пляжей корпуса армейских инженеров США опубликовала несколько важных работ в области современных пляжей. На фиг. 18 в схематическом виде показаны основные компоненты пляжевой обстановки по Данбару и Роджерсу [73].

Типичный пляж подразделяется на относительно сглаженную наклонную *фронтальную часть берега* (foreshore), которая протягивается от зоны самого низкого уровня отливных вод до обычно хорошо видимого уступа в склоне, называемого *бермом* (bemb), расположенного примерно на нормальном уровне высокой воды, и более неровную, но относительно горизонтальную *тыловую часть берега* (backshore), протягивающуюся от тыловой части берма до самой дальней точки, куда доходят волны, которая в естественных условиях обычно представляет собой либо основание волноприбойного утеса или уступа, либо кромку пляжевого гребня, либо линию развития песчаных дюн. Бермы формируются в основном в период штормов, причем чем сильнее шторм, тем более высоким и ярче выраженным становится берм; действительно, если на пляж неоднократно налетали штормы, сила которых с каждым разом становилась все меньше и меньше, то там могло образоваться несколько бермов, хотя те из них, которые занимают самое низкое положение, могли быть разрушены следующим сильным штормом. Фронтальный участок берма обычно в свою очередь можно подразделить на верхнюю часть, которая характеризуется сглаженным профилем, и нижнюю, имеющую изломанный профиль, поскольку здесь развиты



Ф и г. 18. Схематическое изображение пляжа и его составных частей по Данбару и Роджерсу [73]; вертикальный масштаб больше горизонтального.

бары, сформировавшиеся в результате действия прибойя при высоком стоянии приливных вод; такие же бары могут быть развиты и ниже уровня вод, устанавливавшегося во время отлива, причем внешняя граница фронтальной части берега не всегда непрерывна. Также как и в примере с бермами, наиболее сильные штормы формируют самые большие и наиболее выдвинутые в море бары, разрушая ранее образовавшиеся; позднее более слабые штормы или прибойные волны относительно постоянной величины могут сформировать (еще дальше в глубь моря) меньшие по размерам бары; таким образом, в одном месяце на пляже может быть один бар, а в другом — три или четыре.

За исключением участков развития баров, склон фронтальной части берега характеризуется незначительной кривизной и несколько вогнутым кверху профилем, который, выполаживаясь в сторону моря, переходит в шельф. Характер склона фронтальной части берега зависит от ряда факторов; в целом склон круче, если слагающие его осадки более грубозернисты, если берег полностью открыт воздействию океанских волн, если в море бывают сильные штормы (непосредственно после шторма склон становится круче) и, возможно, если уровень прилива высокий и при этом не формируются приливо-отливные равнины. Профиль склона, очевидно, совсем не зависит от характера рельефа суши, и он значительно круче, чем наклон большинства равнин и континентальных шельфов, а следовательно, если в результате изменения уровня моря береговая линия доходит до такой равнины или шельфа, волны, разбиваясь, разрушают и намывают берег до тех пор, пока не сформируется надлежащий профиль пляжа. Таким образом, образуется береговой вал, перед которым располагается подвергшаяся размыву зона, а сзади — лагуна или соленый марш. Эта несколько более крутая часть берега по сравнению со всем его профилем в целом называется *предфронтальной зоной пляжа* (shore face).

Такой пляж сложен преимущественно песчаным материалом. Более тонкозернистый материал вымывается волнами и переносится на большие глубины или в защищенные от моря бухты и лагуны; материал размером с гальку, за исключением сломанных раковин, которые быстро истираются, редко встречается на низких участках побережья. Любое волнение моря способствует сортировке зерен, при этом зерна соответствующих размеров осаждаются на определенных участках пляжа; однако при смене штормовой погоды спокойной на смежных участках обычно можно встретить довольно сильно различающиеся по размерам зерна, и в этом случае сортированность материала в целом лишь умеренная. Как правило, в пределах пляжа скапливаются зерна более устойчивых минералов, прежде всего кварца, однако бывают и многочисленные исключения из

этого правила, когда неустойчивые минералы обычны или даже преобладают над другими, например в тех случаях, когда волны относительно слабые или производили работу лишь в течение короткого периода времени, а также на участках, куда кварц практически не поступал из источников сноса. На многих островах Тихого океана кварцсодержащие породы отсутствуют и поэтому пляжевые отложения состоят из зерен кальцита и арагонита, многочисленных обломков раковин и панцирей фораминифер, а также обломков базальтов и зерен авгита и оливина. Зерна очень устойчивых к разрушению минералов, например илемнита, магнетита и циркона, обычно отсортированы от зерен кварца и других более легких минералов и образуют отдельные слои. В юго-восточной части Атлантического побережья США, в особенности на древних пляжах, в настоящее время значительно приподнятых над уровнем моря, таким путем сформировались промышленные залежи циркона и монацита. Более крупные песчаные зерна могут быть хорошо окатанными, однако можно привести также много примеров, являющихся исключением из этого правила. В больших количествах могут присутствовать раковины, и некоторые пляжи могут быть целиком сложены обломками раковин, однако окончательно сформировавшиеся пляжевые отложения, представленные обычными кварцевыми песками, относительно редко содержат остатки организмов.

Стратификации пляжевых отложений посвящен ряд исследований, среди которых особого внимания заслуживают работы Томпсона [260] и Мак-Ки [194]. Характер напластования отложений пляжа меняется от одной его части к другой. Для верхней части фронтальной зоны характерно наиболее закономерное напластование: протяженные, выдержанные по мощности слои перемежаются с падающими под небольшим углом диагонально залегающими слоями, образующими колосовидную текстуру. Слои в общем наклонены под различными углами в сторону моря; выдержанность и параллельность слоев особенно четко проявляются в разрезах, параллельных береговой линии, если пляж не имеет выступов. Нижняя часть фронтального участка побережья с развитыми в ее пределах береговыми валами характеризуется гораздо более ярко выраженной косой слоистостью; наличием тел заполнения с косой слоистостью, падающей как в сторону моря, так и суши. Отложения тыловой части побережья характеризуются наиболее неправильным напластованием; здесь, как и в верхней части фронтальной зоны пляжа, преобладает пологая выдержанная косая слоистость, но также наблюдаются слоистые текстуры заполнения и участки развития сильно перемешанных песков, а местами могут встречаться даже линзы алевролитов или глин. Падение косослоистых пачек различное, но большая их часть наклонена в сторону суши.

Если в результате воздействия вдольбереговых течений или вследствие каких-либо других причин на пляж поступает обломочный материал, склон фронтальной части пляжа не меняет своей формы, в то время как с выдвиганием пляжа в море его тыловая часть расширяется. По мере того как обращенные к суше участки тыловой зоны пляжа становятся недоступными для действия волн даже в период штормов, параллельно берегу формируются пляжевые гряды, положение которых фиксирует стадии последовательного продвижения пляжа. Если потоки приносят с суши большое количество обломочных материалов, а сила волн достаточно велика, чтобы сформировалась дельта, может образоваться пояс пляжевых гряд, а между ними могут остаться небольшие береговые озера или болота. Если гряды сложены не галькой, главным фактором их формирования является ветер и они превращаются в песчаные дюны, образующие зону сзади пляжа. Если песок поступает в большом количестве, песчаные дюны могут мигрировать в сторону суши и засыпать древние лагуны, пойменные отложения и все, что окажется на их пути.

Такие песчаные дюны не очень отличаются от дюн пустынь, за исключением того, что их распространение ограничено зоной, примыкающей к пляжу со стороны суши. Песок дюн обычно гораздо лучше сортирован, чем песок пляжей, а его зерна заметно окатаны, что, возможно, в равной степени объясняется как тем, что именно окатанные зерна ветер переносит из тыловой части берега, так и тем, что эти зерна истирались при переносе.

Как правило отложения дюн характеризуются ярко выраженной клиновидной косою слоистостью. Встречающиеся среди них линзы алевроита, глины и даже торфа свидетельствуют о том, что дюны погребли под собой лагуны, межгрядовые озера и болота.

Глава 4

ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ПЛЯЖЕВЫХ ПЕСКОВ

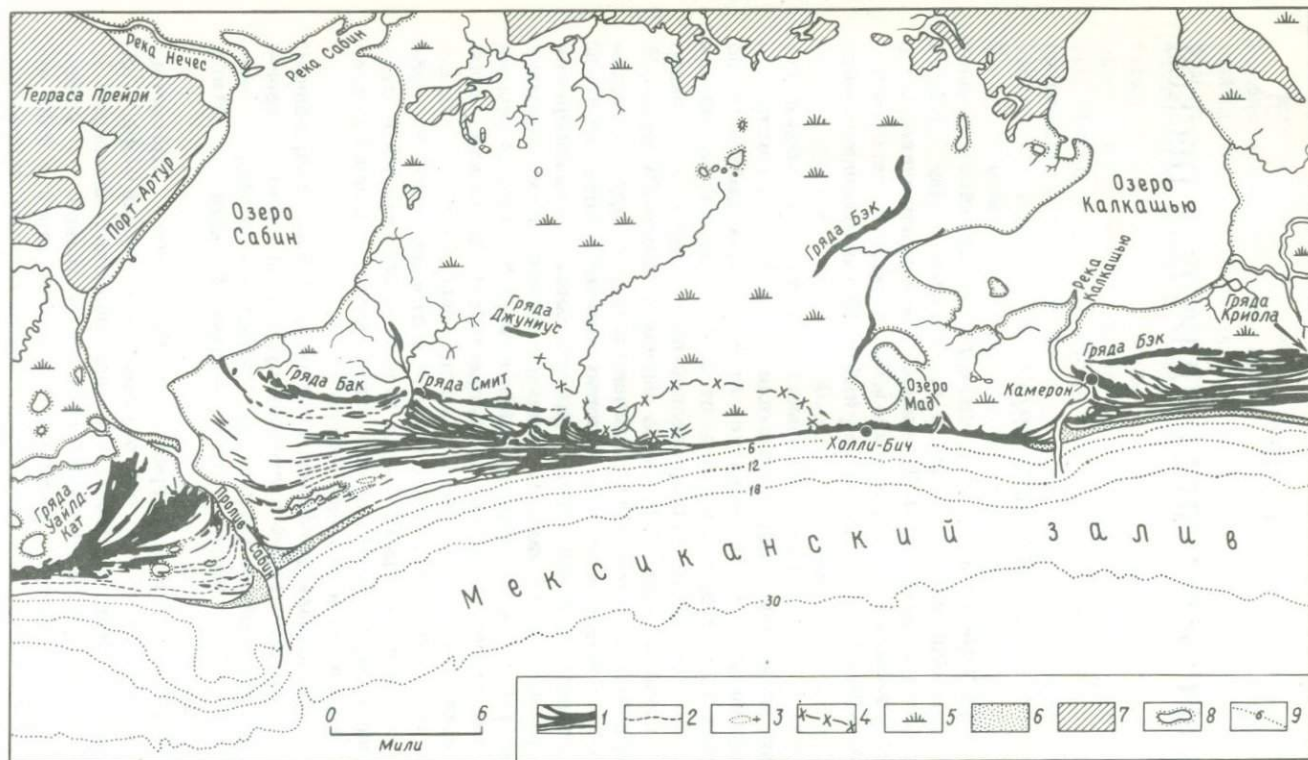
НИЗКИЕ ГРЯДЫ

Общая характеристика. Низкие гряды, называемые ченьерами, впервые были описаны в 1935 г. Расселом и Хау [232] в прибрежной части юго-западной Луизианы. Позднее они описывались Фиском [89], Фиском и Мак-Фарланом [93], Берном и др. [45], Гулдом и Мак-Фарланом [112]. Берн и др. [45] определили ченьеры, как

"... длинные низкие гряды, которые, воздымаясь над болотами, образуют единственно возможные для обитания места в пределах равнины. Их высота варьирует от нескольких дюймов до более чем 10 футов, мощность — от 2 до 15 футов, а ширина — от 100 до 1500 футов; средний по размерам ченьер имеет мощность около 7 футов, а ширину — около 600 футов. В ряде районов отдельные гряды сливаются друг с другом, образуя сложные ченьеры, ширина которых местами достигает 3000 футов. Отдельные низкие гряды протягиваются вдоль побережья на расстояние до 30 миль. В поперечном сечении их передний склон крутой, а склон, обращенный к суше, — пологий. В плане они обычно имеют несколько вогнутую в сторону залива форму, за исключением тех случаев, когда расположены вблизи рек или бухт, где резко поворачивают в сторону суши. В районах развития дельт гряды имеют неровный обращенный в сторону суши край, который заметно отличается от плавного контура, обращенного в сторону берега".

На фиг. 19 и 20 показан ветвящийся характер низких гряд; вблизи устьев потоков их обращенный в сторону суши край имеет извилистую форму. Приведенные фигуры свидетельствуют о том, что ширина района развития низких гряд юго-западной части штата Луизиана составляет 16 км.

Основания отдельных низких гряд могут быть либо плоскими, либо выпуклыми книзу; обычно они опущены ниже уровня моря на несколько футов вследствие уплотнения подстилающих алевроитов и глин. Верхняя часть фиг. 21 иллюстрирует форму низкой гряды (Пекан-Айленд) в поперечном разрезе. В пределах одной и той же равнины некоторые из низких гряд могут иметь плоское основание,



Ф и г. 19. Равнина, в пределах которой развиты низкие гряды, штат Луизиана (правая часть этой схемы приведена на фиг. 20) [45].

1 — низкие гряды пляжей (ченьеры); 2 — простираение береговой линии, прослеженное по аэрофотосъемке; 3 — устричные рифы и устьевые бары; 4 — древние русла потоков; 5 — марши; 6 — низины; 7 — терраса Преири; 8 — озера; 9 — изобаты залива в футах.

тогда как у других оно выпуклое, как показано в нижней части фиг. 21. Все низкие гряды, взятые вместе, составляют лишь небольшой процент от общей массы осадков, которые сформировались в пределах равнины поверх зоны окисленных почв. Как правило, низкие гряды встречаются не в одиночку, а в сложном сочетании друг с другом, будучи приуроченными приблизительно к одному и тому же стратиграфическому уровню; эта особенность является важной для их выявления на глубине.

Низкие гряды сложены главным образом песком и раковинами, тогда как алеврит и глина представлены в незначительных количествах. Берн и др. [45] писали, что "раковины, которые составляют 22% всех отложений, встречаются как в виде отчетливых слоев мощностью до нескольких дюймов, так и в виде обломков, рассеянных в песчанике".

Происхождение низких гряд. По имеющимся наблюдениям низкие гряды могут развиваться при соблюдении следующих пяти условий:

1. Расположенная на низком уровне маршевидная или болотистая прибрежная равнина должна примыкать к дельте реки, которая переносит большое количество осадков.

2. Необходимо наличие вдольбереговых течений, которые выносят дельтовые осадки (привнесенные с суши) на граничную с дельтой прибрежную равнину.

3. Периоды обильного поступления тонкозернистых осадков (которые формируют илистые отмели) должны чередоваться с периодами небольшого поступления осадков (в течение которых образуются пляжевые гряды, или ченьеры).

4. Глины и алевриты должны преобладать над песками.

5. Сила накатывающихся на берег волн должна быть умеренной.

Гулд и Морган [113] указывали, что

"... чередование периодов формирования прибрежных построек с периодами относительной стабильности побережья отражает пульсирующий характер привноса рекой Миссисипи осадков, которые транспортировались в район действия вдольбереговых течений. Такой пульсирующий характер поступления осадков не является следствием изменения количества переносимого рекой Миссисипи материала, а связан со значительными латеральными смещениями устья в период формирования дельтовой равнины. Когда река выносила свои воды в пределах западной части дельтовой равнины, происходил быстрый намыв осадков, в периоды после смещения устья в восточном направлении побережье находилось в стабильном состоянии, а местами осадки смывались".

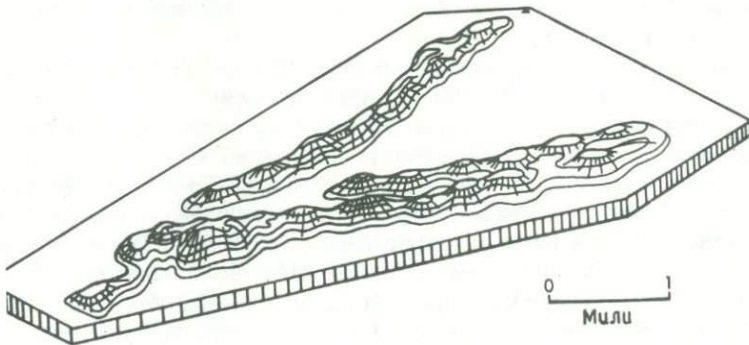
Из вышеприведенного описания низких гряд, развитых вдоль юго-западного побережья штата Луизиана, ясно видно, что этот тип

реликтовых пляжевых песчаников имеет важное значение как потенциальный коллектор. Низкие гряды генетически связаны с дельтовой обстановкой осадконакопления. Другими районами, где известны низкие гряды, являются окрестности дельты реки Ориноко (Суринам и Французская Гвиана) и участки, примыкающие к рекам Амазонка и Сан-Франсиску в Бразилии. Полагают также, что они могут быть распространены в районах прилегающих к дельтам рек Рона (Франция) и По (Италия), а также вдоль Венесуэльского залива.

Несмотря на то что высота низких гряд, развитых вдоль прибрежной части юго-западной Луизианы, редко превышает 4,6 м, она может быть и больше в зависимости от таких факторов, как количество поступающего песка и ракушняка, интенсивность действия волн и вдольбереговых течений. Высота современных низких гряд в районе, примыкающем к дельте реки Сан-Франсиску в северо-восточной Бразилии (Х. Чейвс, 1967 г. устное сообщение, Салвадор, Бразилия), составляет более 12 м. Предполагается, что такая же высота характерна и для их древних аналогов.

Низкие гряды, развитые на глубине, можно спутать с прибрежными барами, так как и те и другие отлагались параллельно береговой линии, могут иметь в разрезе плоско-выпуклую форму и довольно сглаженные, обращенные к морю края. Однако, как уже указывалось, низкие гряды образуют группы на одном и том же стратиграфическом уровне. Кроме того, в плане они обычно уже, чем бары, и более резко уменьшаются в мощности в сторону внутренних частей бассейна. Низкие гряды формируются у береговой линии, тогда как бары обычно образуются на некотором расстоянии от нее, в пределах моря, и отделены от материка лагуной.

До последнего времени нефтяники почти не уделяли внимания поискам на глубине низких гряд, так как отсутствовала информация



Ф и г. 22. Возможный пример низкой гряды по Дилларду и др. [67].

Залежь Шанут, Канзас. Сечение изогипс 10 футов.

об этом типе песчаных тел. Ни в одном из стандартных учебников по нефтяной геологии низкие гряды не упоминаются ни в качестве реально существующих, ни в качестве возможных литолого-стратиграфических ловушек нефти и газа. Фиск [89] и Берн с соавторами [45] отмечали сходство низких гряд с определенными линзовидными песчаниками. Они упоминают залежь Шанут (фиг. 22) в юго-восточной части штата Канзас [67] в качестве возможного примера резервуара, приуроченного к древней низкой гряде. Песчаное тело, к которому приурочена эта залежь, имеет мощность более 12 м и несколько отличается от подобных ему современных низких гряд.

БАРЫ

Общая характеристика. Прибрежные бары, называемые также вдольбереговыми валами и барьерными островами, представляют собой вытянутые песчаные острова, сформировавшиеся параллельно берегу континента и отделенные от него обычно заболоченными лагунами. Если эти вытянутые песчаные тела прилегают к выступающей части континента и протягиваются через соседнюю с ней бухту, они называются устьевыми барями.

Системы морских баров особенно хорошо развиты в Северной Америке, вдоль Атлантического побережья и побережья Мексиканского залива, а также в Европе, вдоль южного берега Северного моря. Они обычно расчленяются узкими приливными заливами и имеют сглаженный, обращенный к морю край и неровную кромку со стороны лагуны. В районах значительного изменения уровня приливных вод сторона морского бара, обращенная к лагуне, может быть относительно прямой вследствие того, что она подверглась довольно ощутимому размыву приливно-отливными волнами. Вдольбереговые течения обычно существуют с обращенной к морю стороны бара и тем самым способствуют сохранению прямолинейности песчаного тела и его росту в длину.

Бернард и др. [25] следующим образом описывали характерные топографические особенности барьерных островов:

"... это низкие, параллельные друг другу, иногда изгибающиеся пляжевые гряды, косы, неглубокие понижения между пляжевыми гребнями, песчаные дюны различных типов, ныне действующие, и оставленные приливные протоки, приливные дельты и затопленные конусы выносов... Обращенная к заливу сторона большей части барьерных островов характеризуется наличием большого количества оставленных приливных протоков, или «проливов» которые расположены примерно под прямыми углами к длинной оси островов. Многие «проливы» ранее представляли собой пониженные участки между сросшимися изогнутыми косами, которые сформировались на оконечностях островов. Приливно-

отливные процессы и возникавшие в штормы размывающие течения способствовали тому, что большинство «проливов» оставалось открытыми. Осадки, слагающие эти острова, состоят главным образом из мелко- и тонкозернистых, хорошо сортированных песков и обломков раковин».

Вдоль обнаженной на поверхности части прибрежного бара простираются вытянутые пляжевые гребни, полого погружаясь в сторону суши и более круто в сторону моря. Максимальная высота таких гребней, развитых вдоль побережья Мексиканского залива, где они под действием ветров изменялись, приобретая форму холмообразных песчаных дюн, составляет около 3,6 м.

Как правило, бары встречаются в районах развития приливных протоков, дельт и затопленных конусов выноса. Бернард и др. [25] отмечали следующее:

«Приливные дельты распространены как на обращенных к морю, так и к заливу сторонах приливных протоков, которые пересекают или разделяют барьерные острова, бары, гигантские знаки ряби, песчаные равнины и марши. На наличие на обращенной к морю стороне приливных протоков отмелей, образовавшихся в результате процессов, проходящих в пределах приливных дельт, указывают буруны, которые возникают в море на некотором расстоянии от берега. Приливные дельты на обращенной к заливу стороне приливных протоков также являются причиной образования отмелей, однако в более защищенных от моря заливах их редко можно установить по бурунам.

Вслед за закрытием приливных протоков со стороны Мексиканского залива в результате намыва пляжа, предфронтальной зоны пляжа и руслового песка «дельта», расположенная на обращенной к морю стороне, впоследствии разрушается процессами морской эрозии; однако приливная дельта со стороны залива может периодически продолжать расти, что обусловлено отложением осадков, переносимых возникающими при штормах размывающими течениями, которые вновь временно вскрывают приливные протоки. На этой стадии развития большая часть дельтового участка появляется над поверхностью вод; она носит название намывной конус выноса».

Происхождение баров. Имеется много самых разнообразных теорий происхождения баров, или барьерных островов. Эли-де-Бомон в 1845 г. писал, что бары образуются под действием волн, размывающих донные осадки и вновь их переотлагающих. Гилберт [107] считал, что бары образовались исключительно в результате переноса и отложения осадков вдольбереговыми течениями. Д. Джонсон [146] связывал формирование всех баров с ранними стадиями воздымания прибрежной полосы. Он полагал, что осадконакопление на-

чинается в результате действия двух противоположных друг другу сил — набегающих волн и донного противотечения отступающих волн. Там, где волны драгируют дно, противодействующее им донное течение рассеивает их энергию, в результате чего волны проходят еще некоторое расстояние в направлении суши под косым углом. По мере того как в результате намыва отложений подводный бар растет по вертикали, действие вдольбереговых течений, образующихся при набегающих волн на берег под косым углом, приводит к удлинению бара в направлении, параллельном береговой линии. Джонсон считал, что дальнейший рост бара происходит из-за понижения уровня моря. Эванс [79] полагал, что морские бары являются следствием равновесного состояния волновой энергии и что ни выход береговой линии на поверхность, ни ее погружение не имеют какого-либо существенного значения для роста бара. Шепард [245] писал:

“Откатывающиеся волны вскапывают дно и образуют вдольбереговые желоба. Это приводит к тому, что находящийся во взвешенном состоянии материал переносится параллельно берегу течениями, которые поворачивают к морю и устремляются в разрывные каналы, образующие бреши в прибрежных барах. Некоторые из баров и желобов во время отлива обнажаются. Песок, который переносится за пределы баров, распространяется по склону берега вследствие расширения головной части возвратного течения. С этих участков склона осадки захватываются волнами, которые переносят их под своими гребнями обратно в сторону моря и намывают таким образом вдольбереговые бары за пределами желобов. Рост этих баров сдерживается глубиной, на которую откатываются волны и за пределами которой не происходит захвата песка”.

Достоверно установлено, что сильные штормы и ураганы могут полностью разрушить многие хорошо выраженные подводные бары.

Зенкович [295] предположил, что бары могут формироваться как вдоль затопляемого берега, так и вдоль берега, выходящего из под воды. Он упомянул о двух важных условиях, при которых вдоль затопленного берега формируются бары, — о существовании на побережье гребня и существовании подводного склона, более крутого по сравнению с общим наклоном суши сзади гребня. Такой уступ, по видимому, представляет собой бERM, который в период повышения уровня моря смещается в направлении суши по мере того, как волны перекатываются через его гребень. Одновременно он становится выше, поскольку на нем отлагаются осадки. Этот процесс продолжается до тех пор, пока происходит медленное поднятие уровня моря. Гилчер [121] также признавал, что прибрежные бары развиваются как вдоль затопляемых, так и выходящих из под воды

берегов. Он считал, что прибрежные бары обычно смещаются в сторону берега, однако, если при этом песчаное тело стремится заблокировать значительный по размерам поток, один или несколько узких каналов остаются открытыми.

Для изучения формы и структуры вдольбереговых баров и пляжей Мак-Ки и Стеррет [195] провели серию интересных и instructive лабораторных экспериментов. Они проводили свои опыты в 14-метровом резервуаре, в котором возбуждались волны. Было отмечено, что основные различия в первоначальной структуре и форме песчаного тела могут быть следствием изменения каждого из следующих переменных факторов: крутизны склона песчаного ложа, интенсивности воздействия волн и поступления песка. Мак-Ки и Стеррет отмечали следующее:

"Вдольбереговые бары образуются в зоне волнолома. На мелководье обычно возникают бары, выступающие из воды; при большой глубине вод формируется подводный бар, а при еще большей глубине бары вообще не образуются. С увеличением интенсивности действия волн бары начинают приближаться к пляжу и даже заходят на него. При более слабых волнах бары растут в высоту и образуют барьеры, за которыми на берегу располагаются лагуны. При обильном поступлении песка на обращенной к морю стороне растущего бара возникают условия, которые типичны для вдольбереговых и возвратных течений, в результате чего слои оказываются пологонаклоненными в сторону моря. В противоположность этому в условиях ограниченного поступления песка пластиы падают в сторону берега под более крутыми углами.

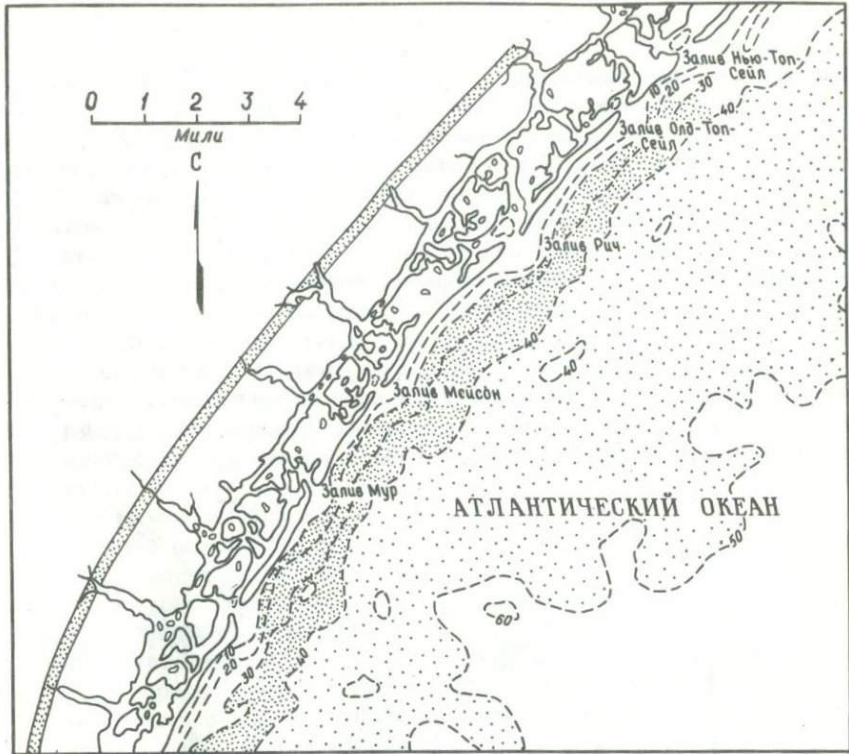
Толщи пляжевых отложений от сводовой части до точки, расположенной ниже водного зеркала, обычно полого погружаются в сторону моря. В пределах моря эти пологопадающие пластиы продолжают в виде фронтальных слоев, характеризующихся относительно крутым залеганием, что приводит к образованию прибрежной террасы. Если песок поступает в больших количествах, песчаное тело, состоящее из этих обоих серий слоев, наращивается в сторону моря. Однако на мелководье или при средних глубинах, там, где волны сильнее, рост пляжа прекращается после образования вдольбереговых баров, которые по мере их превращения в барьеры сводят на нет действие волн, в результате чего образуются лагуны. В условиях, при которых происходит формирование баров, рост пляжа и прибрежной террасы зависит от количества поступающего песка; соотношение между отложениями верхней части пляжа и фронтальными слоями определяется силой волн".

По-видимому, не существует единого мнения относительно происхождения баров. Однако ясно, что их формированию способствуют

вдольбереговые течения и волны. Более того, они могут формироваться как в условиях выхода береговой линии на поверхность, так и при ее погружении или неподвижном состоянии. Такие переменные факторы, как различное падение склона, на котором накапливаются осадки, интенсивность волновой энергии и поступление песка, непосредственно влияют на внутреннее строение и форму песчаного тела. По-видимому, именно из-за того, что формирование баров зависит от стольких факторов, трудно прийти к каким-либо общим выводам относительно их происхождения в разных районах.

Район Мидл-Саунд, залив Онслоу, Северная Каролина. Район Мидл-Саунд залива Онслоу изучался Миллером [196], который дал описание условий формирования вдольбереговых валов, считая, что это очень важно для изучения залегающих на глубине толщ. Согласно взглядам Миллера, прибрежная равнина Атлантического океана в этом районе представляет собой тектонически стабильную поверхность осадконакопления с регрессирующей в результате происходящего отложения осадков береговой линией. Однако Блантон [29] несогласен с этим положением. Он представил убедительные доказательства, что бары Мидл-Саунд сохранились в процессе погружения поверхности осадконакопления на 4,6 м. Блантон писал: "Это парадокс, что регрессивные осадки существуют в условиях трансгрессирующегося моря". Район Мидл-Саунд приурочен к участку, в пределах которого суточный подъем приливных вод составляет 76 см и находится в зоне действия вдольберегового течения северо-восточного направления. Барьерный бар параллелен береговой линии и состоит из серии узких, вытянутых островов шириной в среднем 320 м и максимальной высотой над уровнем моря 11-12 м (фиг. 23). Миллер [196] отмечал следующее:

"За исключением отложений, образовавшихся вблизи береговой линии, осадки характеризуются косой слоистостью типичного золотого типа, которая исключительно отчетливо выражена благодаря наличию прослоев, сложенных тяжелыми темноцветными минералами... Самый крутой склон бара (от одной седиментационной поверхности к другой) обращен к берегу, где бар ограничен лагуной. Обращенная к морю сторона бара спускается к пляжу под различными углами, образуя ряд низких террас. Приливные воды высотой 75 см сформировали пляж шириной около сотни метров, целиком сложенный чистым мелкозернистым и среднезернистым песком, ракушечником и обломками раковин. За небольшим исключением, отдельные слагающие пляж песчаные линзы падают в сторону моря (в направлении сноса материала). Развитые в отдельных участках прибрежной зоны извилистые каналы, ориентированные под прямым углом к береговой линии, создают систему пологих холмов и долин, раз-



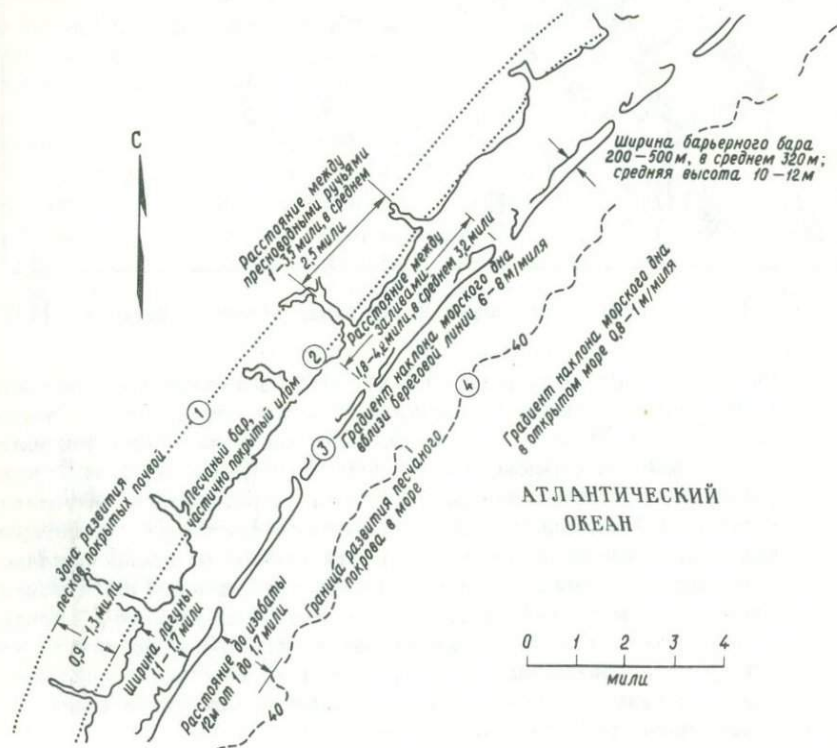
Ф и г. 23. Осадочные формы района Мидл-Саунд, Северная Каролина [196].

личающихся по высоте на 30–60 см... Заливообразные каналы, разделяющие острова барьерного бара друг от друга, имеют ширину 150–300 м; их дно сложено твердым спрессованным глинистым материалом, залегающим на глубине 3–5 м ниже уровня моря. Возможность отложения детритусового материала в каналах невелика, так как здесь почти постоянно действуют течения, которые прорываются в эти каналы во время приливов и отливов. Во время приливов поверхностные воды движутся по этим каналам со скоростью 16–24 км/ч (визуальное определение). Песок при этом скапливается дельтообразно как в части канала, обращенной к морю, так и на участке, примыкающем к лагуне, причем отложение песка происходит в связи с ослаблением силы течения потока”.

Миллер [196] отмечал, что пески, слагающие барьерные бары, уменьшаются в мощности и постепенно погружаются по направлению

к морю. Градиент падения поверхности осадконакопления в сторону моря меняется от 3,8 до 4,7 м/км на расстоянии 1,6–2,4 км, где глубина воды составляет около 12 м. В зоне, расположенной глубже 12 м, в основании маломощного песчаного покрова (несколько дюймов) залегает твердый глинистый слой. Песчаный покров имеет средний градиент падения 0,38–0,57 м/км и протягивается на много миль в море до глубины 15–18 м. Миллер утверждает, что этот песчаный покров, или "настил", существует временно; в конце концов он сохранится лишь там, где глубина воды менее 12 м. Он особенно обращал внимание на то, что "мощность 12 м (или глубина) часто встречается и что, по-видимому, это критическая мощность прибрежных и баровых отложений (см. [Бернард и др., 1961] и [179]), так же как и критическая глубина их формирования на протяжении всего геологического времени".

Размеры осадочных форм Мидл-Саунда приведены на фиг. 24, из которой ясно, что ширина лагуны изменяется от 1,8 до 2,7 км.



Ф и г. 24. Размеры осадочных форм района Мидл-Саунд, Северная Каролина, показанных на фиг. 23 [196].

В пределах территории Мидл-Саунд, за исключением каналов, соединяющих лагуны с морем (протоки), развиты в основном приливно-отливные илистые равнины и низкие, плосковерхие, густо покрытые растительностью острова. Острова сложены устричными рифами, покрытыми тонким покровом черного ила и поросшими маршевой травой и тростником. Основным типом осадков лагуны является черный органический ил. Вдоль склонов протоков наблюдаются изолированные друг от друга участки с маломощным песчаным покровом.

Миллер [196] утверждает, что положение и ширина части бара, которая расположена над уровнем моря, определяется профилем равновесия. Он писал:

"... в целом (и в пределах определенных границ), чем круче градиент погружения подводного склона, тем уже бар. Если градиент становится слишком крутым, бар не формируется, так как осадки распространяются латерально. Если градиент становится слишком малым, бар превращается в широкий плоский пляж, который наращивается в сторону моря... Формирование профиля равновесия в свою очередь зависит от количества и типа поступающего обломочного материала и способности течений и волн переносить обломочный материал. ... ураганы и другие мощные факторы... периодически изменяют характер залегающих отложений, однако в большинстве случаев течения главным образом направлены со стороны дельты к морю и затем от моря к барьерному бару. Фактически начальная и конечная стадии формирования каждой из наиболее выраженных осадочных форм, определяющие ее особенности, непосредственно связаны с изменениями положения уровня моря по отношению к речным дельтам".

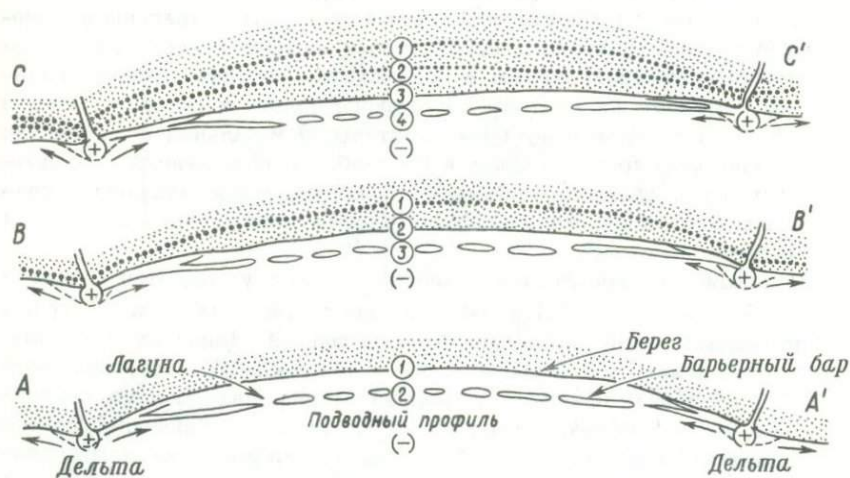
Положение и простирание развитых на берегу покрытых почвой гряд показано на фиг. 23 и 24. Миллер считает, что эти гряды представляют собой барьерные бары на ранней стадии их развития. Он предполагает, что барьерный бар в Мидл-Саунд сформировался "... в течение одной-единственной стадии, являющейся составной частью общего циклического процесса "скачкообразного смещения береговой линии", когда формирование каждого нового зрелого баро-лагунного комплекса отложений увеличивает зону берега за счет прибрежной равнины на 2,4 км (с приближением к дельтам рост береговой зоны постепенно уменьшается). Другими словами, на месте современного барьерного бара в прошлом существовали протягивающиеся в том же направлении бары, а в будущем на его месте будут формироваться другие барьерные бары..."

фиг. 25 и 26 представляют собой попытку изобразить графически стадии развития регрессивной серии барьерных баров. Знак



Ф и г. 25. Схематические поперечные разрезы, показывающие стадии формирования регрессивной толщи барьерного бара [196].

У.м. — уровень моря.



Ф и г. 26. Схема стадий развития регрессирующих береговых линий в плане [196].

"плюс" над дельтами, показанный на фиг. 26, обозначает чрезмерно обильное поступление осадков. В средней части бухты все еще не установился профиль равновесия, и поэтому там стоит знак "минус". Когда, наконец, в середине бухты устанавливается состояние

равновесия, "... в дельте начинает формироваться новый и более молодой бар и процесс повторяется".

Миллер хорошо знал, что его гипотеза многократного барообразования применима не для всех условий, существующих вдоль побережья, так как в процессе установления равновесных состояний играют роль всевозможные переменные факторы. Однако он воспользовался своими соображениями относительно условий, существующих в Мидл-Саунде на побережье Северной Каролины, для того, чтобы объяснить наличие сложных баров в толще песчаников Фолд-Ривер, распространенных вдоль восточного борта бассейна Паудер-Ривер в северо-восточной части штата Вайоминг [196].

Автор считает, что объяснение Миллера по поводу формирования сложных линз прибрежно-морских песков можно с успехом использовать при изучении развитых на глубине отложений. Примером могут служить песчаники Тонкава (пенсильваний) в северо-западной части штата Оклахома, включающие несколько линзовидных песчаных тел, которые отложились параллельно древней береговой линии и расположены по вертикали кулисообразно друг к другу. Между песчаными линзами залегают тонкие глинистые "прослойки". Сложный регрессивный характер строения бара, который легко устанавливается по данным детального электрокаротажа в пробуренной по профилю серии скважин, является единственно возможной причиной, объясняющей присутствие воды в скважинах, расположенных вверх по возмощанию от продуктивных скважин.

Барьерный остров Галвестон. Остров Галвестон, расположенный у Техасского побережья Мексиканского залива, представляет собой отличный пример бара. Некогда существовавшие пляжевые гряды и расположенные между ними пониженные участки, которые хорошо сохранились в центральной части острова, ясно свидетельствуют о том, что вследствие непрерывного поступления песка, приносимого вдольбереговыми течениями, остров увеличивался в сторону моря (фиг. 27). Его рост происходил в юго-западном направлении, т.е. в направлении переноса материала вдольбереговыми течениями, за счет приращивания к нему пляжевых кос, приливных протоков и приливных дельт. Возраст ракушечниковых слоев, залегающих в теле песчаника, определенным радиоуглеродным методом, ясно указывает на то, что этот барьерный остров рос в сторону моря. Уровень моря достиг своего теперешнего положения более чем 3500 лет назад, когда остров Галвестон представлял собой небольшой бар, располагавшийся примерно в 6,4 км от берега с юго-западной стороны от входа в Галвестонскую бухту. Совместные действия ветров, поверхностных течений и волн, которые, преломляясь у берега, образовали направленные на запад вдольбереговые течения, способствовали переносу к бару дополнительных объемов песка, в результате чего он превратился в барьерный



Ф и г. 27.

а — Остров Галвестон, Тенесское побережье Мексиканского залива; *б* — разрез по линии А — А' через остров Галвестон. Показан возраст ракушечниковых слоев, определенный радиоуглеродным методом [25].

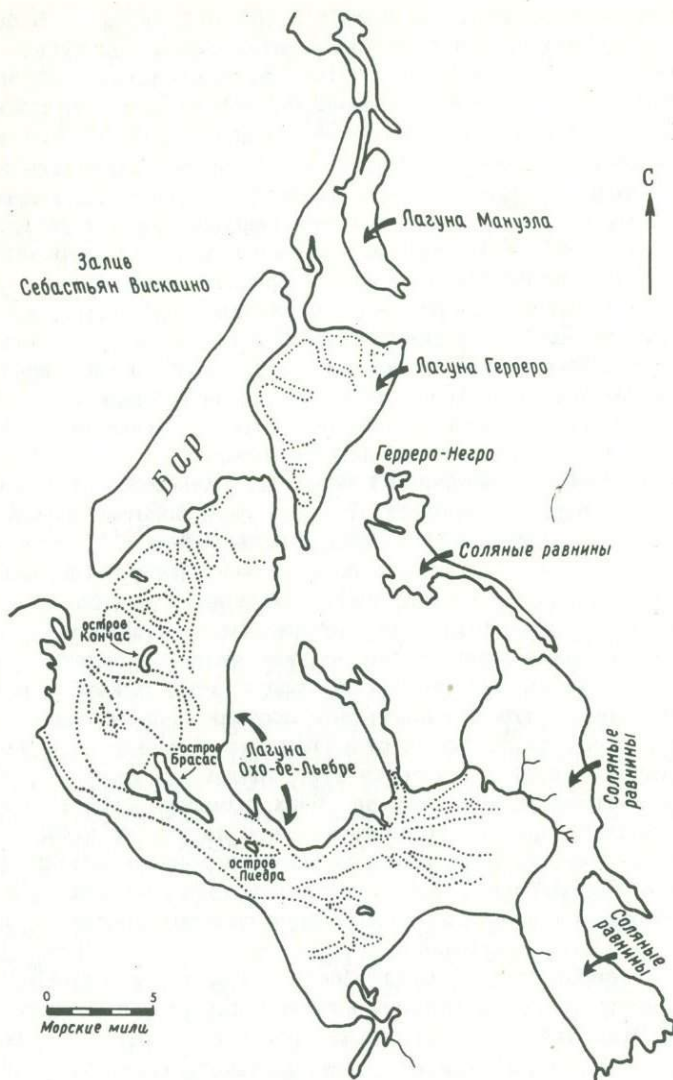
остров. Большая часть песка поступала из располагавшегося на востоке источника сноса, тогда как большую часть алеврита и глины, возможно, приносили реки Тринити и Сан-Джасинто. Бернард и др. [25] отмечали, что осадочные формы "...представлены в основном многочисленными узкими, параллельными друг другу пляжевыми грядами, высота которых варьирует от нескольких дюймов до 12 футов, и располагающимися между ними понижениями. Эти осадочные формы простираются почти параллельно современной береговой линии, однако там, где на их пути встречаются острова, они огибают их сзади и со стороны их более молодых по возрасту западных оконечностей". Если посмотреть со стороны пляжа, то обычно можно увидеть четыре прибойных бара. Их положение и высота, а также видимое количество меняются в зависимости от высоты и направления волн, характера приливных процессов и, возможно, воздействия вдольбереговых течений. В зависимости от преобладания тех или иных условий эти бары могут продвигаться вверх до верхней части побережья и пляжа, переноса песок в район верхней части префронтальной зоны пляжа и в пределы участка, характеризующегося пляжевой обстановкой осадконакопления.

Пески, покрывающие остров Галвестон, очень хорошо сортированы и представлены мелко- и тонкозернистыми разностями. Песок, содержащий раковины, распространяется до глубины 9 м; на более глубоких участках дно покрыто алевритом и глиной с ракови-

нами. При расчленении голоценовых отложений этого барьерного острова полезную роль играют седиментационные текстуры. Большая часть отложений залива изрыта и высверлена живыми организмами. Слоистость и слойчатость обычно характерны для песков и глин, накопивавшихся в условиях приливных дельт и в заливах вблизи проток, где осадки часто подвергаются переработке и отлагаются течениями. Слоистость и наличие падающих под очень большими углами косых слоек являются наиболее характерными текстурными особенностями песков, отложившихся в верхней части фронтальной зоны берега. Отложения средней береговой террасы состоят из заметно изрытых и высверленных слойчатых, слоистых, а местами косослоистых ракушечниковых песков и ракушечников. Удлиненные песчаные зерна пляжевых отложений расположены преимущественно под прямым углом к длинной оси барьерного острова. Такая ориентация параллельна направлению движения волн, которые последними воздействовали на песчаные зерна.

Охо-де-Льбре, Нижняя Калифорния, Мексика. Обычно считают, что бары отделяются от континента болотистыми лагунами с относительно застойными водами. Исследования, проведенные Флегером и Юингом [212] в районе Охо-де-Льбре, Нижняя Калифорния, показали, что лагуна, расположенная позади бара, может характеризоваться высоким энергетическим потенциалом среды, в которой преобладающим типом осадков является песок. Подводный рельеф лагуны, расположенной позади бара, показан на фиг. 28. Многочисленные глубокие приливные протоки веерообразно расходятся в сторону суши. По их сторонам расположены обширные приливо-отливные равнины. Стенки этих проток довольно крутые. Глубокие протоки развиваются на обеих сторонах залива непосредственно позади барьера, отгораживающего лагуну от моря. На верхней поверхности бара имеются многочисленные высокие барханные дюны. Подветренные поверхности некоторых из этих дюн непосредственно сливаются с краями двух главных проток лагуны. Глубина приливных заливчиков варьирует от 6 до 14,6 м. Глубина северной главной протоки сзади бара составляет 12,2–15,2 м, а глубина протоки, расположенной южнее заливчика, примерно равна 12,2 м. Эти глубоко врезаемые каналы в основном являются следствием действия течений с максимальной скоростью 2,5 узла; последние в свою очередь возникают тогда, когда разница между уровнем отливных и приливных вод составляет 1,2–2,7 м. Движение воды в протоках имеет весьма турбулентный характер.

Узкая полоска суши, соединяющая бар с материком, разделяет первоначально единую лагуну на две части. Северная лагуна носит название лагуна Герреро-Негро, а южная — лагуна Охо-де-Льбре. Разделяющая лагуну перемычка сложена песком, который отлагал-



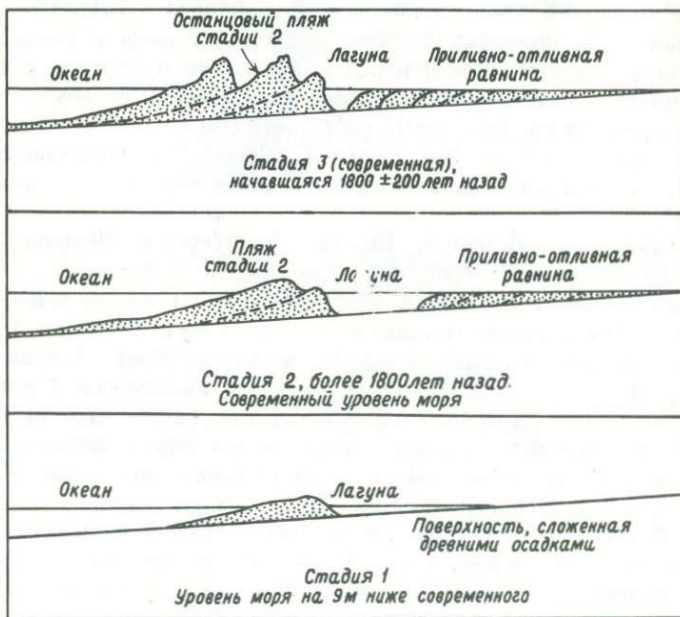
Ф и г. 28. Бары и лагуны, Охо-де-Льебре, Нижняя Калифорния, Мексика [212].

ся, когда приливные воды, пройдя через два приливных залива, текли навстречу друг другу сзади бара.

Флегер и Юинг [212] писали:

«...Большая часть осадков представлена мелко- и тонкозернистым хорошо отсортированным песком с небольшой асимметрией распределения. Непосредственными источниками песка являются барьер, отделяющий лагуну от моря, открытый океанский пляж и прибрежная зона... Песок состоит в среднем на 95% из кварца, 4% темнокветных минералов и 1% или менее фораминифер и раковин... Процесс седиментации заключается в переносе песка от барьерного бара с помощью ветра и его распределении посредством турбулентных приливных течений. Большая часть осадков отлагается в пределах приливных равнин и во внутренней лагуне, поскольку там турбулентные движения отсутствуют. Протоки, прилегающие к барьерному бару, продолжают существовать.

Изучая формирование бара в Охо-де-Льбре, Флегер и Юнг пришли к выводу, что для образования бара необходимы следующие условия: 1) обильное поступление песка, 2) наличие пологопадающего основания, 3) действие волн вдоль обнаженного побережья. Большая часть песка разносится вдольбереговым течением. На фиг. 29 показаны три стадии развития этого бара. Полагают, что



Ф и г. 29. Стадии развития прибрежного бара и лагуны Охо-де-Льбре, Нижняя Калифорния, Мексика [212].

формирование бара началось с образования оторочки пляжа на пологопадающей прибрежной равнине в период, когда уровень моря располагался на 12 м ниже современного.

Как показано на фиг. 29 в течение первой стадии уровень моря был на 9 м ниже современного. Флегер и Юинг [212] писали:

"Такая глубина моря устанавливается на основании присутствия на глубине 12 м в заливах, ведущих в лагуны Охо-де-Льебре и Герреро-Негро, древних осадков... Считается, что эти древние осадки служат ложем, на котором сформировался современный барьерный бар. Для образования широкого пляжа необходимо, чтобы в течение довольно продолжительного времени уровень моря оставался на 12 м ниже его современного положения...

Как только высота песчаного пляжевого покрова превысила уровень, до которого поднимались приливные волны, под действием ветра начали формироваться дюны; при этом барьерный бар стал расти вверх. Медленный подъем уровня моря сопровождался ростом бара на том же самом месте, поскольку здесь образовалось гребнеобразное основание, у которого мог скапливаться песок.

На второй стадии уровень моря совпадал с современным. В толще бара, примерно на расстоянии одной мили в глубь суши от современного пляжа, найдены скопления пляжевых моллюсков. Возраст отложений этого пляжа, определенный радиоуглеродным методом, составляет 1800 ± 200 лет. В это время барьерный бар был на 1,6 км уже по сравнению с его современной шириной. На третьей стадии схематически изображен современный бар".

Лагуна Санто-Доминго, Нижняя Калифорния, Мексика. В районе Санто-Доминго (фиг. 30), примерно в 320 км южнее Охо-де-Льебре имеется береговой бар, ширина которого составляет в среднем 0,8 км, за исключением его более южной части, где он намного шире. На верхней поверхности бара развиты барханы высотой от 12,2 до 15,2 м. С западной стороны лагуны бар ограничен относительно глубокими протоками. Лагуна шириной 0,8–3,2 км, не считая глубоких протоков, представлена приливными равнинами и маршами, которые окаймлены участками, поросшими мангровыми деревьями. Флегер и Юинг [212] писали, что

"в большинстве пунктов наблюдения осадки представлены тонкозернистым песком, характеризующимся хорошей сортировкой и незначительной асимметрией распределения... Все пробы содержат значительное количество апатита. Данные анализа песка, слагающего барьерный бар лагуны, показали, что в верхней 6–13-метровой толще осадков среднее содержание апатита достигает примерно 4%". Этот береговой бар, по-видимому,



Ф и г. 30. Лагуна Санто-Доминго, Нижняя Калифорния, Мексика [211].
Изобаты в фатоммах.

находится на более ранней стадии своего развития по сравнению с баром Охо-де-Льебре. Отсутствие песчаных перемычек в некоторых местах, где приливные воды встречаются сзади бара (фиг. 30), подтверждает сделанный вывод.

Глава 5

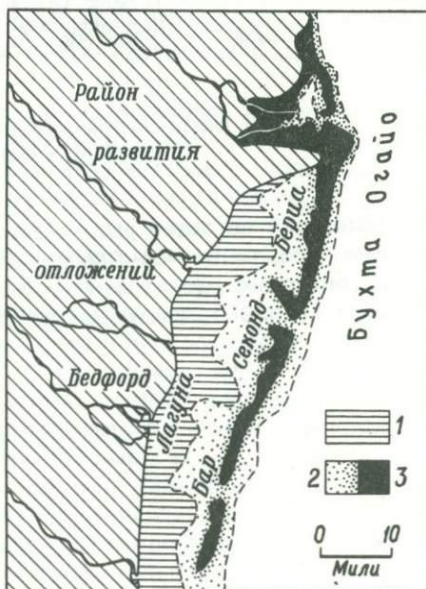
ПРИМЕРЫ ДРЕВНИХ ПЛЯЖЕВЫХ ПЕСЧАНИКОВ

ПЕСЧАНИКИ "СЕКОНД-БЕРИА", АППАЛАЧСКИЙ БАССЕЙН

Отличным примером захороненных древних прибрежных баров является бар, выявленный в юго-восточной части штата Огайо, который протягивается от округа Галлия в северном направлении до округа Маскингем (фиг. 31). Бар сложен песчаником "Секонд-Бериа" раннемиссисипского возраста. Он окаймляет с юго-востока выклинивающийся край толщи дельтовых красноцветных слоев (Бедфорд), простирающийся в меридиональном направлении и также имеющей раннемиссисипский возраст. Как дельтовые отложения, так и песчаник "Секонд-Бериа" охарактеризованы в классической работе Пеппера и др. [208], которая почти целиком основана на данных буровых журналов и изучения обнажений, так как в период проведения работ почти не было материалов электрокаротажа. Для того чтобы выявить форму бара, изменение его мощности и построить

Ф и г. 31. Бар "Секонд-Бериа" в период отложения толщи Бедфорд [208].

1 — лагунные илы; 2 — алевроиты, отложившиеся ниже уровня воды; 3 — пески, отложившиеся выше уровня воды.



поперечные разрезы, было обработано более 1300 журналов буровых скважин. В упомянутой работе песчаник "Секонд-Берия" описан как

"... образовавшееся вблизи береговой линии древнее осадочное тело, очень напоминающее современные барьерные бары, развитые вдоль техасского побережья Мексиканского залива. Песчаное тело вытянуто в длину на 296 км при ширине от 4,8 до 24 км. Относительно прямая восточная кромка песчаного тела представляет собой обращенную к морю сторону бара, а неровный западный край образовался в результате неравномерного накопления осадков в лагуне на обращенной к суше стороне бара".

На большей части своего протяжения прибрежный бар "Секонд-Берия" имеет мощность менее 6,0 м, однако местами она превышает 9,0 м. Основание бара плоское, верхняя поверхность выпуклая. Уменьшение мощности песчаника от свода в восточном направлении проходит более резко, чем в западном, т.е. в сторону лагуны. На севере песчаное тело примыкает к континенту (фиг. 31). На этот участок выносила осадки дренажная система дельты реки Бедфорд. Севернее существовал устьевой бар, который, изолируя лагуну, создавал в ней особую среду осадконакопления; его положение можно приблизительно установить по протягивающейся в южном направлении косе. В центральной части прибрежного бара виден приливной залив. На каждой стороне этого залива баровый песчаник резко изгибается и поворачивает к лагуне. Рукава приливной дельты, по-видимому, веерообразно расходились в пределах лагуны.

На участках развития более мощных песчаников, слагающих этот прибрежный бар, добывается значительное количество газа и небольшое количество нефти. Пелпер и др. [209] отмечали:

"Количество добываемого из песчаника Секонд-Берия естественного газа контролируется как мощностью песчаного тела, так и размерами песчаных зерен. Обычно наиболее продуктивные скважины приурочены к участкам, где песчаник имеет большую мощность. Однако к востоку от сводовой части бара, где мощность песчаника большая, отмечается высокий процент сухих скважин, что, по-видимому, объясняется малым размером песчаных зерен, а также высоким содержанием в песчанике алевритистого материала. На западе, т.е. на обращенной к лагуне стороне бара, добыча ведется из песчаников, мощность которых иногда составляет лишь три метра, а изредка и меньше. Северо-западнее города Морган, округ Морган, в районе, который по описанию представляет собой бухту, окаймленную косой, а также вдоль северного продолжения древнего побережья, продуктивные песчаники встречаются редко".

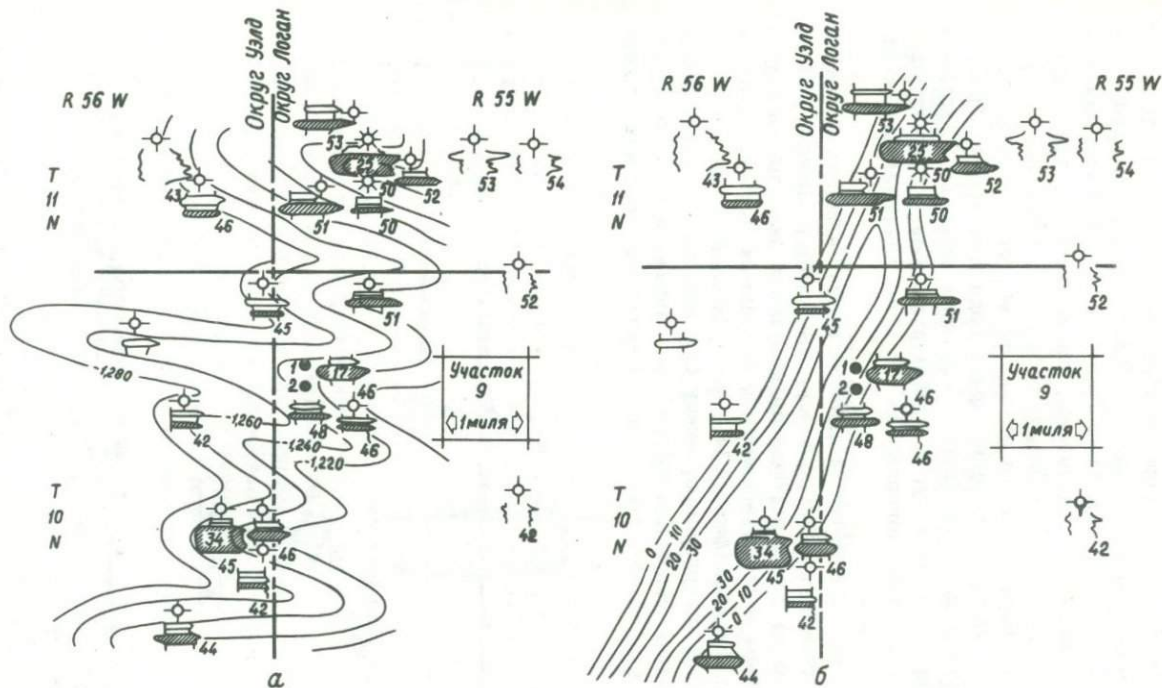
В этой бухте песчаник исключительно алевритистый и обладает очень низкой проницаемостью.

БАР САБЕР, БАССЕЙН ДЕНВЕР – ДЖУЛСБЕРГ, КОЛОРАДО

Гриффит [118] представил интересные и поучительные материалы, полученные при изучении бара Сабер, который выявлен в толще верхнемеловых песчаников "D" в пределах погружающегося к западу восточного борта бассейна Денвер – Джулсберг. Закартированная часть этого осадочного тела вытянута в длину примерно на 16 км и имеет ширину 1,6 км. Его максимальная мощность составляет 14 м. Единственно продуктивными являются те участки этого прибрежного бара, где имеются структурные выступы, перпендикулярные простирацию бара и погружающиеся в западном направлении. Основание бара расположено на 13–17 м выше маркирующего горизонта алевролита "J"; этот интервал носит название глины Хантсмен (фиг. 32). Довольно постоянная мощность глин, залегающих над литологическим маркирующим горизонтом, свидетельствует о том, что основание прибрежного бара в период осадконакопления было довольно плоским. Гриффит [118] писал, что "структурная карта построена по поверхности, которая представляет собой основание песчаного бара или коррелируемые с ней отложения, развитые в стороне от бара", и что на приведенной иллюстрации (фиг. 33, а) "... показан рельеф морского дна, на котором сформировался бар".

Фиг. 32. Типичная электрокаротажная диаграмма месторождения Сабер, Колорадо [118].





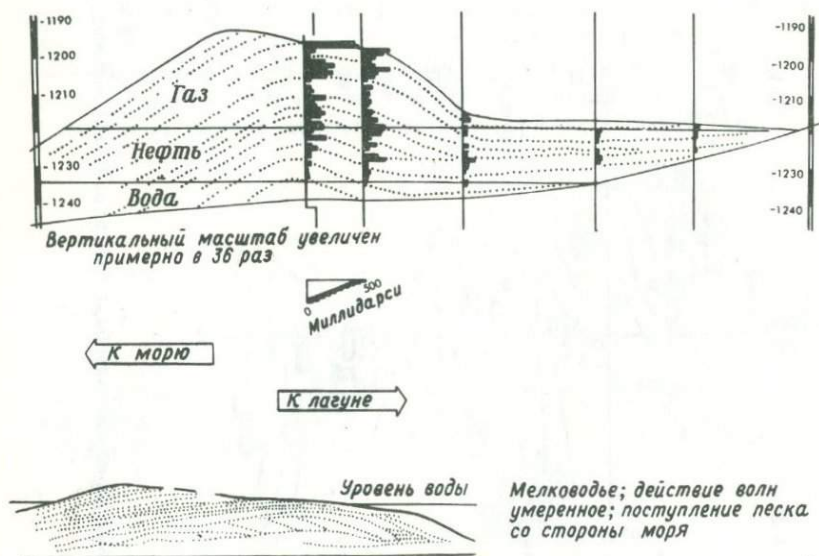
Ф и г. 33.

а – структурная карта подошвы бара Сабер; изолинии в футах; б – карта изобат бара Сабер; изобаты в футах [118].

Довольно плоская форма основания прибрежного бара определяется положением волновой базы, и если фиг. 33, а отражает рельеф морского дна, то песчаное тело должно было бы простирается примерно параллельно извилистым изолиниям, показанным на этой фигуре. Однако на фиг. 33, а, по-видимому, изображена структура современного основания бара Сабер, а не рельеф морского дна; в послемеловое время структура основания претерпела изменения. Гриффит [118] далее утверждал: "Основание морского ложа, на котором формировался бар, по-видимому, представляло собой относительно гладкую, пологопадающую поверхность"; с этим заключением можно полностью согласиться.

Бар Сабер представляет собой один из очень немногих примеров развитых на глубине прибрежных баров, для которых данные анализа проницаемости по керну использовались для выяснения внутренней структуры бара и сопоставления ее отдельных частей, что и показано на фиг. 34. Гриффит [118] отмечал следующее:

"На основании интерполяции между скважинами (из которых отбирался керн) можно предположить наличие в теле бара Сабер нескольких слоев с различной проницаемостью. На графиках,



Ф и г. 34. Поперечный разрез через бар Сабер (вверху), на котором показаны внутреннее строение и внешняя форма бара. (Составлен на основании сопоставления проницаемости осадков в пяти скважинах.)

Для сравнения внизу изображен бар, полученный Мак-Ки и Стерретом [195] в лабораторных условиях [118].

которые помещены на поперечном разрезе рядом с каждой из пяти пробуренных через тело бара скважин, можно видеть изменение проницаемости как по вертикали, так и по горизонтали. Проницаемость обычно увеличивается в сторону верхней поверхности бара и в направлении его склона, обращенного к морю. В латеральном направлении изменение проницаемости происходит постепенно, тогда как по вертикали — резко, что подчеркивает заметную разницу в энергетических уровнях среды в период отложения разных слоев”.

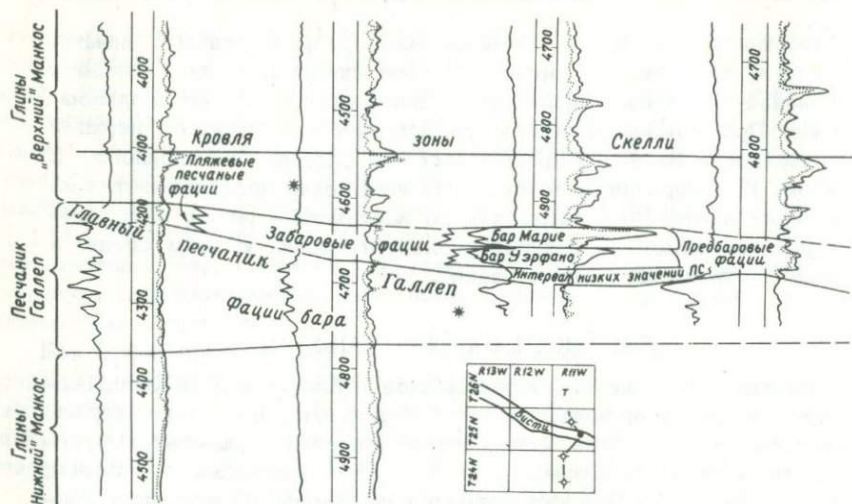
БАР БИСТИ, БАСЕЙН САН-ХУАН

Месторождение Бисти, расположенное в бассейне Сан-Хуан, Нью-Мексико, безусловно, представляет собой пример наиболее хорошо изученного древнего бара. Это месторождение по существу, приурочено к трем тесно связанным друг с другом прибрежным барам, которые Сабинс [234] рассматривал как “баровый комплекс Бисти”. Само месторождение нефти протягивается в длину более чем на 48 км при ширине 4,8 км. Плотность запасов первично извлекаемой нефти месторождения составляет 432 м³/га, а нефти, которую предполагается извлекать с помощью вторичных методов разработки, — 353 м³/га. Нефть сосредоточена в ловушке явно литологического типа, приуроченной к толще, которая регионально погружается в северо-западном направлении при градиенте падения 14,2 м/км.

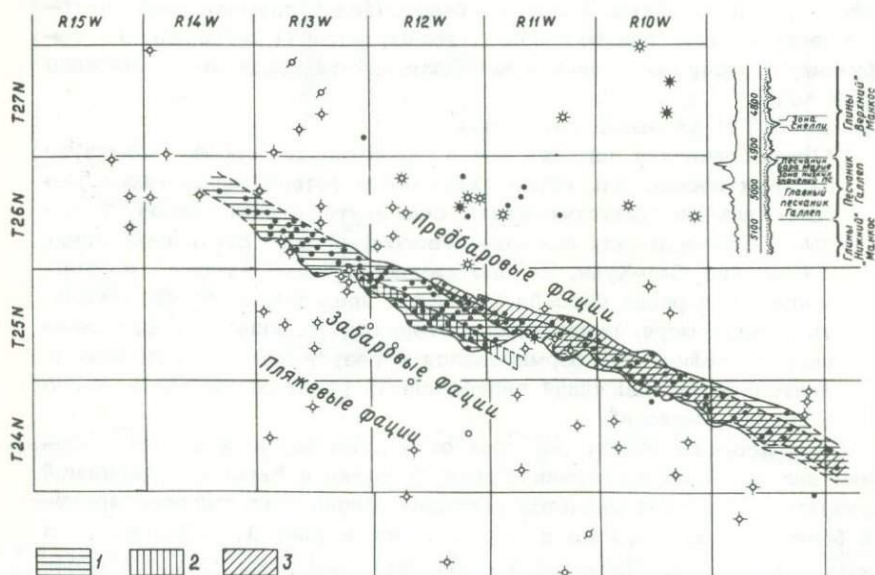
Сабинс [234] указывал следующее:

“Литологическая ловушка Бисти представляет собой комплекс баровых песчаников, образовавшихся в течение одного из регрессивных и трансгрессивных седиментационных циклов, которые характерны для поздне мелового периода осадконакопления в бассейне Сан-Хуан. На протяжении большей части верхне-мелового периода бассейн Сан-Хуан представлял собой закрытый залив моря, покрывавшего территорию Западного Внутреннего бассейна. Он сформировался в результате положительных тектонических движений периферийных участков не ранее конца мелового периода”.

Сама ловушка состоит из трех отдельных баров, которым Сабинс дал названия песчаники Марие, Уэрфано и Карсон. Основной продуктивной пачкой является песчаник Марие, который простирается более чем на 48,3 км в длину, имеет ширину 1,6–3,2 км и мощность 12,2 м. Песчаник Уэрфано залегает ниже песчаника Марие и отделен от него маломощным слоем глины (фиг. 35). Он распространен лишь в юго-восточной части месторождения, как показано на фиг. 36. Мощность этого песчаника менее 9,0 м, ширина приблизительно 3,2 км, а протяженность 33,5 км. Песчаник



Ф и г. 35. Стратиграфическая номенклатура месторождения Бисти [235].
Ляжевые песчаные фации и песчаные фации бара включены в Главный песчаник Галлен.



Ф и г. 36. Контуры нефтеносной площади в теле баровых песчаников, проведенные на основании интерпретации микрокаротажных диаграмм, выполненной Неверсом [234].

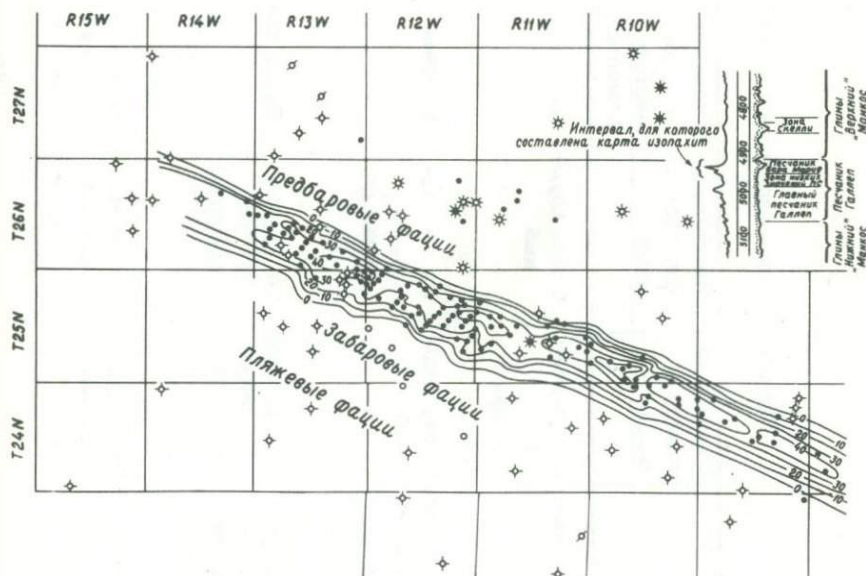
1 — бар Марие; 2 — бар Карсон; 3 — бар Уэрфано.

Карсон развит только в центральной части месторождения Бисти. Его мощность менее 9 м, а ширина менее 1,5 км; в длину он прослежен на 14,5 км. Это песчаное тело расположено юго-восточнее песчаника Уэрфано и протягивается параллельно ему на том же стратиграфическом уровне по отношению к залегающему ниже Главному песчанику Галлеп. Карта изопахит всех баровых песчаников месторождения Бисти приведена на фиг. 37.

Работа Сабинса может служить ценным руководством при изучении погребенных баров потому, что в ней показано, как можно воспользоваться данными анализа шлифов зерна для выделения баровых, предбаровых, забаровых и пляжевых песчаных фаций. В табл. 3 приведены данные, полученные при анализе шлифов; к ним относятся текстура песчаников, их минералогический состав и палеонтологическая характеристика; с более детальной таблицей читатель может ознакомиться в работе Сабинса [234].

Подводя итог своим наблюдениям, относящимся к баровому комплексу Бисти, Сабинс [234] писал:

"Эти петрографические характеристики служат критериями распознавания отдельных фаций, они дают возможность различать фации, характеризующиеся идентичными макроскопическими



Ф и г. 37. Карта изопахит всех баровых песчаников месторождения Бисти, построенная по графикам ПС [234].

Сечение изопахит 10 футов.

Петрографическая характеристика отложений района Бисти по Сабинсу [234]

	Медианный размер зерен	Максимальный размер зерен	Содержание глинистого цемента	Содержание доломита, %	Содержание глауконита	Бентонные фораминиферы	Планктонные фораминиферы, <i>Inoceramus</i> , <i>колиофан</i>
Главный песчаник	От среднего до мелкого	Очень крупный	Низкое	2-11	От следов до видимого количества	Следы	Отсутствуют
Прибрежные песчаники Галлеп	Очень мелкий	От среднего до мелкого	Умеренное	15-30	Отсутствует или присутствует в виде следов	Присутствуют	Следы
Отложения, характеризующиеся низкими значениями ПС	От мелкого до очень мелкого	От крупного до среднего	Очень высокое	5-20	От следов до видимого количества	Следы	Отсутствуют
Баровые песчаники	От среднего до мелкого	От очень крупного до крупного	Низкое, но увеличивается к основанию	<5, причем только у основания	Очень большое количество повсюду	"	Отсутствуют, за исключением обращенного к морю крыла
Забаровые фации	От мелкого до очень мелкого	От крупного до среднего	Высокое	5-15	От следов до видимого количества	Большое количество	Отсутствуют, наблюдаются лишь перемещенные обломки
Предбаровые фации	То же	От среднего до мелкого	"	8-25	То же	Обычны	Присутствуют в очень больших количествах
Глины "Верхний Манкос"	Очень мелкий	То же	"	5-30	Отсутствует или присутствует в виде следов	"	То же

свойствами и электрокаротажными показателями. Например, баровые песчаники месторождения Бисти, содержащие много глауконита, можно отличить от сходных с ними по внешнему виду пляжевых песчаников, в которых глауконит отсутствует. По комплексу фауны открытого моря, представленной *Inoceramus* и заполненными кальцитом планктонными фораминиферами, а также по присутствию коллофана, можно отличить предбаровые фации от забаровых, которые содержат ограниченное количество морской фауны, представленной заполненными пиритом бентонными фораминиферами.

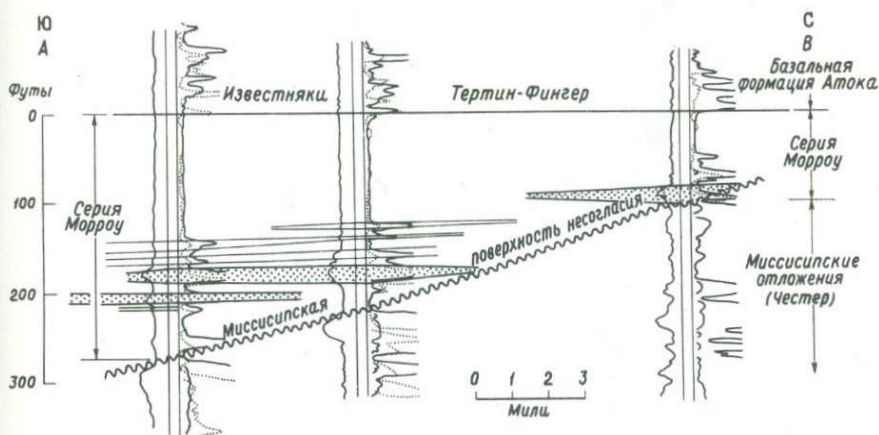
Изменение текстурных особенностей песчаников по вертикали и характер первичного распределения в них доломитовых зерен являются важными сведениями, по которым восстанавливают историю осадконакопления. Изучение этих изменений совместно с составлением карты палеорельефа показало, что галлепский седиментационный цикл в районе Бисти начался с отложения регрессивных прибрежных песчаных фаций. На верхней поверхности прибрежного песчаного комплекса образовались протягивающиеся в северо-западном направлении вдольбереговые бары и впадины. Резкий контакт между прибрежными песчаными отложениями и перекрывающими их отложениями, которые характеризуются низкими значениями ПС, явился следствием кратковременного прогибания и, возможно, образования слабо выраженной эрозионной поверхности несогласия. Вслед за этим волны, действию которых подвергся обращенный к морю уступ в склоне берега, вымыли глины, на месте которых скопился песок, характеризующийся низкими значениями ПС на каротажных диаграммах; этот песок и сформировал баровый комплекс Бисти. На защищенной от моря стороне этого комплекса в небольшом объеме образовались морские забаровые фации, а на обращенной к морю стороне — предбаровые фации открытого моря. Кратковременное погружение в сторону моря привело к тому, что все отложения Галлеп оказались погребенными под трансгрессивно залегающими глинами "Верхний" Манкос. Таким образом, литологическая ловушка Бисти сформировалась и сохранилась в результате процессов осадконакопления, которые оказалось возможным установить путем детального изучения пород".

ПЕСЧАНИКИ МОРРОУ, БАССЕЙН АНАДАРКО

Резервуары в породах серии Морроу в северо-западной части штата Оклахома состоят из повторяющихся пачек газоносного песчаника. Все газовые залежи приурочены к литологическим ловушкам.

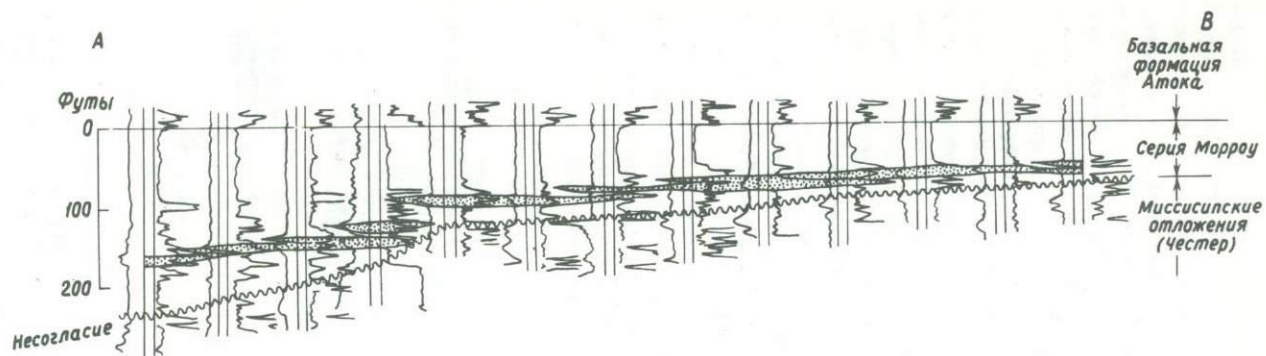
Основные принципы поисков углеводородов в этом районе были разработаны Бушем [42] на ранних стадиях развертывания буровых работ, однако данные, полученные в процессе последующего разведочного и эксплуатационного бурения, позволяют в настоящее время произвести более детальный анализ. На фиг. 38 изображен обобщенный поперечный разрез (А — В) толщи Морроу (нижний пенсильваний) меридионального направления. Толща Морроу представляет собой генетически взаимосвязанную толщу (GSS) отложений, несогласно залегающих на миссисипских породах и перекрытых известняками "Тертин-Фингер". Мощность толщи Морроу увеличивается с севера на юг, что связано с появлением у основания толщи в этом направлении все более и более древних пластов и свидетельствует о ее трансгрессивном характере. Изохроны в основном располагаются параллельно основанию известняков "Тертин-Фингер" и упираются в эродированную поверхность подстилающих миссисипских отложений.

На приведенном разрезе (фиг. 38) показаны три песчаных тела, расположенных кулисообразно по отношению друг к другу и выклинивающихся к югу, в направлении к внутренним частям бассейна. Самое верхнее тело упирается в древнюю поверхность миссисипской суши, тогда как самое нижнее выклинивается, не достигнув поверхности несогласия. Из этого разреза нельзя определить, переходит ли средний песчаник в глины, прежде чем он достигнет поверхности несогласия. Более детальный поперечный разрез (А — В)



Ф и г. 38. Упрощенный стратиграфический разрез по линии А — В отложений серии Морроу, развитых в северо-западной части штата Оклахома, на котором видно кулисообразное расположение трех базальных песчаных пачек [42].

Положение разреза можно видеть на фиг. 40.

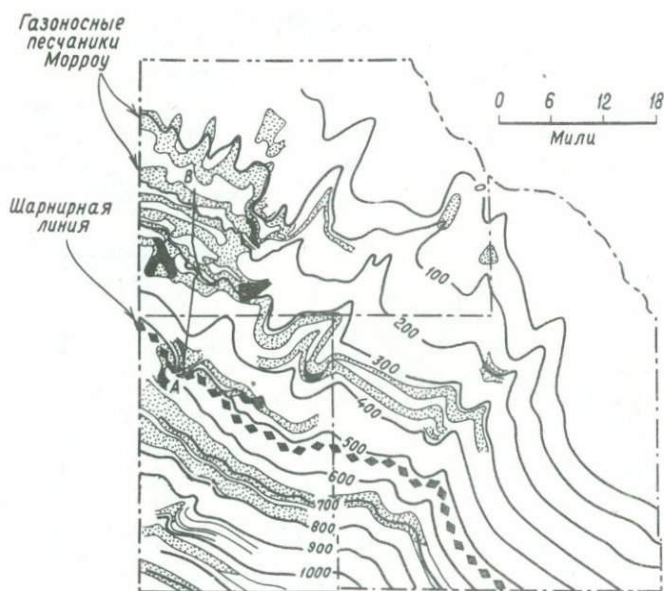


Ф и г. 39. Стратиграфический разрез по линии А — В серии отложений Морроу, развитых в северо-западной части штата Оклахома, на котором показано кулисообразное расположение песчаных резервуаров [43].

Положение профиля показано на фиг. 40.

показан на фиг. 39. На этом разрезе изображен примерно тот же интервал, что и на фиг. 38, однако при его построении было использовано значительно больше каротажных диаграмм. Отдельные кулисообразно расположенные песчаные тела показаны крапом. В направлении поверхности несогласия большинство песчаников постепенно переходит в глины или алевролиты. В сторону моря (к югу) некоторые песчаники переходят в алевролиты. Каждое из этих песчаных тел отлагалось в период стабильного состояния береговой линии в условиях циклически повторяющейся трансгрессии раннепенсильванского моря. Они представляют собой либо песчаники прибрежных баров, либо окаймляющие пляжевые песчаники, либо то и другое вместе и простираются параллельно древним береговым линиям.

Карта изопакит генетически взаимосвязанной толщи Морроу, содержащей газоносные песчаники, показана на фиг. 40. Разрез морроусских отложений отражает более или менее непрерывный процесс седиментации, несмотря на то что береговая линия испытывала трансгрессию циклического (прерывистого) характера. В сущности

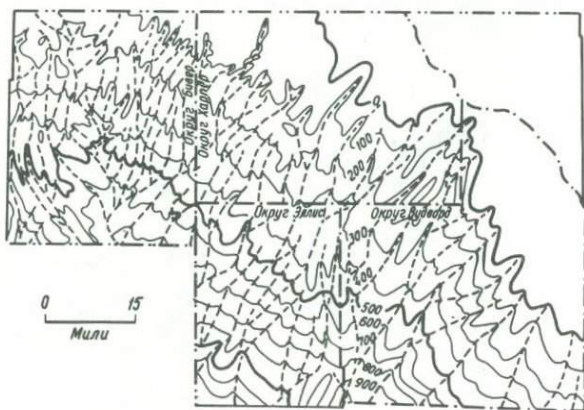


Ф и г. 40. Одна из первых карт изопакит серии Морроу, распространенной в северо-западной части штата Оклахома, на которой показано общее простира-
ние нескольких тел газоносных песчаников [43].

Следует обратить внимание на то, что отдельные песчаники приурочены к участ-
кам сокращенной мощности серии Морроу. Сечение изопакит 100 футов.

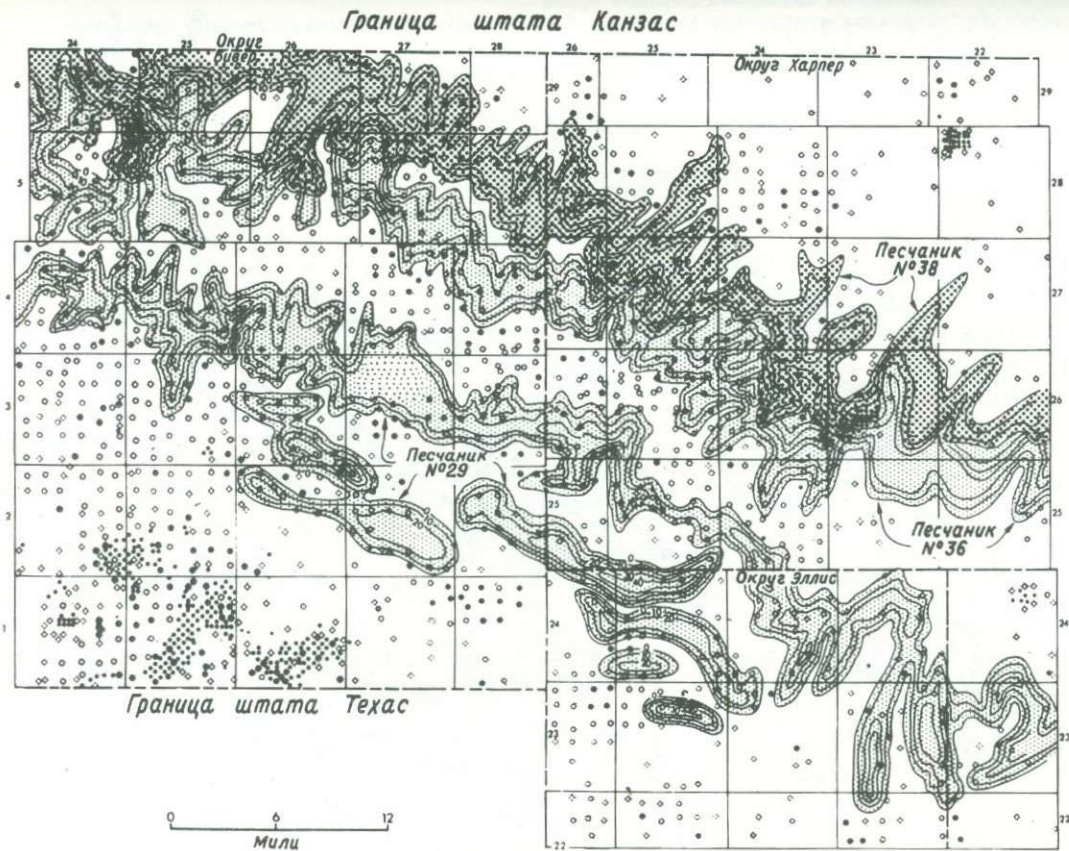
эта карта изопахит отображает палеорельеф подвергшейся эрозии поверхности миссисипских отложений, на которую трансгрессировало раннепенсильванское море. Отдельные прослеженные тела песчаников (круп) образуют извилистые полосы. Эти тела приурочены к участкам критического сокращения мощности *GIS*. При всех этих построениях кровля известняков "Тертин-Фингер", которая располагалась параллельно уровню моря, принималась в качестве изохроны. Показанное на карте увеличение мощности отложений серии Морроу по направлению к внутренней части бассейна отражает наклон в этом направлении миссисипской поверхности несогласия. Поскольку эта поверхность была неровной, такой же неровной была испытывавшая циклическую (прерывистую) трансгрессию береговая линия, что обусловило извилистость границ хулисообразных "ступенчатых" тел песчаников.

Карта, изображенная на фиг. 41, была построена примерно 5 лет спустя после рассмотренной выше карты (фиг. 40), когда появилось в два раза больше данных электрокаротажных диаграмм. Эта карта изопахит (фиг. 41) толщи отложений Морроу ясно свидетельствует о том, что потоки, размывшие поверхность миссисипских отложений, текли в юго-западном направлении. Каждой песчаной и алевролитовой пачке, входящей в состав толщи Морроу, Хайвк [156] присвоил свой номер. На фиг. 42 показано простираание и положение их выклинивающихся северо-восточных окончаний. На большей части площади своего развития тела песчаников и алевролитов трансгрессивно перекрываются другими отложениями, и поэтому изобразить графически распространение каждого тела не представляется возможным.

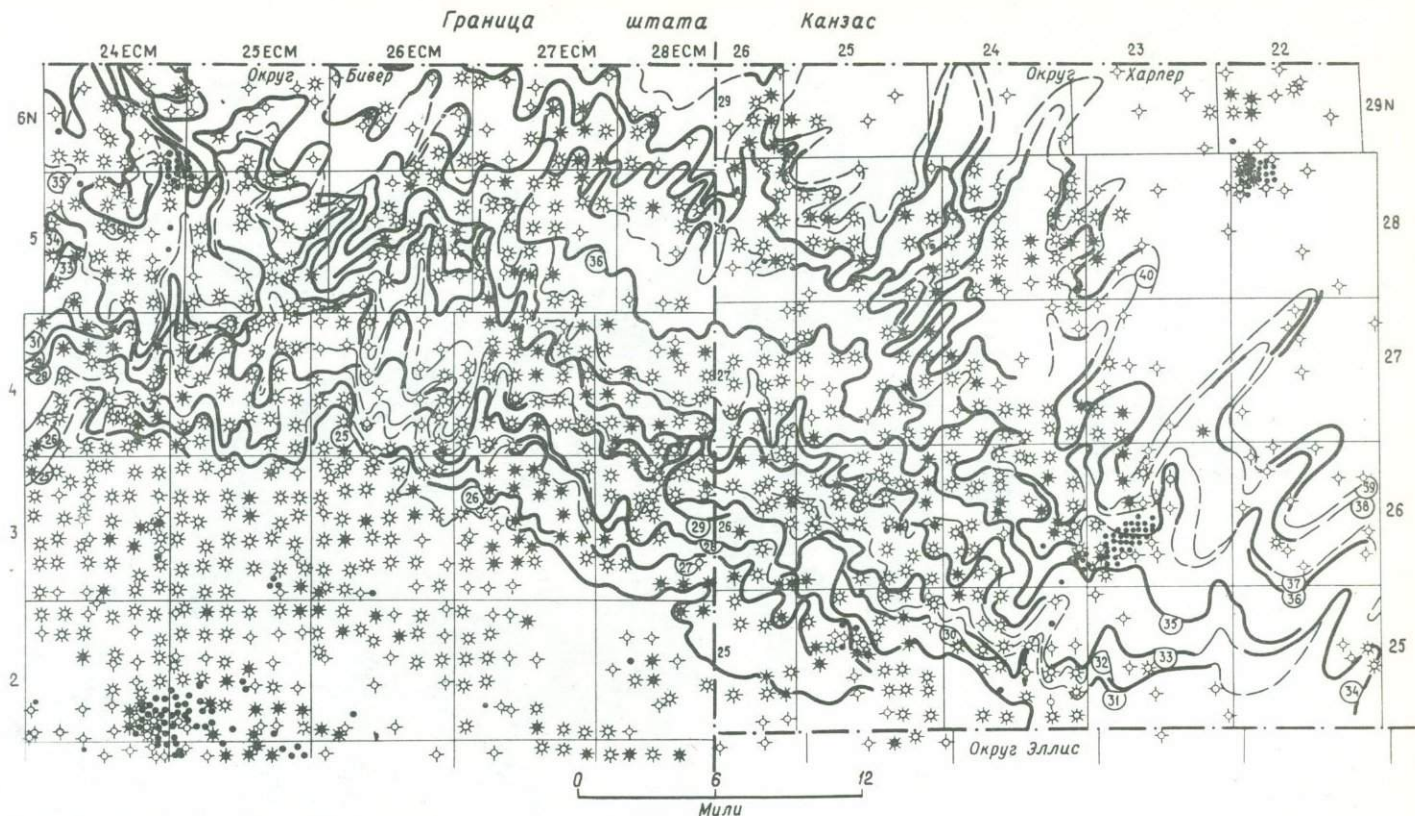


Ф и г. 41. Современная карта изопахит серии Морроу, распространенной в северо-западной части штата Оклахома, по которой можно представить себе рельеф допенсильванской поверхности [156].

Пунктирными линиями показаны русла потоков. Сечение изопахит 100 футов.



Ф и г. 43. Карта изопахит трех тел морроусских песчаников, развитых в северо-западной части штата Оклахома [156].



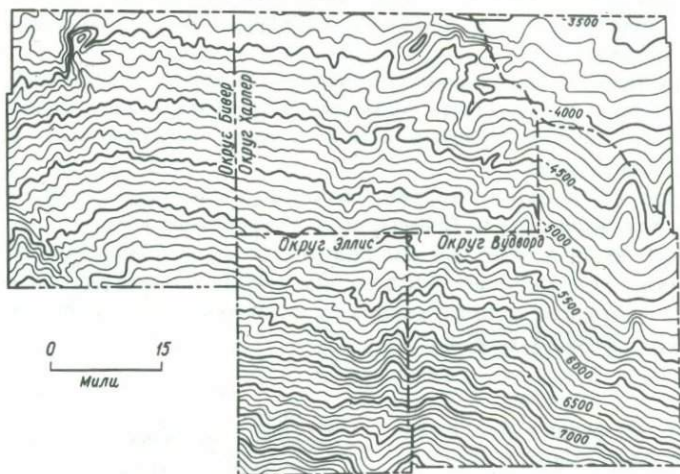
Ф и г. 42. Последовательное перемещение береговой линии в процессе формирования серии Морроу, развитой в северо-западной части штата Оклахома [156].

Толстыми линиями показаны береговые линии, к которым приурочены песчаники; пунктирными линиями – береговые линии, вдоль которых песчаники не развиты.

Большинство положений, которые занимала береговая линия, устанавливается по алевролитам, которые обрываются у миссисипской поверхности несогласия. Однако в некоторых местах в поверхность несогласия упираются и песчаники. Изображенные на фиг. 42 положения береговой линии протягиваются параллельно изоляциям поверхности миссисипских отложений (фиг. 41).

На фиг. 43 показаны простираение, мощность и ширина трех пронумерованных тел морроусских песчаников и алевролитов. Обращенные к суше (северные) границы этих тел параллельны береговой линии. Неровности их обращенных к морю границ, возможно, обусловлены рядом различных причин, например неровностями морского дна (явившимися частично результатом дифференцированного уплотнения осадков), направлением движения волн, вдольбереговыми течениями и положением дельт. Песчаник № 29 представлен не только песчаником кромки пляжа очень неправильной формы, но и песчаником нескольких субпараллельных баров. Карты такого типа были построены для каждой песчаной пачки толщи Морроу.

На фиг. 44 изображена карта миссисипской поверхности северо-западной части штата Оклахома, на которой не видно никаких структурных ловушек. В послеморроусское время эта поверхность была наклонена в сторону внутренней части бассейна (на юг), что видно по более крутым углам падения пород в этом направлении по сравнению с углами наклона поверхности палеорельефа, показанной



Ф и г. 44. Структурная карта кровли миссисипских отложений, развитых в северо-западной части штата Оклахома [156].

Следует обратить внимание на то, что направления структурных понижений аналогичны направлениям русел палеорек, показанных на фиг. 41. Сечение изогипс 100 футов.

на фиг. 40. Изолинии структурной карты менее извилисты по сравнению с изолиниями карты палеорельефа. Как указывалось выше, в процессе исследований морроусских песчаников оказалось возможным систематически проследить отдельные песчаные пачки. Однако представленные карты (фиг. 40–44) являются только геологической основой для систематического отбора образцов, детального изучения шлифов и других петрографических исследований. Песчаники баров, окаймляющих пляжей, русел и дельт, которые развиты в толще морроусских отложений, должны отличаться друг от друга по своим диагностическим петрографическим характеристикам. Максимальная плотность скважин, на основании которых проводились эти исследования, составляет 1 скважина на 2,56 км². В юго-восточной части района исследований плотность скважин была значительно меньше.

ПЕСЧАНИКИ МЕСАВЕРДЕ, БАСЕЙН САН-ХУАН

Холленсхед и Притчард [131] опубликовали данные анализа песчаников Месаверде, развитых в бассейне Сан-Хуан, штат Нью-Мексико. Наиболее важным вкладом этих авторов в проблему изучения развитых на глубине отложений является то, что они шаг за шагом анализируют применяемые для этих целей методы. Их работа, краткий обзор которой здесь приведен, служит примером применения основополагающих принципов стратиграфии для решения конкретных вопросов.

Из песчаников, залегающих в подошве и кровле отложений группы Месаверде, было добыто большое количество газа. Залежи газа приурочены к ловушке литологического типа, не имеющей никакой связи со структурой.

На фиг. 45 показан бассейн Сан-Хуан и положение района, изученного Холленсхедом и Притчардом. Газоносный участок шириной около 120 км и длиной 48 км протягивается с северо-запада на юго-восток. При изучении этой площади были проанализированы около 1900 диаграмм электрокаротажа и гамма-нейтронного каротажа, штамм, керн. и шлифы.

Ф и г. 45. Обзорная карта, на которой показано положение района, изученного Холленсхедом и Притчардом [131], по отношению к бассейну Сан-Хуан и стыку четырех планшетов (Фор-Корнерс).



Отложения группы Месаверде образовались в среднемеловое время в пределах обширного мелководного моря. Морской залив протягивался с севера на юг на несколько тысяч миль, а с запада на восток — приблизительно на 1000 миль. Западная береговая линия в районе Фор—Корнерс местами имела северо—западное простирание. Ее положение существенно менялось во времени, так как она вначале регрессировала, а затем трансгрессировала. Бассейн Сан—Хуан представляет собой замкнутую структуру, которая расположена в пределах развития среднемеловых отложений. Конфигурация этого структурного бассейна, по Холленсхеду и Притчарду, воспроизведена на фиг. 51.

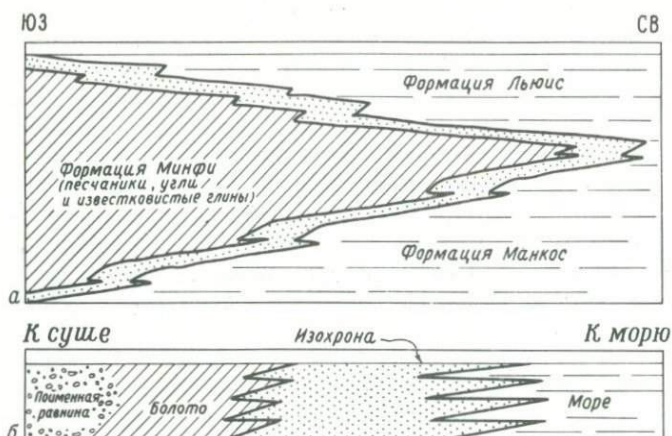
На фиг. 46 изображена диаграмма, на которой приведены названия литологических единиц, образовавшихся в поздне меловое время в бассейне Сан—Хуан. Самая нижняя формация группы Месаверде, Пойнт—Лукаут, сложена мелко— и тонкозернистыми морскими песчаниками, в которых содержится значительное количество газа. Формация Минфи представляет собой выклинивающуюся в северо—восточном направлении континентальную толщу, состоящую из пластов глин, песчаников и угля, имеющих хаотический характер распространения и не содержащих ни нефти, ни газа. Формация Минфи перекрыта мелкозернистыми и тонкозернистыми газоносными песчаниками Клифф—Хаус.

Стратиграфические и фациальные взаимосвязи этих трех формаций показаны в нижней части фиг. 47. Песчаники Пойнт—Лукаут регрессивны по отношению к изохронам в пределах 107—метровой толщи разреза, а песчаники Клифф—Хаус трансгрессивны в пределах 64—метровой толщи (справа налево, фиг. 47). Формация Минфи,

Система	Группа	Литологические единицы бассейна Сан-Хуан		
		Месаверде	Дакотская	
Меловая		Мак-Дермот		
		Картленд (глины)		
		Фрутленд (песчаники, глины, угли)		
		Пиччерд-Клиффс (песчаники)		
		Льюис (глины)		
		Клифф-Хаус (песчаники)		
		Минфи (песчаники, глины, угли)		
		Пойнт-Лукаут (песчаники)		
			Манкос (глины)	

	Дакотская	Дакота (песчаники, глины, угли)		

Ф и г. 46. Названия литологических единиц, образовавшихся в бассейне Сан-Хуан в поздне меловое время [131 с изменениями].



Ф и г. 47.

а — поперечный разрез группы Месаверде, развитой в бассейне Сан-Хуан, на котором показана временная взаимосвязь между отдельными пачками; *б* — условия осадконакопления группы Месаверде [131].

залегающая между песчаниками Пойнт-Лукаут и Клифф-Хаус, уменьшается в мощности от 267 м на юго-западе до 49 м на северо-востоке. Морские глины Манкос отлагались одновременно с нижней частью формации Минфи и песчаниками Пойнт-Лукаут, тогда как морские глины Льюис образовались в течение трансгрессивной фазы отложения песчаников Клифф-Хаус. Таким образом, в период отложения осадков группы Месаверде одновременно существовали четыре среды осадконакопления, схематически изображенные на фиг. 47. К ним относится пойменная равнина с континентальными условиями осадконакопления, отделенная узким болотистым участком, где формировались угли, от зоны, примыкающей к береговой линии, где проходило накопление песков. Прибрежно-морская зона со стороны внутренней части бассейна граничила с зоной, где отлагались илы. В период накопления осадков Месаверде все четыре района осадконакопления вначале испытывали регрессию, а затем трансгрессию. Вследствие перемещения береговой линии в каждой из обстановок откладывались различные типы осадков. На песчаниках Пойнт-Лукаут непосредственно залегает тонкий угольный пласт; другой угольный пласт подстилает песчаники Клифф-Хаус. Ни один из слоев угля не может служить в качестве синхронного маркирующего горизонта. Обращенные в сторону суши края двух песчаных тел, там, где они контактируют с углем, очень резко обрываются, тогда как со стороны моря песчаники местами постепенно переходят в морские глины и алевролиты.

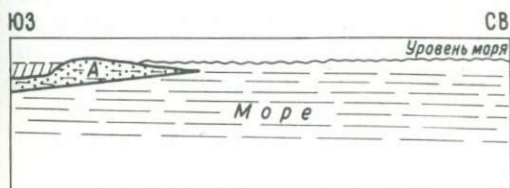
На фиг. 47 показаны три варианта условий осадконакопления:

1. Скорость седиментации превышала скорость прогибания, вследствие чего происходила регрессия береговой линии.

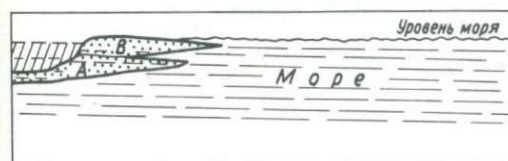
2. Скорость прогибания была выше скорости седиментации, в результате чего береговая линия трансгрессировала.

3. Скорости седиментации и прогибания были одинаковы, вследствие чего береговая линия находилась в стабильном состоянии; при этом локально накапливались относительно мощные береговые и прибрежные пески.

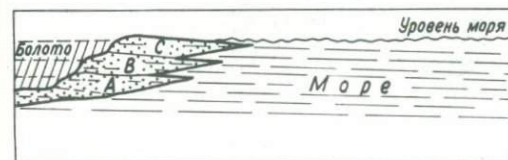
Холленсхед и Притчард [131] выделили четыре стадии циклической регрессии береговой линии для времени формирования песчаников Пойнт-Лукаут (фиг. 48). Песчаник Лукаут не образует однородного покрова. В пределах площади его развития имеются четыре участка, где мощность песчанника увеличена, что связано со стабильным положением береговой линии, в целом испытывавшей регрессию. В этих участках песчаник хорошо сортирован, тогда как



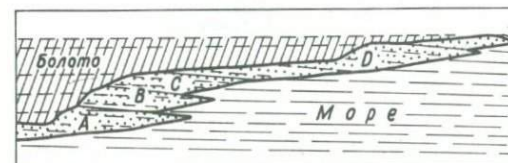
Стадия 1



Стадия 2



Стадия 3



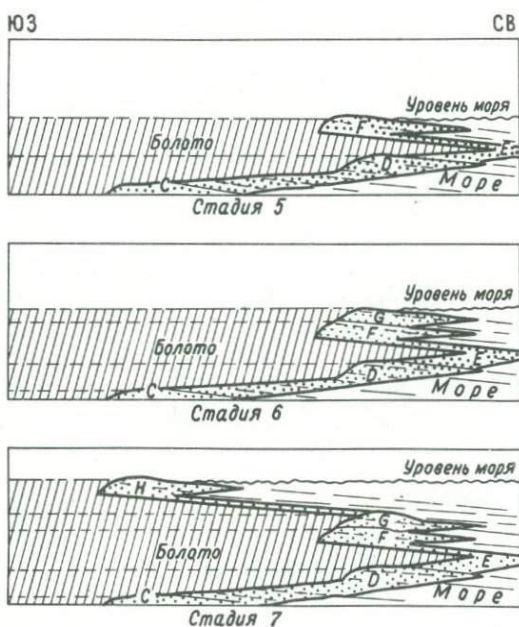
Стадия 4

Ф и г. 48. Поперечные разрезы, на которых показана регрессия береговой линии в период отложения песков Пойнт-Лукаут [131].

маломощный песчаник, формировавшийся в условиях относительно быстрого смещения береговой линии, характеризуется плохой сортированностью.

На фиг. 49 показаны три стадии циклического погружения, которые имели место в период отложения песков Клифф-Хаус. Причиной накопления в ряде мест более мощных, хорошо отсортированных песков опять-таки явилось стабильное состояние береговой линии, тогда как отложение плохо отсортированных песков на промежуточных участках было следствием относительно быстрой трансгрессии моря.

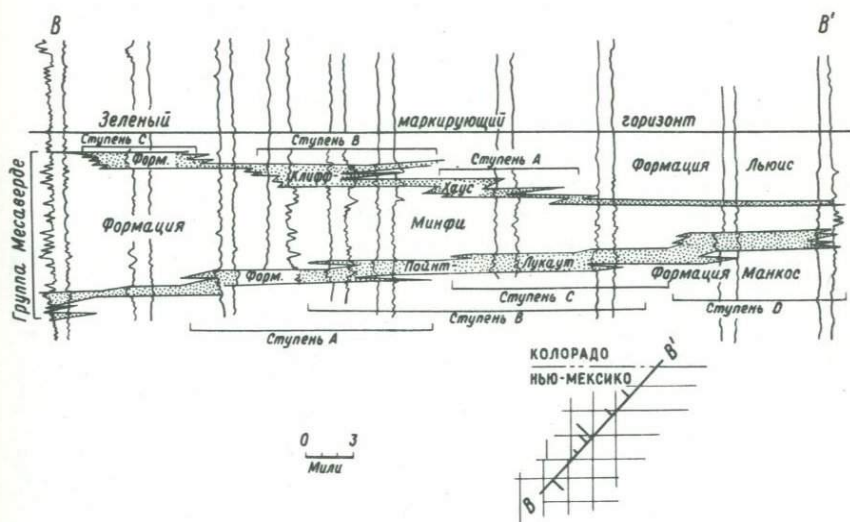
В качестве условной поверхности отсчета был выбран литологический маркирующий пласт, залегающий в нижней части толщи морских глин Льюис. Этот пласт представлен бентонитом, который на большинстве электрокаротажных диаграмм кажущегося сопротивления выделяется в виде минимума. В ряде районов, где бентонитовая зона становится неясно выраженной на электрокаротажных диаграммах, пользуются другим маркирующим горизонтом. Бентонитовый маркирующий горизонт, называемый "зеленым маркирующим горизонтом", залегают параллельно другим пластам, которые



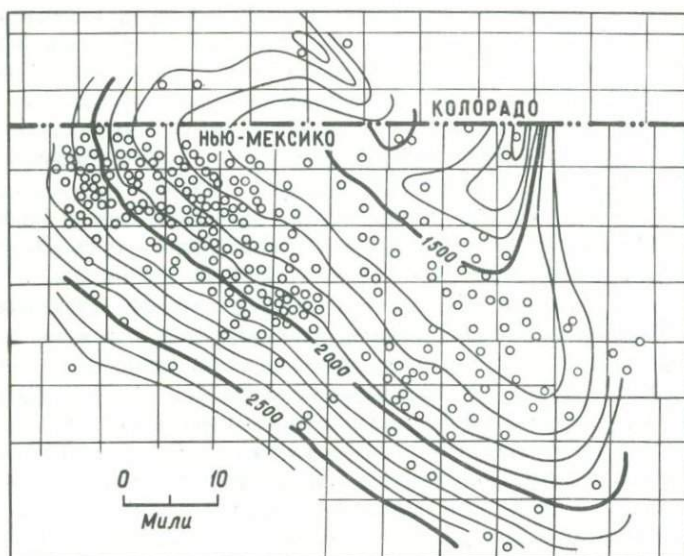
Ф и г. 49. Поперечные разрезы, на которых показано неправильное тело трансгрессивных песчаников Клифф-Хаус [131].

фиксируются на диаграммах "пониженным" значением величин кажущегося сопротивления. При построении поперечных разрезов, как это показано на фиг. 50, Холленсхед и Притчард за условную поверхность отсчета взяли "зеленый маркирующий горизонт", что дало возможность легко установить верхнюю и нижнюю границы толщи Месаверде. Они восстановили историю накопления толщи Месаверде для площади структурного бассейна Сан-Хуан. Ступенчатый характер песчаников Пойнт-Лукаут и Клифф-Хаус непосредственно связан со скачкообразным изменением положения береговой линии. По направлению к суше (на юго-запад) каждая ступень песчаника резко сменяется болотными отложениями формации Минфи. Обращенные к морю (северо-восточные) границы этих ступеней сглажены и не так легко выделяются, как края, обращенные к суше.

На фиг. 51 приведена структурная карта бассейна Сан-Хуан, составленная по "зеленому маркирующему горизонту". На карте видно, что слои регионально погружаются примерно на 450 м преимущественно в северо-восточном направлении. В целом на карте вырисовывается очень асимметричная синклиналь. Скопления газа в основном приурочены к участкам перехода песчаников Пойнт-Лукаут



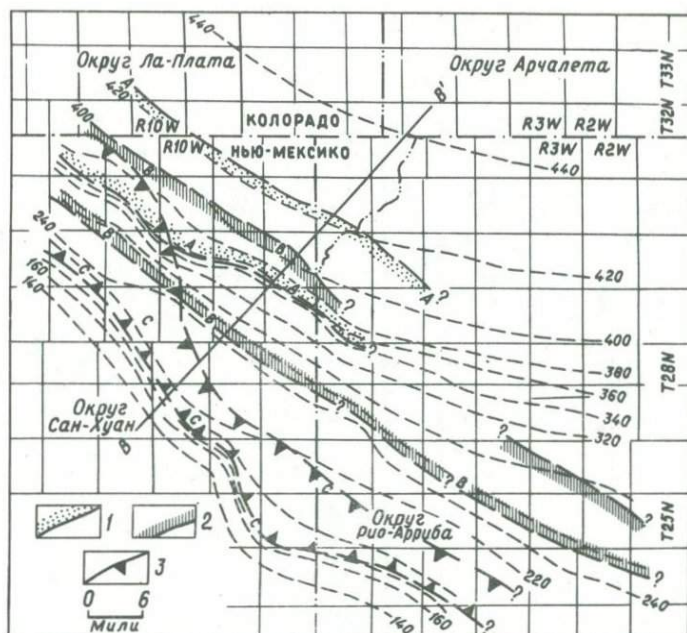
Фиг. 50. Поперечный разрез $B - B'$ в направлении с юго-запада на северо-восток, на котором показаны стратиграфические соотношения песчаников Месаверде [131].



Ф и г. 51. Структурная карта бассейна Сан-Хуан, Нью-Мексико, составленная по "зеленому маркирующему горизонту" [131].
Сечение изогипс 100 футов.

и Клифф-Хаус в глины вверх по восстанию пластов вдоль обращенных к суше границ ступенчатых клиньев. Для того чтобы выявить пояса осадконакопления и определить ширину ступеней, Холленсхед и Притчард построили две карты изопахит. Одна из них (фиг. 52) построена для стратиграфического интервала между "зеленым маркирующим горизонтом" и основанием песчаников Клифф-Хаус. Эта толща аналогична *GIS*, которая схематически изображена на фиг. 16, в. По более теоному расположению изогипс намечаются районы более стабильного положения береговой линии и пояса осадконакопления, тогда как районы трансгрессии выделяются по более широким интервалам между изолиниями. Таким образом, палеотренды береговой линии были построены с помощью методов, которые исключают влияние тектонических процессов, проявившихся после осадкообразования. Палеотренды береговой линии совершенно не связаны с современной структурой бассейна Сан-Хуан.

На фиг. 53 показана карта изопахит *GSS*, в кровле которой залегает "зеленый маркирующий горизонт"; за основание этой толщи была взята подошва формации Минфи, поскольку контакт между пластом угля и подстилающими песчаниками Пойнт-Лукаут резко выражен. Были выявлены четыре отчетливые ступени, которые соответствуют

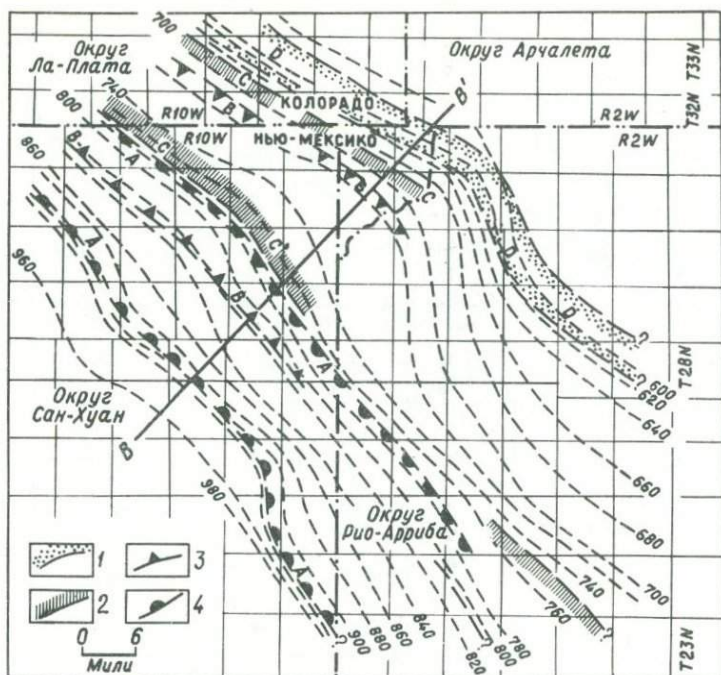


Ф и г. 52. Карта изопакит для интервала разреза между "зеленым маркирующим горизонтом" и кровлей формации Минфи, на которой видны основные ступени песчаников Клифф-Хаус.

1 — ступень А; 2 — ступень В; 3 — ступень С. Сечение изопакит 20 футов.

различным стадиям регрессии, имевшим место в период отложения песчаников Пойнт-Лукаут. Циклы прогибания характеризовались меньшими амплитудами по сравнению с амплитудами прогибания в процессе отложения песчаников Клифф-Хаус. Вполне очевидно, что путем построения карт изопакит для отдельных толщ GIS и GSS можно интерполировать положение береговой линии в районы, для которых нет достаточной информации по буровым скважинам. С помощью проведенного этими методами стратиграфического анализа залегающих на глубине отложений можно выявить участки, перспективные для проведения разведочных работ. В рассмотренном примере для решения вопроса о выборе участков под концессию и разбуривание знание тектонического строения изучаемого района имеет очень небольшое значение.

Ванек [284] закартировал две ступени (языка) песчаников Месаверде к северу-западу от бассейна Сан-Хуан, где эти песчаники обнажаются. Простираение и местоположение этих двух ступеней и



Ф и г. 53. Карта изопакит для интервала разреза между "зеленым маркирующим горизонтом" и основанием формации Минфи, на которой видны основные ступени песчаников Пойнт-Лукаут [131].

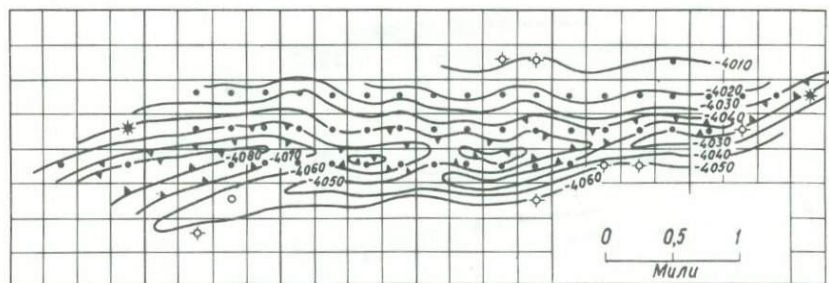
1 — ступень D; 2 — ступень C; 3 — ступень B; 4 — ступень A. Сечение изопакит 10 футов.

ступеней B и C песчаников Клифф-Хаус (фиг. 53) очень сходны между собой. Такие обнажающиеся на поверхности ступени известны и юго-восточнее бассейна Сан-Хуан. Изучение стратиграфии развитых на поверхности отложений Месаверде в районах, расположенных юго-восточнее и северо-западнее Сан-Хуан, до начала развертывания интенсивного разбуривания большого газового месторождения дало возможность одной крупной компании предположить наличие аналогичных ступеней песчаников на глубине, где их существование раньше не предполагалось. Увязав между собой обнажающиеся на поверхности и предполагаемые на глубине ступени, эта компания получила возможность взять под лицензию интересующий ее участок задолго до того, как между компаниями развернулась борьба за право получения концессии на этой территории.

ПЕСЧАНИКИ, ВЫПОЛНЯЮЩИЕ ДОЛИНЫ, РАЗВИТЫЕ ПО ПРОСТИРАНИЮ СЛОЕВ

Термин "песчаники долин по простиранию" был предложен Бушем [42] для того, чтобы дать определение песчаникам, которые отложились в понижениях между куэстами в период, когда в результате трансгрессии поверхность была затоплена водами моря. Такие куэсты могут представлять собой или обрывы эрозионного происхождения, или сбросовые уступы. Эрозионные обрывы возникают в результате постепенного срезания серии чередующихся друг с другом устойчивых и неустойчивых к эрозии слоев, каждый из которых имеет региональный наклон.

Песчаники, развитые в долинах по простиранию, необычны в том отношении, что их можно отнести как к прибрежно-морским, так и русловым образованиям. Впервые они были выделены и описаны в пределах Мидконтинента. Вслед за этим геологи описали многочисленные примеры таких песчаников и в других районах. На фиг. 54 показано строение толщи миссисипских отложений в районе нефтяной залежи, где пробурено много скважин. Скважины расположены по сетке 1 скважина на 16,2 га. Карта строилась по данным электрокаротажа, которые имелись для всех контрольных скважин; изолинии проведены через 3 м. Вдоль южной границы закартированного района прослеживается очень узкий, по-видимому антиклинального типа, гребень, который погружается к западу. С севера к нему примыкает узкий, погружающийся к западу асимметричный прогиб. Данная схема не является истинно структурной картой; она скорее всего является сочетанием карты рельефа постемиссипской поверхности и структурной карты, причем последняя отражает

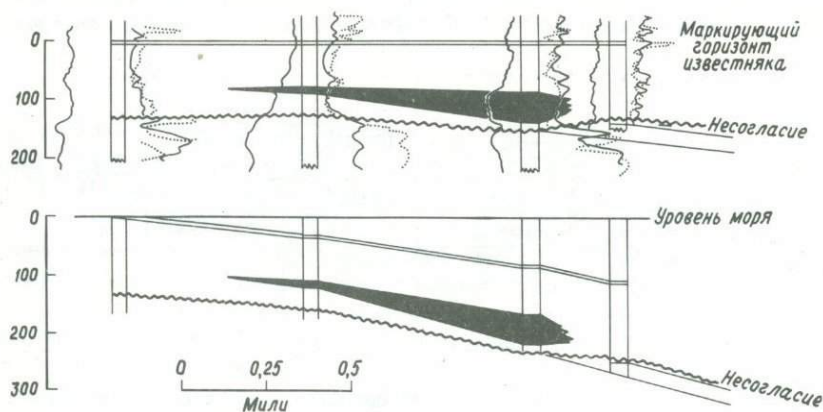


Ф и г. 54. Структурная карта толщи миссисипских отложений, на которой видно положение синклиналичного прогиба, выполненного песчаниками долины по простиранию [42].

Скважины расположены по сетке 1 скважина на 16,2 га; сечение изолинии 10 футов.

наклон толщи в послепенсильванское время. Между характером изображенной поверхности и распространением залегающего на ней линзовидного тела песчаников существует непосредственная связь. Максимальная мощность песчаника составляет 15,2–16,8 м.

На фиг. 55 показаны два меридиональных поперечных разреза одного и того же песчаного тела, к которому приурочена залежь, изображенная на фиг. 54. При построении профиля, расположенного в верхней части фигуры, за условную поверхность отсчета был принят пласт известняка, который является синхронным горизонтом и легко выделяется. Миссисипская поверхность несогласия показана волнистой линией, которая не параллельна маркирующему горизонту известняка. Эта поверхность несогласия по направлению к северу срезает все более и более древние осадки; однако при этом сохранился сложенный устойчивым к выветриванию известняком уступ, расположенный с внутренней стороны бассейна от самой южной продуктивной скважины. Это песчаное тело, закрашенное черным, в поперечном разрезе имеет очень асимметричную, кашлевидную форму. Наблюдаемую связь между песчаным телом, развитым в долине по простиранию, и поверхностью, представляющей собой сочетание топографических и структурных особенностей, следует рассматривать как нечто большее, чем простое совпадение. На нижнем разрезе изображены те же самые условия, что и на верхнем, с той лишь разницей, что при его построении за условную поверхность отсчета принимался уровень моря. Песчаное тело погружается под таким же углом, как и склон миссисипской поверхности несогласия, однако вблизи от обрыва оно резко выклинивается.



Ф и г. 55. Меридиональные поперечные разрезы, на которых показана связь между песчаниками, развитыми в долинах по простиранию, и залегающей ниже миссисипской эрозионной поверхностью несогласия [42].

На фиг. 56 приведена блок-диаграмма, иллюстрирующая условия осадконакопления песчаников, развитых в долинах по простиранию. Когда уровень моря занимал положение 1, береговая линия располагалась в средней части блок-диаграммы, а нижнее песчаное тело (закрашенное черным) формировалось у обрывистого склона более выдвинутого в море гребня. По мере того как поверхность осадконакопления трансгрессировала, береговая линия смещалась справа налево (с юга на север) и сзади следующего, более высокого, обрыва сформировалось второе песчаное тело. Такая диаграмма с очевидностью показывает, что кровля миссисипской толщи не является истинно структурной поверхностью, а представляет собой сочетание структуры и палеорельефа.

Поверхность такого типа в период, когда она оказывалась ниже уровня моря, контролировала размещение и простирание формирующихся линзовидных песчаных тел.

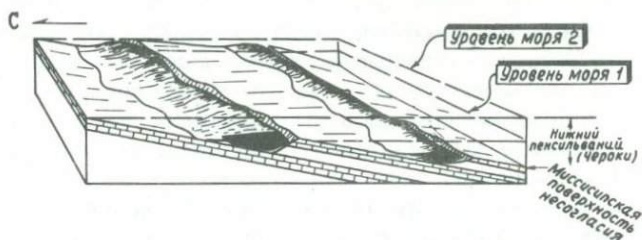
Геометрическая форма песчаных тел этого типа в целом может быть представлена в следующем виде:

1. Протяженность отдельных песчаных тел может достигать многих миль.

2. Ширина песчаных тел может варьировать от 0,8 до 1,5 км и более в зависимости от изменения наклона поверхности осадконакопления.

3. В поперечном разрезе песчаное тело имеет асимметричную двояковыпуклую форму; в сторону моря песчаники резко сменяются глинами, тогда как в сторону суши они постепенно выклиниваются.

4. Обычно встречаются два или несколько параллельных друг другу песчаных тел. Их простирание обычно определяется первичным палеорельефом поверхности осадконакопления, а не современной структурой толщи, залегающей под поверхностью несогласия.



Ф и г. 56. Блок-диаграмма, иллюстрирующая связь между песчаниками, развитыми в долинах по простиранию, и эрозионными уступами, образовавшимися на наклоненной и эродированной миссисипской поверхности [42].

Характеристики песчаных тел: 1 — длина много миль; 2 — ширина 0,8 — 1,5 км; 3 — двояковыпуклые в сечении; 4 — резко обрываются в сторону моря; 5 — постепенно выклиниваются в сторону суши; 6 — наблюдается два или несколько субпараллельных песчаных тел; 7 — простирание контролируется постмиссисипской поверхностью, а не современной структурой подстилающей толщи.

Так как песчаные тела, развитые в долинах по простиранию слоев, формируются в пределах дренирующего русла субсеквентной долины, первоначально они будут наклонены в направлении течения потока. Направление движения потока и угол наклона палеодолины, развитой по простиранию пластов, можно определить путем построения карты изопахит толщи *GIS*; заключенной между синхронным литологическим горизонтом, залегающим выше песчаного тела, и поверхностью несогласия, расположенной ниже его. Мощность такой толщи *GIS* будет систематически увеличиваться вниз по течению потока, а градиент увеличения мощности (приращение мощности на расстоянии 1 км) приблизительно совпадает с палеоградиентом падения долины.

Первый поток, который возникает на поверхности только что претерпевшей поднятие прибрежной равнины, течет в направлении, перпендикулярном береговой линии залива, который примыкает к этой равнине. Такой поток является консеквентным. В результате процессов эрозии, протекающих у его истоков, поток удлинняется, врезааясь как в твердые, так и в мягкие породы. Образующиеся первыми притоки будут размывать более мягкие породы и вливаться в основной (консеквентный) поток преимущественно под прямыми углами. Эти субсеквентные потоки формируют долины, развитые по простиранию пород. Таким образом, два субсеквентных потока могут занять одну и ту же долину, ограниченную уступом, и течь навстречу друг другу. Оба потока могут влиться в консеквентный поток приблизительно в одном и том же месте. Когда позднее в результате трансгрессии моря такая долина, развитая по простиранию пластов, оказывается заполненной песком, песчаное тело может оказаться внутри толщи *GIS*, мощность которой увеличивается в противоположных направлениях. Там, где толщина *GIS* имеет максимальную мощность, можно предположить наличие песчаного тела, образовавшегося в русле потока, текущего вкрест простирания пластов. Наличие руслового песчаника может свидетельствовать о закупорке русла консеквентного потока, что можно объяснить повышением базиса отложения осадков консеквентного потока, поскольку последний постепенно затопляется водами трансгрессирующего моря. Однако происхождение заполненных песком долин, развитых по простиранию пород, объяснить не так легко. Такая долина может заполниться песком в процессе повышения базиса отложения осадков в период трансгрессии моря. Тем не менее происхождение песчаников долин, развитых по простиранию, вероятнее всего, надо связывать с транспортировкой прибрежно-морских песков вдольбереговыми течениями после того, как примыкающая к морю часть суши оказывается заполненной.

В авторитетной статье Мартина [189] детально обсуждается вопрос применения методов реконструкции палеогеоморфологии для практических целей.

Глава 6

РУСЛОВЫЕ ПЕСЧАНИКИ

Различные типы песчаных тел, встречающиеся в недрах, характеризуются обычно двумя свойствами — они вытянуты и в поперечном сечении имеют линзовидную форму. Эти свойства характерны для песчаных тел, сформировавшихся в обстановках оторочек пляжей, низких гряд, долин по простираанию, зон волнового наката, зон приливных течений и палеорусел, а также для некоторых турбидитов и отдельных участков дельт. Из всех перечисленных типов песчаников наиболее необычен русловой тип, главным образом по той причине, что он формируется в субаэральных условиях, а следовательно, его с большим успехом можно наблюдать и изучать на дневной поверхности. В последние годы в печати появилось много статей, посвященных результатам изучения обнажений древних русловых песчаников. Особый интерес представляют работы Фиска [85], Уилсона [293], Линса [183], Сивера [252], Пеппера и др. [208], Холкинса [132], Фридмана [103], Шли и Менча [236], Андресена [56], Поттера [215], Поттера и Петиджона [217] и Бернарда и Мейджера [24].

ДРЕНАЖНЫЕ СИСТЕМЫ

Геологи-нефтяники, изучающие песчаники палеорусел, должны быть знакомы с основами геоморфологии и методами восстановления палеорельефа. Любое отдельное русло почти всегда является составной частью дренажной системы. При анализе какого-либо палеоруслового песчаника обычно выявляются и другие генетически связанные с ним резервуары.

Существуют дренажные системы различных типов. Наиболее обычной является *ветвистая* (dendritic) система дренажа, в которой притоки ответвляются под острыми углами, образуя форму, сходную с ветвями дерева. Такая система развивается, как правило, на однородной, слоистой толще пород, которая довольно однообразно реагирует на процессы выветривания и эрозии. Коренные породы по существу залегают горизонтально и представлены осадками однообразного литологического состава. В *сетчатой* (trellis)

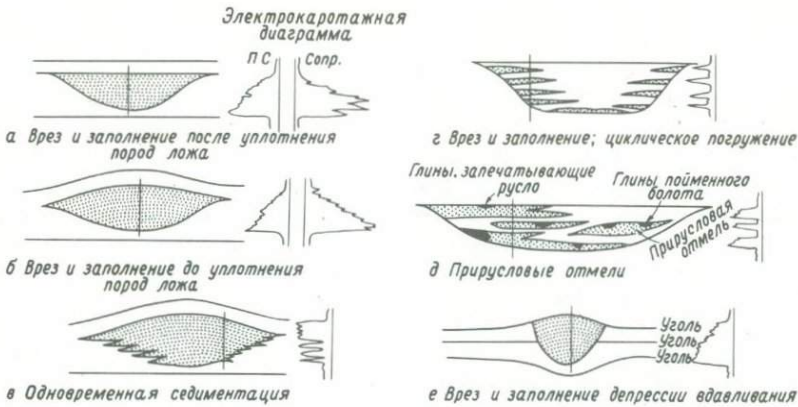
системе дренажа субпараллельные потоки ориентированы согласно простиранию пород, которые либо испытали региональный наклон, либо были смяты в складки. В результате такого наклона на дневной поверхности обнажились переслаивающиеся твердые и мягкие слои, а субпараллельные дренажные русла оказались врезанными в более мягкие породы. *Прямоугольная* (rectangular) система дренажа напоминает сетчатую систему, за тем исключением, что притоки соединяются с основным руслом по существу под прямым углом. В этом случае основной поток прорезает свое русло как в твердых, так и в мягких породах, которые задолго до этого испытали наклон. К отдельным потокам, являющимся составными частями прямоугольной дренажной системы, применимы такие термины, как *консеквентные*, *субсеквентные*, *ресековентные* и *обсеквентные*. О важности выявления этих типов потоков говорится в работе Мартина [189]. В *крючкообразной* (barbed) системе притоки соединяются с основным руслом под углами, превышающими 90° . Это довольно необычный случай. В районах с "волнистым" рельефом, например там, где имеется донная, рецессионная или конечная морена, при отсутствии систематического контроля, не считая изначальных депрессий на первичной поверхности, может сформироваться *беспорядочная* (deranged) система дренажа. Такой тип дренажа не играет существенной роли при изучении палеорусел. Другими необычными типами дренажа являются *центростремительная* (centripetal), *радиальная* (radial) и *кольцевая* (annular) системы. К числу наиболее обычных систем палеодренажа относятся ветвистая, сетчатая и прямоугольная.

Отдельные русла могут быть прямыми, искривленными, изогнутыми, меандрирующими, анастомозирующими¹⁾ или петляющими; они также могут представлять собой дельтовые системы. Последняя разновидность настолько важна, что требует самостоятельного рассмотрения. По данным бурения и геофизики обычно удается установить не только тип дренажной системы, но также получить информацию о палеоградиенте и направлении потока. Практическая ценность такой информации рассматривается ниже при анализе русловых песчаников.

РАЗРЕЗЫ ДРЕВНИХ РУСЛОВЫХ ПЕСЧАНИКОВ

Для выявления и прослеживания древних русловых песчаников геолог-поисковик должен быть широко осведомлен относительно всех известных разновидностей поперечных профилей песчаных тел и методов их оконтуривания и проецирования. На фиг. 57 схемати-

¹⁾Соединяющимися и вновь разъединяющимися. — Прим. перев.



Ф и г. 57. Схематические диаграммы шести типов заполнения русел.
 ПС — спонтанная поляризация; Сопр. — сопротивление.

чески изображено шесть вариантов заполнения русел и их обычное отображение на электрокаротажных диаграммах. Сушность каждого из них следует описать подробно.

Врезание и заполнение на уплотненном ложе. На фиг. 57,а приведен профиль песчаного тела заполнения русла, которое образовалось в породах, полностью уплотнившихся (под воздействием вышележащих осадков) до начала воздымания и эрозии. Русло заполнено либо неуплотняющимся песком, либо песком и гравием. Там, где подстилающие и прилегающие с боков породы (обычно глины) были предварительно уплотнены, толща заполнения в разрезе характеризуется плоской-выпуклой формой даже после того, как накопилась значительная мощность перекрывающих осадков. Форма записи на электрокаротажных диаграммах напоминает колокол, свидетельствуя о резком базальном контакте более грубозернистого обломочного материала с подстилающими породами. Вверх по разрезу размер зерен обычно уменьшается. Верхняя часть толщи заполнения может быть представлена либо алевритами, постепенно переходящими в глины, либо переслаиванием мелкозернистых песчанников и глин. В любом случае верхнюю границу толщи заполнения обычно трудно установить по каротажу. Электрокаротажные диаграммы следует использовать как вспомогательный материал; ни в коем случае их нельзя рассматривать в качестве единственного критерия выделения русловых песчанников в разрезе.

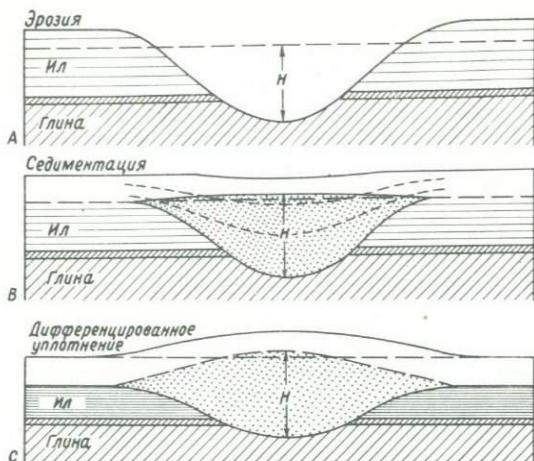
Тело заполнения может слагаться как горизонтально-слоистым так и косослоистым песчанником. В его основании обычно залегает

галечниковый конгломерат, а остальная часть сложена чрезвычайно мелкозернистым песчаником. Песчаник более грубозернистой текстуры и галечниковый конгломерат также могут быть развиты в различных участках в пределах основной части тела заполнения. Сортированность варьирует от плохой до хорошей. Во многих местах толща заполнения представлена разобшенными зонами хорошо или плохо отсортированных песчаников, переслаивающихся с алевролитами. Некоторая часть толщи руслового заполнения может быть также представлена отчетливыми "прослоями" и карманами глин. Известны примеры, когда вся толща заполнения сложена глинами и алевростыми глинами. В этом случае данные электрокаротажа для целей идентификации имеют очень ограниченное значение и не следует принимать во внимание колоколовидную форму записи. Однако, если русло, выполненное глинами, врезано в толщу, сложенную преимущественно песчаником или известняком, его можно выявить с помощью электрокаротажа.

Врезание и заполнение до уплотнения пород ложа. На фиг. 57, б показан профиль песчаного тела заполнения русла, который образуется в том случае, если русло врезается до или в процессе уплотнения пород ложа. Параметры, характеризующие материал толщи заполнения, обычно аналогичны указанным для случая заполнения после уплотнения пород ложа (фиг. 57, а). Каротажная диаграмма, подобная изображенной на фиг. 57, а, указывает, что материал заполнения представлен в основном песчаником. Анализ захороненных песчаников данного типа осложняется проявлением дифференцированного уплотнения. Вследствие давления вышележащих толщ пески уплотняются лишь очень незначительно или совсем не уплотняются, в то время как латерально прилегающие к ним глины могут уплотняться на 45-55% от их первоначальной мощности.

На фиг. 58 приведена схема, показывающая различные стадии образования профиля данного типа песчаного тела заполнения русла. На стадии А русло врезалось в частично уплотненные илы и глины. На стадии В это русло заполнилось песком до высоты *H* и вся площадь перекрылась маломощным слоем осадков. Изогнутые вниз пунктирные линии, соответствующие изохронам, показывают, что верхняя часть перекрывающего слоя отлагалась одновременно с русловыми песками.

На стадии С русло полностью заполнилось песком, а латерально прилегающие к нему илы и глины уплотнились приблизительно до двух третей от их первоначальной мощности. О том, что дифференцированное уплотнение протекало одновременно с заполнением русла и накоплением перекрывающих осадков, свидетельствует слабое утонение перекрывающего слоя на участке непосредственно выше зоны максимальной мощности песков. Наиболее примечательной чер-



Ф и г. 58. Схематическое изображение стадий эрозии, седиментации и дифференцированного уплотнения осадков, связанных с русловым песчаником.

той этой иллюстрации является то обстоятельство, что увеличение мощности песков происходит в основном за счет подстилающих илов и глин, а не за счет вышележащих слоев. Это диагностический критерий для установления русловых песчаников в разрезе. Только по одному этому признаку обычно удается отличить песчаники заполнения русла от баровых. Для последних обычно характерно увеличение мощности в основном за счет утонения перекрывающих осадков. В процессе такого анализа лучше всего выбирать для сопоставления коротажные диаграммы близко расположенных друг от друга скважин с резко контрастирующей мощностью песчаников. Если в качестве репера для построения палеотектонического профиля принят маркирующий пласт определенного литологического типа, залегающий ниже тела заполнения, то аналогичный маркирующий горизонт, залегающий близко над этим телом, будет изогнут вверх (вследствие дифференцированного уплотнения), если данное тело заполнения сложено в основном песчаниками. Однако мощность интервала глин, отделяющих кровлю песчаников от верхнего маркирующего горизонта, будет оставаться постоянной, если не считать локального уменьшения мощности непосредственно над участком наибольшей мощности песчаной линзы.

Обычно более целесообразно восстановить первоначальный профиль линзы песчаника; эта процедура выполняется путем подбора соответствующего литологического репера выше песчаного тела. Таким способом устанавливают первоначальное залегание исходно-

го репера, а кровля руслового песчаника соответственно спрямляется. Такая методика восстановления первоначального профиля песчаника, однако, приводит к тому, что положение на профиле литологического репера, залегающего несколько ниже песчаника, окажется искаженным; он изогнется вниз. Независимо от того, выбирается ли исходный репер выше или ниже линзы руслового песчаника, мощность самого песчаника наращивается в основном за счет подстилающих осадков.

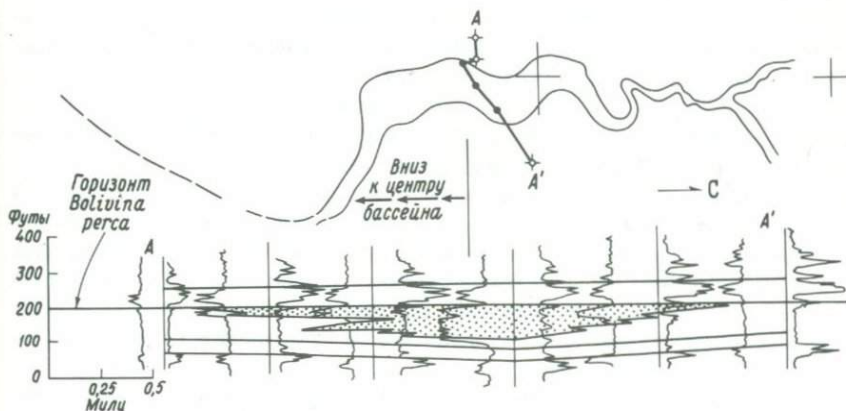
Совместная седиментация. На фиг. 57, *а* показан пример совместной седиментации, когда русло заполняется песком одновременно с накоплением илов и алевритов на сопредельных участках. Диагностические критерии выделения этого типа руслового заполнения аналогичны критериям для случая вреза и заполнения до уплотнения ложа (фиг. 57, *б*); в дополнение к этому для него характерно переслаивание алевритистых песчаников с латерально прилегающими глинистыми сланцами. Данные электрокаротажа свидетельствуют о переслаивании песчаников и глин в базальной части тела заполнения и о преимущественном развитии песчаников в верхней его части. Однако если скважина случайно окажется в центре русла, то диаграммы электрокаротажа зарегистрируют одни песчаники.

Для развития этого типа руслового заполнения благоприятны две обстановки осадконакопления. Одна из них — область поверхностных наносов дельты, где, как правило, развиты протоки. Поскольку отдели в пределах русла периодически затопляются, в тыловой части заболоченной поймы в межпроточных зонах образуется маломощный покров алевритов и глин. Таким образом, дельтовая равнина формируется одновременно с заполнением протоков песками. Такие русловые пески не следует смешивать с песками пальцевидных баров, описанных Фиском [89] для дельты типа птичьей лапки реки Миссисипи.

Другая обстановка, в которой формируется данный тип тел заполнения, характерна для районов, где разгрузка континентальных осадков происходит в зоне мелководного моря и они отлагаются на неровной подводной поверхности. Так, например, известно, что в третичный и четвертичный периоды на дне мелководных участков Мексиканского залива происходил рост многочисленных структур, которые обусловили неровность подводного рельефа и в свою очередь явились причиной локализации разгрузки водных потоков между подводными возвышенностями и по их периферии. Осадки, транспортируемые через подводные "понижения", были представлены песками, алевритами и глинами. Песчаный материал отлагался в понижениях и переслаивался с глинисто-алевроитовыми осадками, отлагающимися в условия более спокойных вод, как по окраинам понижений, так и поверх седловин, разделяющих понижения. Различ-

ный объем разгрузки приводил к чередованию по горизонтали русловых песчаников с глинами и алевритами. Данная система протоков по существу не является истинной дельтой, а представляет собой случайное явление, обусловленное неравномерным развитием в подводном рельефе возвышенностей.

Прекрасный пример влияния роста структур на формирование сингенетичного тела руслового заполнения приведен на фиг. 59. Тело заполнения подводного русла фиксируется непосредственно под фаунистической зоной *Bolivina perca*, которая выбрана в качестве опорного репера. Данный репер точно совпадает с подошвой маркирующего горизонта глинистых сланцев. Мощности слоев над песчаным телом отличаются постоянством. В базальной части песчаники переслаиваются с латерально прилегающими глинами и мощность песчаного резервуара Анахуак возрастает за счет подстилающих глинистых сланцев. Поскольку первоначальное горизонтальное залегание репера *Bolivina perca* восстановлено произвольно, два маркирующих горизонта ниже линзовидного песчаника изогнуты вниз. Отсутствие параллелизма между этими двумя маркирующими горизонтами, расположенными ниже репера *Bolivina perca*, достаточно убедительно объясняется различной степенью уплотнения глинистых сланцев, латерально прилегающих к русловому песчанику. Горизонтальные контуры нефтяной залежи, приуроченной к песчаникам Анахуак, показаны в верхней части фиг. 59. Залежь имеет конфигурацию русла, ориентированного на юг, к области разгрузки. Это русло можно проследить к югу на значительное расстояние.



Ф и г. 59. Разрез руслового песчаника Анахуак (олигоцен — миоцен), округ Акейдия, Луизиана, составленный по реперу *Bolivina perca*.

Построен на основании данных Слингерланда [устное сообщение, 1967].

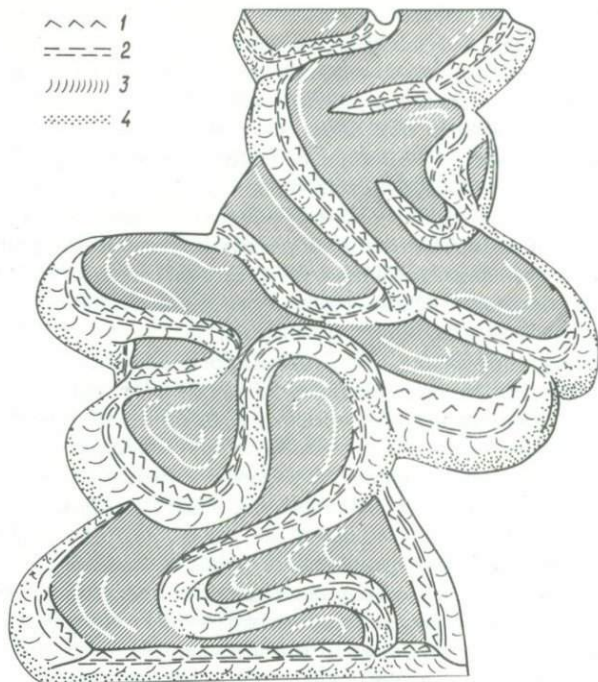
Карту изопахит толщи непрерывного наращивания мощности для этой территории можно построить, приняв репер *Bolivina perca* в качестве верхнего маркирующего слоя и любой из маркирующих горизонтов, залегающих ниже песчаника, в качестве нижней границы толщи. Участки максимальной мощности на такой карте будут совпадать с максимумом развития песчаников Анахуак. В целом толща *GIS* по обе стороны песчаника представлена глинами. Этот интервал глин будет иметь минимальную мощность над поднятиями, которые образовались на морском ложе в процессе накопления осадков Анахуак. Фиксируя различия мощности толщи *GIS*, удастся воссоздать подводный рельеф, который существовал в процессе формирования песчаника Анахуак. Естественно, что песчаники отлагались на участках понижений (наибольшая мощность *GIS*). Не следует ожидать, что залежи нефти и газа будут встречены повсеместно, где развиты песчаники Анахуак. Скорее всего они приурочены к участкам песчаников, ограниченными вверх по восстановлению куполовидными структурами или сбросами. Поэтому структурную карту, построенную по реперу *Bolivina perca*, следует наложить на карту предполагаемого развития песчаников Анахуак, что послужит основой для выявления в этой формации литологических ловушек.

Врезание и заполнение при циклическом (прерывистом) погружении. Наиболее необычные условия руслового заполнения показаны на фиг. 57, 1. Русло имеет сечение блюдца, свидетельствующее о его зрелости. Материал руслового заполнения представлен преимущественно глинами и алевролитистыми глинами, которые на склонах русла прерываются несколькими парами песчаных тел, выклинивающихся к центру русла. Линза песчаника может также наблюдаться в подошве русла. Клинья песчаников по обоим сторонам русла характеризуются кулисообразным расположением по отношению друг к другу и разделены отчетливыми прослоями глин. По направлению к верховьям русла появляются клинья, занимающие более высокое стратиграфическое положение, и постепенно исчезают клинья, залегающие стратиграфически ниже. На электрокаротажной диаграмме скважины, пробуренной на краю такого русла, будет фиксироваться несколько маломощных песчаников, разделенных "прослоями" глин. На электрокаротажной диаграмме скважины, пробуренной в центральной части русла, обычно фиксируется единое песчаное тело, развитое в подошве толщи заполнения и залегающее на поверхности несогласия.

Приуроченность песчаников к бортам долины объясняется воздействием специфической комбинации условий осадконакопления. Сразу же после образования широкой поймы, врезанной в мягкие глины, на всей территории имела место циклическая морская трансгрессия. Поток, который образовал эту широкую долину, переносил

значительно больший объем алевроитов и илов, нежели песков. В периоды стабилизации береговой линии по обеим бортам затопленной долины отлагались окаймляющие пляжевые пески, которые возможно, сформировались в результате рассеивания волнами осадков, поставляемых в пойму в основном за счет медленного размывания террас. Только очень ограниченные участки таких линзовидных песчаников могли оказаться ловушками для углеводородов. Методы изучения трендов и закономерностей распространения песчаников такого типа, а также проблемы выбора объектов для постановки бурения в таких условиях детально рассмотрены на примере песчаников Мадди, бассейн Паудер-Ривер, северо-восточный Вайоминг [см. главу "Примеры древних палеорусел"] .

Прирусловая отмель. Для любого потока, достигшего профиля равновесия, когда осадконакопление и эрозия протекают одновременно, характерно образование прирусловых отмелей. Последние формируются за счет намыва и при меандрировании потоков. Такие отмели образуются на выпуклом склоне меандрирующего русла, где скорость потока минимальна. Разрез осадков, образовавшихся в этих условиях, показан на фиг. 57, *д*. За определенный отрезок времени радиусы кривизны отдельных меандр уменьшаются по мере латерального перемещения русла за пределы излучины. Одновременно, но в меньшей степени отдельные меандры мигрируют в направлении склона поймы, которую они образуют. Многие петляющие меандры в стадии половежья отчленяются и таким образом теряют связь с основным дренажным руслом. Такие изолированные меандры становятся старицами, в которых позднее аккумулируются алевроиты, илы и растительный материал. На ранних этапах развития меандр одиночные отмели имеют форму полумесяца и располагаются уступообразно по обеим сторонам русла. По мере того как отдельные меандры приобретают форму открытой петли, прирусловые отмели теряют вид полумесяца и их очертания становятся неправильными, как показано на фиг. 60. Эта фигура представляет собой схему действующей модели, на которой изображена сложная система прирусловых отмелей чрезвычайно неправильных очертаний. Такую же систему можно встретить в захороненных толщах. Ширина пояса меандр гораздо больше петли любой из меандр данного русла. Сложность поисков залежей нефти и газа в коллекторах данного типа лучше всего представить, если наклонить модель таким образом, чтобы нефть и газ могли мигрировать вверх по восстанию и аккумулироваться в наиболее высоко расположенных частях каждой из многочисленных прирусловых отмелей. В основании данной модели залегает регионально выдержанный пласт слабослоистых грубозернистых песчаников или конгломератов. Таким образом, модель должна представлять собой единую гидродинами-



Ф и г. 60. Зарисовка модели гипотетического пояса меандр, показывающая, как может возникнуть сложный песчаный коллектор прирусловой отмели с пробками русловых глин.

Характер распределения типов слоистости показан схематично. Зональность заключается в последовательной смене типов слоистости. Одна или несколько верхних зон могли быть эродированы на поздних стадиях развития меандр, и на их месте могла отложиться новая толща, состоящая из одного или нескольких ритмов. Модель изготовлена Варне [устное сообщение, 1967]. 1 — мелкая струйчатость; 2 — горизонтальная слоистость; 3 — косая слоистость с гигантской струйчатостью; 4 — массивные и слабо слоистые осадки.

ческую систему. Ни одна пара залежей не будет иметь одинаковые контуры, и верхние границы в каждом случае следует устанавливать по характеру извилистости русла, заполненного непроницаемыми илами.

Несмотря на неправильные в плане очертания песчаного коллектора данного типа, в разрезе большинство таких прирусловых отмелей независимо от их геологического возраста можно легко установить по единичным неориентированным образцам керна. Характерно, что в разрезе прирусловая отмель представлена четырьмя зонами (фиг. 61), которые снизу вверх представлены: 1) слабо сло-



Ф и г. 61. Схематический разрез прирусловой отмели, на котором показаны четыре отчетливые зоны, образовавшиеся при различных энергетических уровнях потока.

В целом, размерность зерен осадков уменьшается вверх по разрезу. Обычно наблюдается повторяемость слоистых серий, иногда в разрезе встречаются прослой гальки.

истыми песками или гравием; 2) пачкой, характеризующейся косою слоистостью и наличием гигантской струйчатости; 3) горизонтально-слоистыми пластами и 4) осадками с мелкой струйчатостью.

Для базальной зоны слабо слоистого песка и гравия характерны наиболее крупные размеры зерен из четырех зон прирусловой отмели. Диапазон зернистости чрезвычайно широкий (от алевритистых частиц до валунов), что обусловлено размером обломочного материала, находящегося в пределах данной дренажной системы. Определенную роль в установлении диапазона размерности частиц этой зоны играют и такие параметры, как градиент потока, состав обломочного материала, объем потока и т.д. Наиболее обычными осадками этой зоны являются средне- и крупнозернистый песок и галька.

Зона косою слоистости с гигантской струйчатостью начинается непосредственно над нормальным низким уровнем вод потока, и образующий ее материал отлагается на выпуклых сторонах меандр в период высокой воды. Мощность отдельных косою слоев варьирует от дюймов до нескольких футов. В керне из этой зоны обычно встречаются включения глин и углефицированные обломки растений. Кровля этой зоны, как правило, представляет поверхность эрозионного вреза, выше которой непосредственно залегает зона горизонтально-слоистых осадков.

Зона горизонтально-слоистых осадков формировалась в течение периодически повторяющихся паводков, когда поток распространялся за пределы своего обычного русла. Как правило, она представлена очень хорошо отсортированными, мелкозернистыми песками или алевритами. В керне также встречаются глинистые конкреции неправильной формы и углефицированные стебли и листья растений. В коллекторах этой зоны латеральная проницаемость выше вертикальной, что обусловлено наличием слоистости.

Зона с мелкой струйчатостью формировалась только в периоды широких разливов и обычно имеет наибольшую мощность из всех четырех зон прирусловой отмели. Слагающие ее осадки характеризуются наиболее хорошей сортированностью и мелкозернистостью (мелкозернистые и тонкозернистые пески). Лишь изредка амплитуда отдельных струй достигает 0,32–0,64 см. В керне встречаются неправильные глинистые конкреции и углефицированные стебли и листья растений. Горизонтальная и вертикальная проницаемость обычно одинакова.

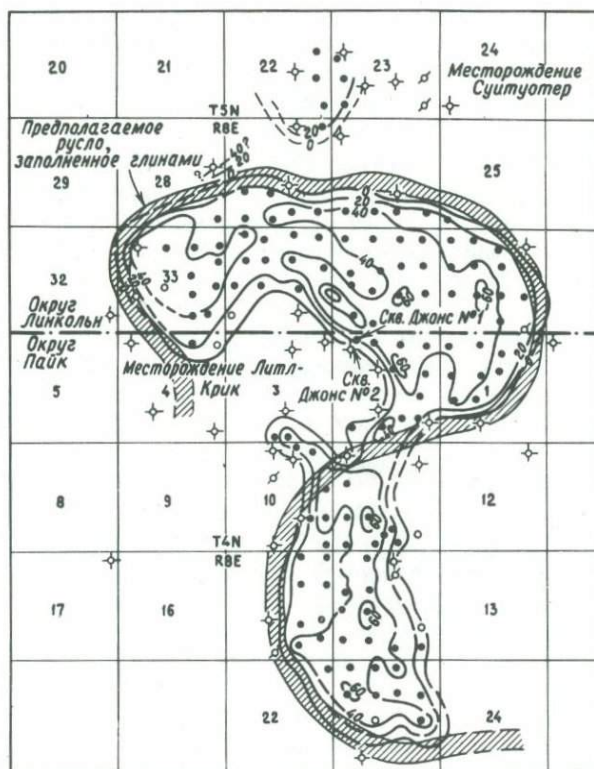
В ряде случаев обычная последовательность разреза прирусловой отмели прерывается вследствие присутствия базальной неотчетливо слоистой зоны песков и гравия, залегающей несогласно либо на зоне горизонтально-слоистых осадков, либо на зоне мелкой струйчатости. Такое нарушение последовательности разреза рассматривается как результат частичной эрозии обычного разреза отмели на более поздней стадии латеральной эрозии и седиментации при меандрировании потока. В других случаях в одной скважине можно зафиксировать неоднократное повторение полного ритма. Такое явление наблюдалось в палеорусле бассейна Маракайбо, Венесуэла.

Кривая ПС (спонтанная поляризация) на электрокаротажной диаграмме скважины, вскрывшей разрез прирусловой отмели, обычно имеет колоколовидную форму, обусловленную уменьшением вверх по разрезу размеров зерен осадков, сопровождающимся увеличением глинистости. Изменение этих параметров согласуются с тем известным фактом, что по направлению вверх через все четыре рассмотренные литологические зоны разреза наблюдается постепенное снижение энергетической активности среды седиментации.

Поскольку прирусловые отмели составляют только какую-то часть от общего осадочного выполнения пойм, их довольно трудно выделить при анализе разрезов. Хотя предстоит еще много работы в области разработки методов поисков таких резервуаров, тем не менее известны некоторые приемы, позволяющие идентифицировать их в разрезе. Установлено, что прирусловые отмели в единичном, неориентированном керне можно распознать по вышеописанной зональности четырех циклов. На карте изопахит такого песчаного тела будет отмечаться резкое уменьшение мощности к тому краю, где оно контактирует с глинистым материалом заполнения русла. По периферии резервуара прирусловой отмели будет фиксироваться одна или несколько плавно изогнутых линий, проведенных по непродуктивным скважинам, расположенным непосредственно за пределами залежи. На карте изопахит интервала глин между кровлей песчаника и выбранным литологическим репером выше песчаника отмечаются резкие изменения мощности, обусловленные различной степенью уплотнения алевритов и глин в меандрирующих руслах.

На структурной карте, построенной по этому реперу, фиксируется эффект обволакивания песчаного тела. Другие методы поисков таких резервуаров в настоящее время находятся в стадии разработки, их еще необходимо испытать и проверить перед тем как опубликовать в печати.

Месторождение Литл-Крик, округа Линкольн и Пайк, штат Миссисипи, характеризуется геометрическими особенностями, типичными для прирусловой отмели. Суммарные запасы этого месторождения, которое приурочено к нижней части песчаников Таскалуса (верхний мел), составляют 3,4 млн. т нефти [76]. На фиг. 62 приведена карта изопакит продуктивного песчаника указанной залежи [76], на которой видно чрезвычайное непостоянство формы и



Ф и г. 62. Карта изопакит песчаников Денкман, месторождение Литл-Крик, округа Линкольн и Пайк, штат Миссисипи, на которой показано местоположение и простираение предполагаемого русла, заполненного глинами [76].

Сечение изопакит 20 футов.

мощности песчаника. Особую важность представляет тот факт, что непродуктивные скважины концентрируются близко от границы залежи. Песчаники мощностью 6 – 14 м сменяются глинистыми сланцами между скважинами, каждая из которых характеризует площадь 40 000 м². Эйзенштатт [76] отмечал, что "в одной скважине мощность песчаника" может быть достаточно большой, а в другой, отстоящей всего на несколько футов, он может совсем отсутствовать. Данное явление повлияло на методику разведки месторождения, поскольку многие скважины были пробурены по принятой сетке с целью обнаружения края песчаного тела на площади 160 000 м². На фиг. 63 приведены электрокаротажные диаграммы по скважинам, расположенным на расстоянии 200 м. Песчаник Денкман¹⁾ (продуктивный горизонт толщи Таскалуса), зафиксированный в скважине Джонс № 2, полностью отсутствует в скважине Джонс № 1. Эти две скважины показаны на фиг. 62. На эту фигуру автором были нанесены местоположение и простираение предполагаемого русла, заполненного глинами. На фиг. 64 изображена структурная карта, составленная Эйзенштаттом [76] с учетом его трактовки конфигурации песчаников Нижняя Таскалуса. Он отмечал: "Судя по имеющимся данным, здесь мы видим структурный нос, полого погружающийся к югу. Обратный региональный наклон на север амплитудой всего лишь 9 м фиксируется на участке от наиболее высоко расположенной в структурном отношении скважины до наиболее погруженной части продуктивного горизонта. Однако высота нефтяной колонны достигает 35 м. Исходя из этого, можно заключить, что здесь мы имеем дело с комбинированной ловушкой – структурно-литологической".



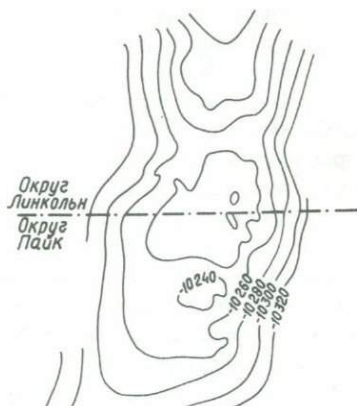
Фиг. 63. Стратиграфический разрез песчаников Нижняя Таскалуса, месторождение Литл-Крик, округ Пайк, штат Миссисипи [76].

Между двумя скважинами, отстоящими друг от друга на 75 м, песчаник Денкман резко выклинивается.

¹⁾ Этот песчаник не следует путать с песчаным горизонтом Денкман юрского возраста формации Норфлет, который также является продуктивным коллектором в рассматриваемом районе.

Ф и г. 64. Структурная карта кровли песчаников Нижняя Гаскалуса, месторождение Литл-Крик, округа Линкольн и Пайк, штат Миссисипи [76].

Сечение изогипс 20 футов.

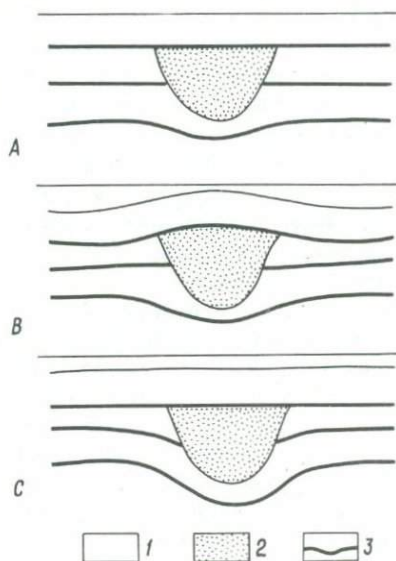


Врезание и заполнение при развитии депрессии вдавливания. На фиг. 57, *e* показан последний тип русла, когда врез и заполнение протекают совместно с развитием депрессии вдавливания. Этот пример и теоретическое обоснование взяты автором в основном из неопубликованной работы Бернхэма [40]. Стратиграфический интервал, охватывающий горизонты от *I4* до *K*, соответствует части разреза песчаников Офисина, отложившейся на шельфе южного склона структурного бассейна западной Венесуэлы. Накопление толщи Офисина происходило в болотных, лагунных и солоноватоводных морских условиях, благоприятных для образования мощных масс торфа, переходящего в угли. Для такой обстановки характерны неоднократные циклические изменения уровня моря или положения суши, что привело к развитию мощной толщи переслаивающихся между собой глин и крупнозернистых обломочных образований. Эта площадь представляла собой участки дельтовой системы с множеством рукавов, которые отлагали осадочный материал частично в субаэральной обстановке берега, а частично в чрезвычайно мелководных субаквальных условиях. Многочисленные сподчиненные русла врезались в толщу полуконсолидированных илов. Бернхэм отмечал:

"С незначительным подъемом относительного уровня воды скорость течения в размываемых руслах должна снижаться, а сами русла засыпаться песками, поступающими из тыловой области песчаных баров, расположенных в устье. Это должно приводить к «запечатыванию русла хорошо отсортированными песками, в результате чего образуются узкие мощные песчаные тела, типичные для мелководной дельты» [Фиск]. В итоге русло оказывается почти запруженным чистым, хорошо отсортированным песком, выше которого медленно текущими потоками отлагаются алевролиты и алевролитистые глины".

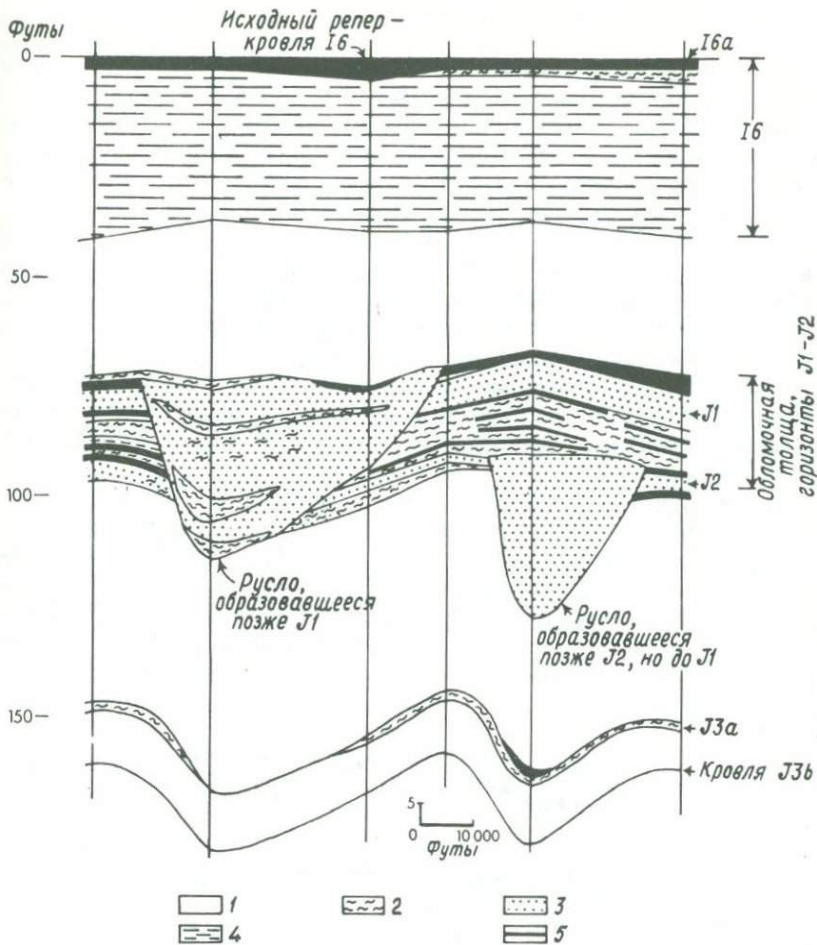
Бернхэм указывал, что эти русловые пески "... моложе, чем исчезающие корреляционные маркирующие горизонты, которые они денудируют и замешают". Особое внимание он обращал на тот факт, что ключевые маркирующие горизонты, такие, как лигниты, под телями мощных русловых песков прогибались, или провисали. Такое провисание подстилающих слоев происходит без значительного сокращения их мощности, за исключением тех участков, где они были эродированы. На фиг. 57, *e* только один средний из трех лигнитовых слоев не деформирован. Верхний слой лигнита изогнут вверх в силу неодинаковой степени уплотненности глин, латерально смежных с песчаной толщей заполнения русла, в то время как нижний лигнитовый слой прогнут под воздействием концентрированной нагрузки песка, залегающего непосредственно над ним. Стадии развития данного типа депрессий вдавливания показаны на фиг. 65. Бернхэм [40] предполагал, "что они развивались на полуконсолидированных осадках, а не на мягких глинах, как указывал Фиск. В полууплотнившихся осадках напряжение должно было передаваться вертикально и горизонтально, обуславливая провисание, а не уплотнение или течение".

На фиг. 66 приведен стратиграфический разрез толщи мощностью 53 м, составленный по материалам шести скважин. В качестве исходного репера принят горизонт лигнита 16, расположенный сверху разреза. Алевролит 13а и кровля горизонта 13б резко прогнуты под воздействием уплотняющей нагрузки на участках, расположенных непосредственно под двумя глубокими, заполненными



Фиг. 65. Стадии развития депрессии вдавливания, связанной с русловым заполнением [40].

1 — глины; 2 — песчаники; 3 — лигниты.



Ф и г. 66. Стратиграфический разрез части формации Офисина в районе Ист-Мапери, бассейн Маракайбо, Венесуэла, на котором можно видеть провисание горизонта J3a и кровли горизонта J3b под участками максимальной мощности руслового заполнения [40].

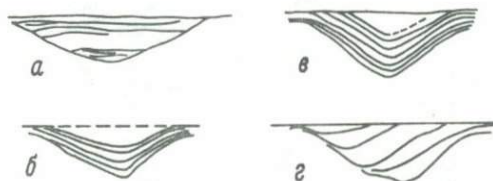
1 - глины; 2 - алевролиты; 3 - песчаники; 4 - коррелирующие глины или глины среди кластических осадков; 5 - лигниты.

песками руслами. По мнению автора, такое прогибание маркирующих слоев под телами руслового заполнения более характерно для дельтовых условий, где в большем объеме отлагаются продельтовые илы, чем для сугубо субаральной обстановки седиментации.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА

Ранее указывалось на значительное разнообразие типов осадков, которые могут отлагаться в пределах русел. Действительно, практически каждый тип осадочной породы, за исключением эвапоритов, можно встретить в телах руслового заполнения. Размер зерен, степень сортированности и характер косой слоистости почти настолько разнообразны, как и литологический состав. Мак-Ки [194] в опытах с искусственными желобами удалось получить некоторую информацию относительно факторов, обуславливающих стратификацию. В этих опытах моделировался процесс заполнения осадками русел, образованных потоками и подводными течениями. Отмечалось, что "... русла, образованные потоками, характеризуются уплощенным дном, крутыми или отвесными берегами и мелководностью". Для русел, образованных подводными течениями, "... характерно полуокруглое сечение как следствие постоянного оползания стенок под воздействием воды".

Эти эксперименты выявили значение уровня воды как диагностического фактора формирования косой слоистости в осадках руслового заполнения. Мак-Ки [194] показал, что "... там, где поток отлагает осадок на дне русла, либо в результате увеличения его нагрузки, либо вследствие снижения скорости слоистость по существу горизонтальна и повторяет упрощенный профиль дна русла, вымываемого потоком". Эта ситуация изображена на фиг. 67, а, которая вычерчена по фотографии, включенной в статью Мак-Ки. В



Ф и г. 67. Зарисовки фотоснимков, характеризующих типы стратификации руслового заполнения, полученные при экспериментах.

а — мульдовая косая слоистость, образованная в процессе отложения осадков потоком. Поверхность воды в течение большей части процесса оставалась ниже границ русла; б — симметрично заполненное русло. Мощность слоев увеличивается в направлении к центральной, наиболее глубокой, части русла. Русло образовано потоком и видоизменено вследствие подъема уровня воды; заполнено материалом, перемещавшимся подводным течением вниз вдоль русла; в — симметрично заполненное русло. Русло вымыто потоком и видоизменено в результате подъема уровня воды. Седиментация происходила путем оседания частиц из спокойной воды; г — асимметрично заполненное русло. Русло прорезано потоком, видоизменено в результате подъема уровня вод и заполнено материалом подводного течения, перемещавшимся по диагонали к направлению русла [193].

полностью заполненном водой русле слоистость русловых осадков может образовывать выпуклость вниз. Мак-Ки отмечал, что "... степень изгиба обусловлена глубиной русла, в котором происходила седиментация". Эта ситуация изображена на фиг. 67, б; мощность отдельных пластов, показанных на этой фигуре, возрастает в направлении к осевой части толщи руслового заполнения.

В другом эксперименте Мак-Ки обломочный материал осаждался вертикально в спокойной толще воды, заполнявшей эродированное русло. В этом случае (фиг. 67, в) отмечалось лишь очень незначительное увеличение мощности отдельных слоев по направлению к оси. В процессе седиментации слои более или менее выдержанной мощности заполняли русло, постепенно уменьшая его ширину и глубину. В последнем опыте Мак-Ки подводное течение ориентировалось по диагонали к руслу, в результате чего заполнение его носило очень асимметричный характер (фиг. 67, г). Такая асимметрия косой слоистости, возможно, должна развиваться на внутренней стороне подводных меандр потока по периферии растущих структур.

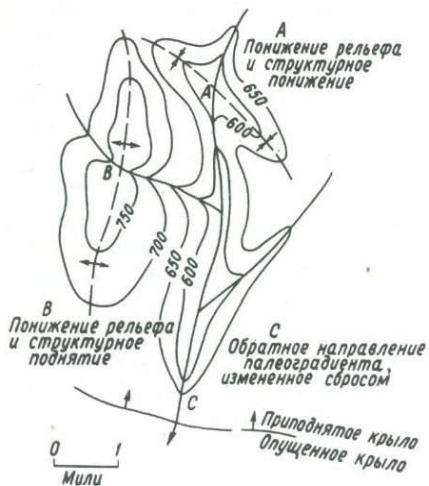
Для того чтобы результаты лабораторных исследований увязать с реально существующими условиями, необходимо помнить ряд обстоятельств. Во-первых, практически все русловые песчаники (за исключением тех, что отлагались в дельтах и по периферии подводных возвышенностей) отлагаются в субаэральной обстановке. Следовательно, к вариациям ситуации, изображенной на фиг. 67, а, следует относить те русловые образования, где наблюдается косая слоистость. Во-вторых, условия, в которых возникает тип слоистости, показанный на фиг. 67, в, должны приводить к отложению глин и алевроитов, а не песков. Только алевроит и глина могли осаждаться из суспензии верхнего слоя спокойной толщи воды, заполняющей эродированное русло, поскольку для транспортировки песчаного материала требуется скорость 0,9–1,8 км/ч. Поэтому русловое заполнение этого типа не будет рассматриваться в качестве потенциальной ловушки для аккумуляции промышленных залежей нефти и газа. В-третьих, типы слоистости, приведенные на фиг. 67, б и 67, г, будут характерны для отложений дельтовых проток (но не для песчаников пальцевидных баров) и песчаников мелководных русел, отлагавшихся по периферии подводных возвышенностей. В обеих ситуациях подстилающие толщи скорее всего будут представлены глинами и алевроитистыми глинами, которые под тяжестью вышележащих осадков будут уплотняться неравномерно. Следовательно, любой седиментационный наклон русловых песчаников должен измениться (стать более горизонтальным) в такой степени, в какой латерально прилегающие глинистые сланцы уплотняются под весом перекрывающей толщи.

МЕТОДЫ КАРТИРОВАНИЯ ПАЛЕОДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ

Методы выделения и трассирования русловых отложений в разрезе плохо освещены в печати. Однако работа Андресена [6] заслуживает внимания, и на ней следует остановиться подробнее. Андресен предложил четыре метода выявления и трассирования осевых частей долин; все они базируются на глубине вреза долин. Пятый метод основан на определении мощности толщи выполнения долины. Хотя Андресен свои методические приемы разработал на теоретической основе, автор может поручиться за их надежность, поскольку в течение многих лет применял в какой-то мере сходные, если не аналогичные, приемы в своих исследованиях разрезов по материалам бурения.

Метод трассирования несогласий. Метод трассирования несогласий используется в тех случаях, когда между подошвой толщи руслового заполнения и подстилающими пластами наблюдается существенное литологическое отличие. По данным каротажа или по керну скважин определяется глубина залегания подошвы руслового выполнения, и по этим контрольным точкам строится структурная карта (фиг. 68). Через точки с минимальным радиусом изгиба последовательных изогипс проводятся осевые линии, которые соответствуют простиранию наиболее глубоко залегающей зоны поверхности несогласия.

Андресен [6] указывал на три возможных источника ошибок при интерпретации палеодренажа (фиг. 68, А - С) с использованием этой методики. На площади А вытянутая в северо-западном направлении впадина образовалась в результате структурной деформации после



Фиг. 68. Метод структурного картирования долины при изучении системы палеодренажа [6].

Горизонталы в футах.

выпахивания долины и генетически не связана с эрозией; поэтому она не будет содержать русловых осадков. На площади В понижение рельефа после выпаживания долины оказалось приподнятым, там, где его пересекла меридионально простирающаяся антиклиналь. Горизонтالي обычно загibaются вверх по течению потока, затем резко пересекают его и далее по противоположному берегу потока идут в обратном направлении. В верховьях потока (к западу от оси антиклинали) наблюдается противоположная картина. На площади С обратное направление палеоградиента связано с наличием сброса. Учитывая возможность таких ошибок, Адресен рекомендовал свой метод использовать только для тех районов, структурная активность которых с момента образования долины была минимальной. Автор убедился, что влияние этих структурных факторов легко обнаружить, а следовательно, вводить поправки на возможные ошибки не следует. Путем построения структурной карты какого-либо маркирующего горизонта, расположенного на небольшом удалении выше или ниже толщи заполнения долин, можно установить влияние тектонической активности и внести соответствующие коррективы при реконструкции палеодренажной системы (и толщи заполнения).

Влияние наложенных структур можно почти полностью исключить путем построения карты изопакит интервала разреза пород выше наиболее глубокого залегания маркирующего горизонта в пределах изучаемого района. При наложении кальки такой карты на карту, аналогичную приведенной на фиг. 68, удается получить дополнительные данные для воссоздания первоначального рельефа поверхности несогласия. Для всех точек пересечения изолиний этих двух карт вычисляют новые числовые значения глубины залегания поверхности несогласия путем прибавления (или вычитания в зависимости от того, располагается исходный репер выше или ниже толщи заполнения долины) к имеющимся данным величины мощности интервала, для которого составлена карта изопакит. Полученная в результате этих новых данных карта будет отражать палеорельеф несогласия только при условии, что к моменту выпаживания долины осадки залегали по существу горизонтально. Можно считать, что такая ситуация имела место, если маркирующие слои, залегающие выше и ниже несогласия, субпараллельны.

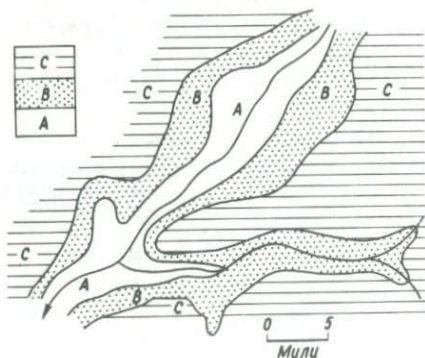
Метод поперечных профилей. Этот метод не нов и заключается в вычерчивании частных стратиграфических поперечных разрезов на основе анализа диаграмм стандартного и радиоактивного коротажа по скважинам, вскрывающим отложения руслового типа. Для построения карты палеодренажной системы проводятся линии, которые соединяют самые нижние точки разрезов. Такие линии будут соответствовать направлению палеоградиента. Хотя Адресен [6] графически не иллюстрировал этот метод, тем не менее ука-

зал на его принципиальные преимущества: при нанесении на разрез данных о текстуре и литологических свойствах осадков заполнения долины можно легко установить характер мигрирования русла в пределах долины. Андресен отмечал, что этот метод требует большой затраты времени и для правильного выбора используемых скважин необходимы предварительные сведения о простираии долины.

Метод палеогеологических карт. Данный метод заключается в построении палеогеологической карты поверхности несогласия, на которой была врезана дренажная система, позднее заполненная осадками.

На фиг. 69 показаны три частично эродированные формации (А, В и С) и их относительное положение на поверхности несогласия. Оси долин проводятся через центральные участки наиболее древних слоев. Данный метод имеет ряд ограничений. Например, установление границ развития формаций носит субъективный характер; кроме того, амплитуда вреза должна быть достаточно большой, чтобы обнажились более чем одна из выделенных толщ. В северной части площади, показанной на фиг. 69, ширина долины превышает 16,0 км. Ось долины проходит через центральную часть области развития формации А. Вполне вероятно, что протекающий по такой широкой долине поток характеризовался наличием отчетливо выраженных мандр в пределах полосы шириной, гораздо меньше 16 км. Поэтому положение оси долины может совсем не совпадать с последним положением потока, проложившего это русло.

Этот метод в основном следует использовать в том случае, если осадконакопление происходило в обстановке шельфа. В таких условиях эвстатические изменения уровня моря приводили к интенсивным трансгрессиям и регрессиям; следствием этого является сильная изменчивость литологического состава насадков по вертикали и небольшая мощность отдельных литологических единиц. В течение регрессивной фазы создавались идеальные условия для

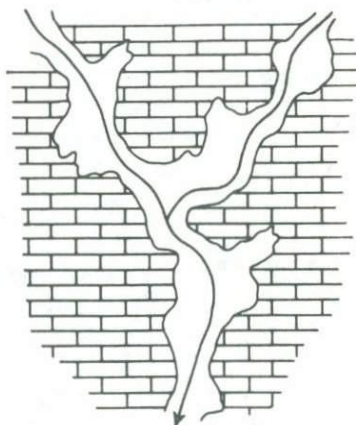


Фиг. 69. Применение палеогеологической карты для интерпретации палеодренажной системы [6].
А — самая древняя формация; С — самая молодая формация.

выветривания и селективной эрозии маломощных прослоев. В процессе трансгрессии моря базис седиментации отдельных дренажных систем отступал в сторону суши, и в этих палеодренажных руслах концентрировался грубозернистый кластический материал. Поскольку внешняя часть шельфа редко подвергалась выветриванию и эрозии, то развитие несогласия в такой обстановке представляется маловероятным; устойчивые условия седиментации способствовали накоплению более мощных стратиграфических комплексов. Именно по этим причинам данная методика почти не применима к осадочным комплексам, отложившимся в обстановке внешнего шельфа.

Метод маркирующего слоя. Сущность данного метода, как показано на фиг. 70, заключается в построении видоизмененной палеогеологической карты. Ключом к реконструкции системы палеодренажа служит картирование площади, на которой вследствие процесса вреза долины маркирующий литологический горизонт уничтожен. В этом случае оси русел проводятся через центральные части площадей, на которых маркирующий горизонт эродирован. Поскольку в поперечном сечении долины обычно асимметричны, то такая схема палеодренажа очень приблизительна. Преимущество этого метода в его легкости и быстроте выполнения. Точность трассирования границ маркирующего слоя зависит непосредственно от объема данных бурения.

Описанную методику по тем же причинам, которые указывались для метода палеогеологических карт, используют в основном в тех случаях, когда седиментация происходила в условиях шельфа.



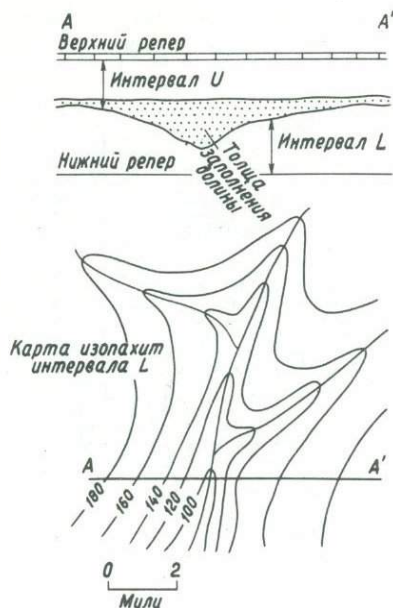
0 3
Мили

Ф и г. 70. Метод картирования маркирующего слоя при интерпретации системы палеодренажа [6].

1 — площадь, на которой маркирующий горизонт известняка присутствует; 2 — площадь, на которой маркирующий горизонт известняка отсутствует.

Метод построения карты изопахит интервала от плоскости исходного репера до дна долины. Данный метод заключается в построении карты мощностей стратиграфического интервала, залегающего между подошвой толщи, заполняющей долину, и литологическим маркирующим слоем, расположенным выше или ниже. На фиг. 71 приведена карта изопахит стратиграфического интервала ниже подошвы руслового заполнения. Минимальная мощность зафиксирована непосредственно на участке максимального вреза русла, образованного потоком. Такая карта во многих чертах сходна с картой палеорельефа. Палеоградиент можно определить путем деления 5280 футов на число футов, характеризующих перепад высот вдоль сегмента осевой линии длиной в милю.

Картирование интервала L имеет ограниченное применение там, где осадки руслового заполнения содержат углеводороды. В таком случае скважины обычно заканчиваются в 4,5–9,0 м ниже руслового заполнения, и большая часть продуктивных скважин не вскрывает нижнего репера. Для трассирования фаций коллекторов, которые обычно образуют толщу руслового выполнения, требуется метод, максимально использующий имеющуюся информацию, а именно построение карты изопахит для интервала U . Последний представляет собой толщу непрерывного наращивания мощности GIS , в то время как интервал L таковым не является. Зона максимальной



Фиг. 71. Метод составления карты изопахит при интерпретации палеодренажа [6].

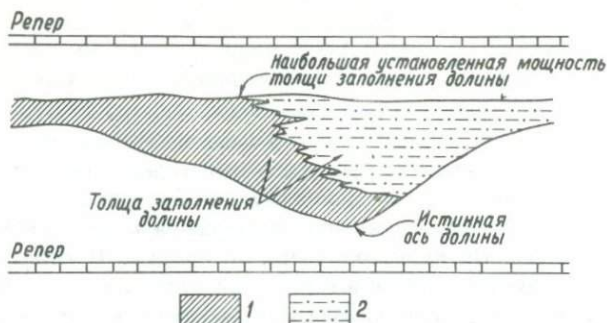
Изопахиты в футах.

мощности *GIS* совпадает с полосой максимального вреза. Интенсивность увеличения мощности вдоль осевой линии (в футах на милю) приблизительно соответствует величине палеоградиента.

Данный метод имеет двойное преимущество: используется максимальное число контрольных точек и исключается проблема надежного определения кровли руслового заполнения. Во многих местах кровля руслового заполнения постепенно переходит в вышележащие глины или представлена переслаиванием маломощных слоев песчаников и глин. На карте изопахит интервалов *U* или *L* снижается влияние тектонических факторов, имевших место после образования верхнего репера, и приблизительно восстанавливаются первоначальные условия залегания осадочной толщи. Ее единственная задача – реконструкция системы палеодренажа. Карта такого типа служит геологической основой для воссоздания геометрии толщи руслового заполнения. После выполнения этих работ, следует составить структурную карту нижнего или верхнего репера с тем, чтобы установить то влияние "постверхнереперной" тектоники, которое могло привести к аккумуляции углеводородов в наиболее высокорасположенных в структурном отношении участках руслового заполнения.

Метод построения карт изопахит толщи заполнения долин. Построение карт изопахит руслового заполнения обычно базируется на допущении, что большая часть, если не вся толща, представлена песчаниками. В таких случаях полоса максимальной мощности песчаников совпадает с областью максимального вреза. Однако в большинстве случаев русловое заполнение сложено смесью конгломератов, песчаников, алевритов и глин. В толще руслового заполнения можно установить сочетания почти всех типов кластических образований. В отдельных участках встречаются маломощные прослой известняков и обломки угля, а также изверженных и метаморфических пород. Если толща заполнения сложена глинами и залегает на глинах, для ее идентификации недостаточно данных механического каротажа. Если же она представлена глинами, залегающими на эродированной поверхности известняков, то выделить ее по данным электрокаротажа и радиоактивного каротажа не представляет особого труда. Обычно толща руслового заполнения сложена линзовидными песчаниками, переслаивающимися с глинами и алевритами. В пределах единого русла может находиться несколько изолированных тел нефтеносных песчаников, что затрудняет проблему их трассирования на глубине.

На карте изопахит руслового песчаника не всегда удается выявить простирание и местоположение максимального вреза потока, образовавшего данное русло. На фиг. 72 участок наибольшей мощности песков не совпадает с истинной осью долины. Андресен



Ф и г. 72. Положение зоны наибольшей мощности песков относительно истинной оси долины [6].

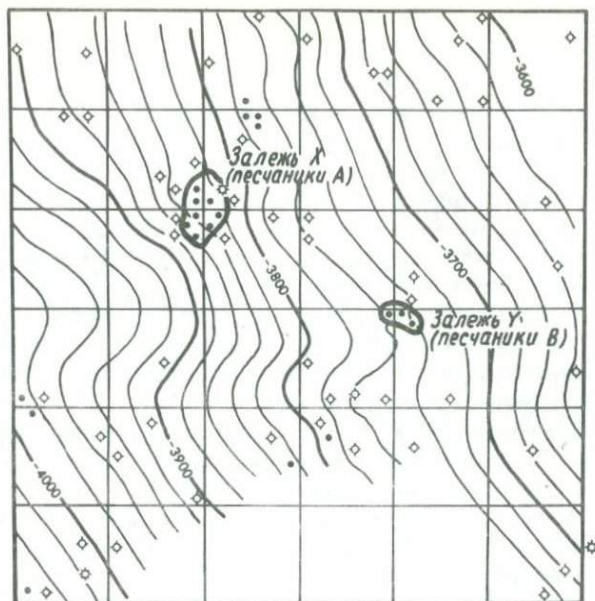
1 — толща, выделяющаяся на электрокаротажных диаграммах; 2 — толща, не выделяющаяся на электрокаротажных диаграммах.

указывал, что часть заполнения русла, представленная пачкой алевритистых глин, может не выделяться на электрокаротажных диаграммах. Обычно эта проблема не столь сложна, как он полагает, поскольку алевритистым глинам на диаграммах, как правило, соответствует "плечевой эффект" амплитудой 15–20 мВ, выделяющий их на фоне глин. В таких случаях подошва толщи руслового заполнения может отбиваться, даже если в литологическом отношении она не представлена фациями коллектора.

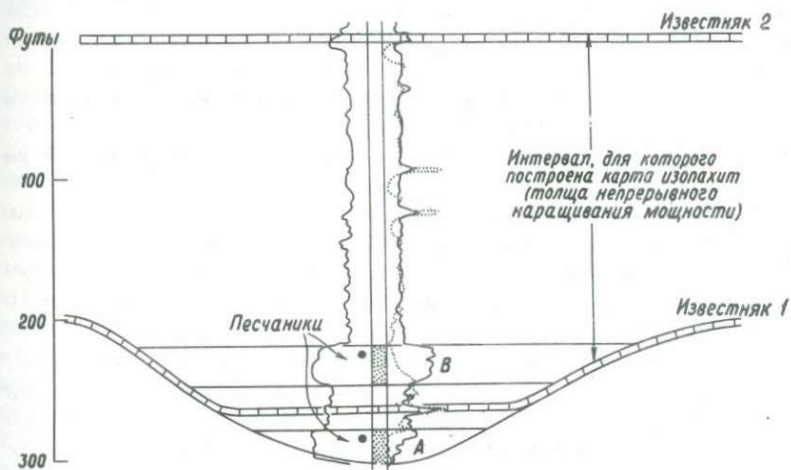
Построение карты изопакит песчаного тела, аналогичного показанному на фиг. 72, оказывает помощь при подсчете запасов. Однако такая карта не позволяет установить геометрию песчаного тела и на стадиях поисков и разведки играет меньшую роль по сравнению с другими типами карт, рассмотренными в предыдущих разделах.

ПРИМЕРЫ ПАЛЕОРУСЕЛ

На фиг. 73 приведена структурная карта тонкого выдержанного маркирующего горизонта известняков с сечением изогипс 20 футов. На ней видна моноклиналь юго-западного падения, и нет ни одного структурного элемента, которым можно было бы объяснить наличие скоплений нефти в залежах X и Y. Залежи приурочены к различным линзам песчаников, расположенным несколько ниже маркирующего слоя. Эта карта была составлена вскоре после завершения бурения скважины, обнаружившей залежь Y, при испытании которой получили приток нефти дебитом 8,2 т/ч из песчаников B, показанных на фиг. 74. Песчаники A являются продуктивным горизонтом для залежи X (фиг. 73). Предыдущими детальными иссле-



Ф и г. 73. Структурная карта кровли известняка 2 (фиг. 74).
Сечение изогипс 20 футов (6,1 м).



Ф и г. 74. Схематический профиль через толщу руслового заполнения для района, изображенного на фиг. 73.

дованиями, которые проводились на обширной площади, установлено, что песчаники *A* относятся к русловому типу. В процессе составления серии профилей по электрокаротажным диаграммам через эти две залежи сразу же стало очевидным, что мощность интервала, представленного преимущественно глинами, между горизонтами известняков 1 и 2 резко возрастает и сокращается. Однако мощность интервала между известняком 2 и слоем углей и между маркирующими горизонтами известняков, залегающих выше или ниже известняка 1, сохраняется. Устойчивая мощность интервала (или постепенное нарастание мощности к центру бассейна седиментации) рассматривается в качестве критерия, определяющего выбор исходного маркирующего репера.

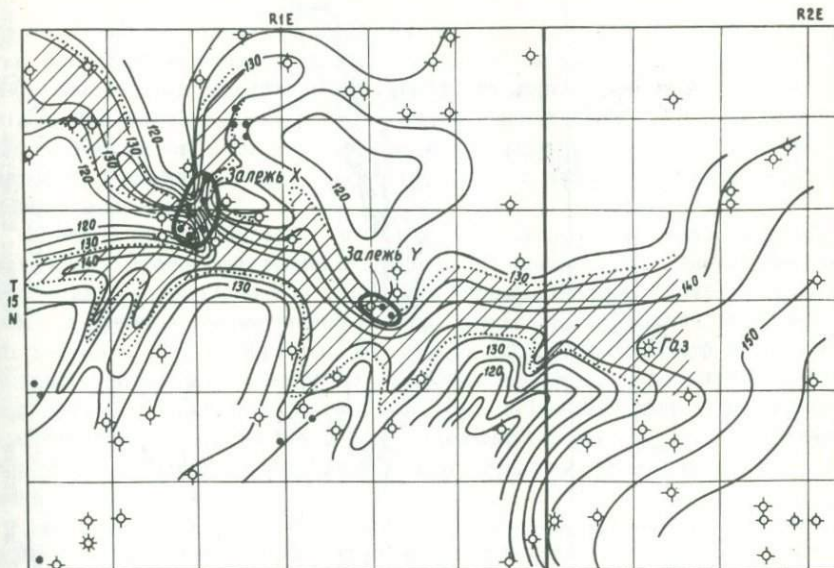
Известняк 1 относится к типу детритовых и повсеместно на площади исследования плащеобразно перекрывает поверхность несогласия. Хотя его накопление происходило на всей площади одновременно, так же как и седиментация известняка 2, тем не менее его следует использовать в качестве верхнего предела толщи непрерывного наращивания мощности *GIS*.

Если известняк 2 использовать как верхний исходный репер, то кровля известняка 1 будет в сглаженной форме повторять поверхность несогласия. Самая пониженная часть поверхности несогласия отвечает подошве песчаников *A*. Толща руслового заполнения, изображенная на фиг. 74, представлена переслаиванием линзовидных песчаников, глин и известняков. Поскольку известняк 1 вскрыт всеми скважинами, за исключением одной (где он срезан песчаниками *B*), толща непрерывного наращивания мощности, изображенная на фиг. 74, является идеальной для целей реконструкции сглаженного рельефа поверхности несогласия.

Фиг. 75 представляет собой карту изопакит *GIS*, изображенной на фиг. 74.

Хотя залежь *X* (фиг. 73) приурочена к песчаникам *A*, тем не менее песчаники *B*, вскрытые этими скважинами, также обладают хорошими коллекторскими свойствами, однако они не будут эксплуатироваться до тех пор, пока не исчерпаются запасы, связанные с песчаниками *A*.

Хорошо видно, что между фиг. 73 и 75 нет никакого сходства. Только после того, как построена карта распределения песчаников (заштрихованная зона на фиг. 75), следует переходить к структурному анализу. Изолированная скважина, расположенная в 4,8 км к востоку от залежи *Y*, имела начальный приток газа из песчаников горизонта *B* 1,37 млн.м³, но была законсервирована ввиду отсутствия трубопровода для доставки газа потребителю. Данный горизонт в этой скважине залегает приблизительно на 45 м выше нефтеносной залежи *Y*. В результате последующего разбуривания за-

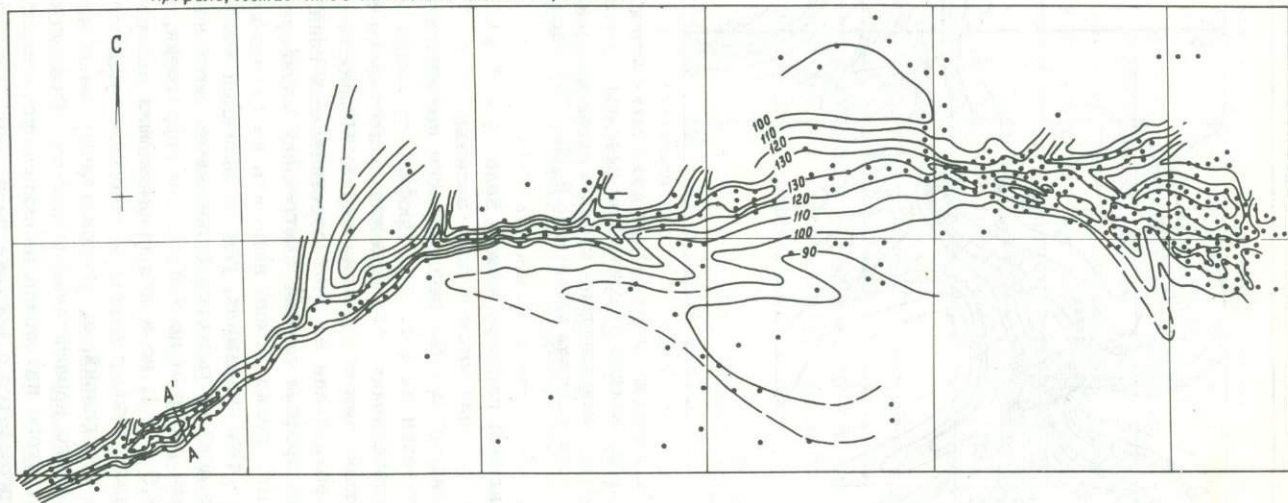
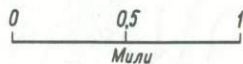
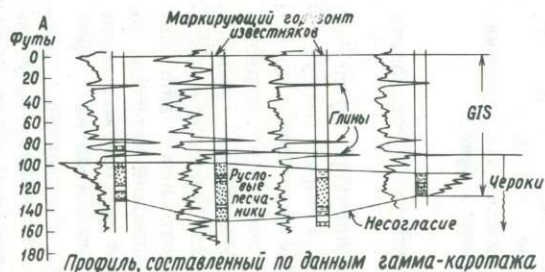


Ф и г. 75. Карта изонахит GIS (от известняка 1 до известняка 2 на фиг. 74), отображающая в сглаженном виде палеодренажную систему.

Диагонально заштрихованная площадь соответствует простиранию и ширине зоны развития песчаников В (фиг. 74). Изонахиты в футах.

штрихованной площади между залежами X и Y удалось установить, что они объединяются в одну залежь.

Наглядный пример нефтеносного песчаного коллектора руслового типа приведен на фиг. 76. Профиль по линии А-А через толщу руслового заполнения и вышележащие отложения построен по данным гамма-каротажа и изучения керна. Мощность песчаников первоначально возрастала за счет подстилающих глин. Исходным репером в кровле профиля служит синхронный маркирующий горизонт известняков. Его легко можно выделить на гамма-каротажных диаграммах, а в тех скважинах, где не проведен механический каротаж, он надежно документируется буровиками. Этот известняк служит очень надежным репером не только для территории, показанной на фиг. 76 (28,5 км²), но и для прилегающих районов. В интервале разреза между этим репером и подошвой руслового песчаника не установлено несогласий, и, следовательно, он представляет собой толщу непрерывного наращивания мощности. Тщательное изучение карты изонахит этого интервала позволило установить, что мощность толщи увеличивается с востока на запад; градиент достигает приблизительно 60 футов (18,3 м) на 6 миль (9,7 км). В среднем па-



Ф и г. 76. Карта изопахит толщи GIS, включающей нефтеносные русловые песчаники [43].
 Закартированный интервал показан на профиле гамма-каротажа по линии А — А'. Сечение изопахит 10 футов.

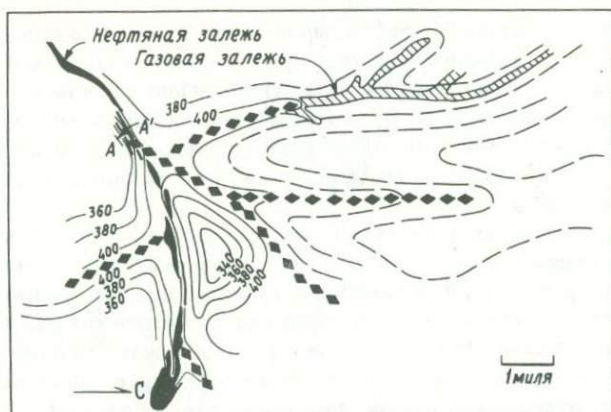
леоградиент характеризуется величиной порядка 10 футов на милю; направление течения потока с востока на запад. Толща руслового заполнения представлена преимущественно песчаниками, местами переслаиваемыми глинами, алевролитами и редко известняками. Как на юге, так и на севере наблюдается резкий контакт песчаников с глинами; здесь мы имеем дело с типичным случаем руслового заполнения.

Данную карту изопахит можно рассматривать как топографическую карту русла современного потока. Изолинии на значительное расстояние протягиваются вверх по течению потока, резко пересекают русло и затем на противоположном берегу потока идут вниз по течению. Таким образом, эта карта отображает рельеф русла, в котором отлагались более или менее протяженные линзовидные тела песчаников. Заполнение русла, вероятно, произошло под влиянием смещения вверх по течению базиса осадконакопления, когда данная территория подвергалась морской трансгрессии, надвигавшейся с запада на восток.

Детальные стратиграфические исследования, проведенные в этом районе и на сопредельных площадях, показали, что данное русло образовалось в области относительно низменного ландшафта. Русло врезано в неустойчивые к выветриванию, частично консолидированные илы. Субпараллельное залегание маломощных маркирующих пластов известняков и углей в толще глин выше и ниже руслового заполнения свидетельствует о горизонтальном залегании этих пластов во время врезания русла. На поверхности должна образоваться ветвистая система дренажа. Древнее русло, изображенное на фиг. 76, представляет собой только одно из серии аналогичных русел, которые в целом должны были образовывать ветвистую систему дренажа. Более того, любые притоки независимо от того, являются ли они первичными, вторичными или третичными, по-видимому, соединялись с более крупными потоками под острым углом. Для того чтобы установить местоположение какого-либо другого русла, относящегося к данной ветвистой системе, необходимо знать первоначальное направление течения потока. Любой возможный приток будет сочленяться с этим древним руслом под острым углом.

Для наиболее уверенного фиксирования системы притоков важно тщательно изучить керн, графики электрокаротажа и материалы по нефтегазоносности скважин, расположенных вдоль периферии линзовидного руслового песчаника. Участки локализации или резкого увеличения мощности песчаников, а также аномально высокая нефтеносность вдоль периферийных участков русла могут служить сигналом о наличии палеопритока.

На фиг. 77 приведена карта изопахит генетически взаимосвязанной толщи, в которой развиты нефтеносные русловые песчаники. Она



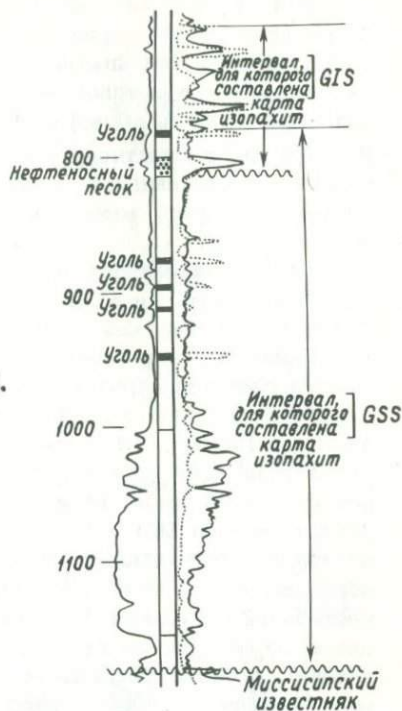
Ф и г. 77. Карта изопачит группы Чероки (нижний пенсильваний) с залежами нефти и газа в верхней части песчаников Чероки [43].

Простираение этих вытянутых залежей совпадает с узкими зонами увеличенной мощности отложений группы Чероки. Точечными линиями показаны оси трендов повышенной мощности осадков Чероки. Сечение изопачит 20 футов.

охватывает не только площадь, изображенную на фиг. 76, но и территорию, примыкающую к ней с севера. Черным показана меридиональная залежь, которая аналогична залежи песчаной толщи руслового заполнения, изображенной на фиг. 76.

На фиг. 78 показаны взаимоотношения нефтеносных песчаников, представляющих собой толщу непрерывного наращивания мощности *GIS*, изображенную на фиг. 76, с генетически взаимосвязанной толщей *GSS*, изображенной на фиг. 77. Наличие несогласия в подошве *GSS* установлено путем построения многочисленных профилей по району, показанному на фиг. 77. Резкие изменения мощности интервала ниже наиболее глубоко залегающего слоя углей со всей очевидностью показывают, что топографические понижения в рельефе поверхности несогласия были заполнены до появления морских осадков на возвышенных участках рельефа. После нивелирования холмистого рельефа в результате заполнения пониженных участков осадками сформировалась *GSS*, содержащая восемь слоев углей. Ритмичность разреза этой толщи свидетельствует о следующих условиях: однородная обстановка илистых отмелей, на которых интенсивно развивалась растительность, сменялась периодом незначительного погружения и накопления обломочного материала; затем эти условия неоднократно повторялись.

Нефтяная залежь фиг. 77 почти полностью совпадает с простираением и местоположением линейной зоны, в которой *GSS* характеризуется максимальной мощностью. Более того, по западной ок-



Фиг. 78. Электрокаротажная характеристика разреза нижнего пенсильвания [43]. Указаны стратиграфические интервалы, для которых построены карты изопахит (фиг. 76 и 77).

раине северной части рассматриваемой площади развиты линзовидные газоносные песчаники. Последние являются стратиграфическим эквивалентом нефтеносных песчаников, развитых южнее. Эти газоносные песчаники также развиты в пределах линейного пояса максимальной мощности GSS. Такая приуроченность нефтеносных песчаников к зонам максимальной мощности GSS не случайна. Зоны сокращенных мощностей этой толщи совпадают с приподнятыми участками палеорельефа нижележащей поверхности несогласия, и, наоборот, зоны увеличенной мощности (или тренды) — с пониженными участками этой поверхности. На участках повышенной мощности осадки, слагающие GSS, несколько более уплотнены, чем на прилегающих к ним участках сокращенной мощности. Следовательно, естественно предположить, что образование неглубоких топографических депрессий на илистых поймах к концу накопления GSS связано с дифференцированным уплотнением разреза, представленного преимущественно глинами, сформировавшимися поверх захороненных холмов. Такие депрессии служили участками концентрации стока метеорных вод, и, следовательно, здесь начинались процессы эрозии. Стеkanie

этих вод по неустойчивым практически горизонтально залегающим слоям приводило к образованию ветвящейся дренажной системы.

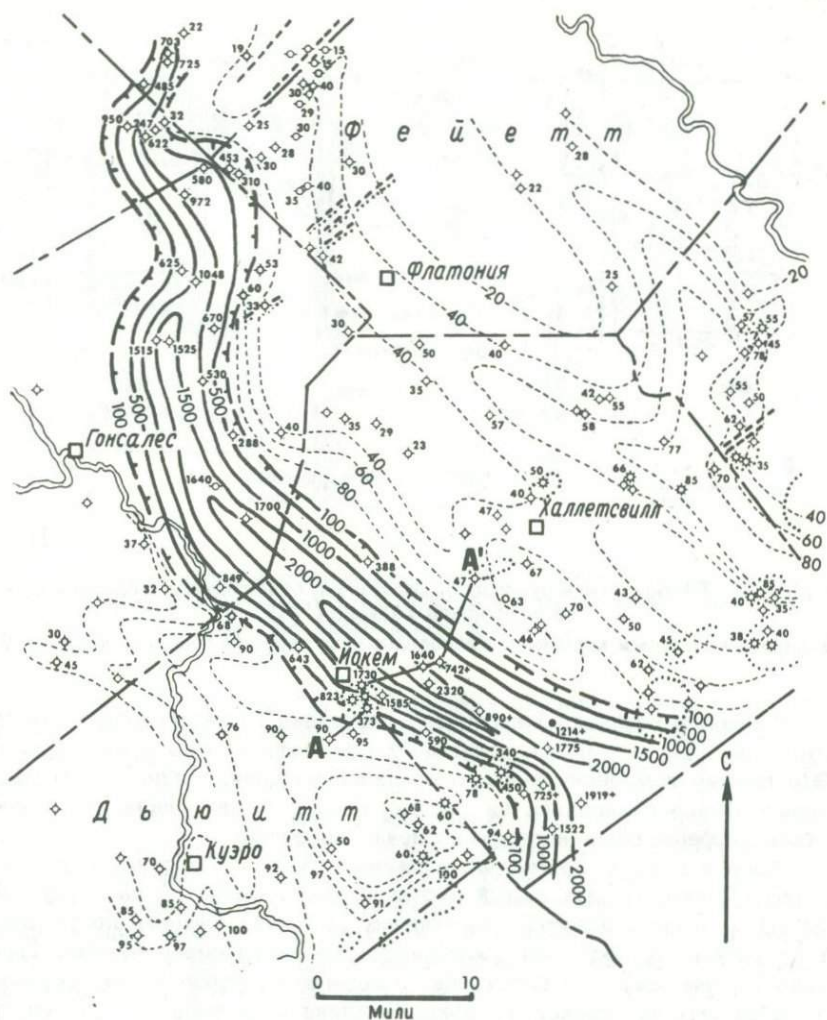
На фиг. 77 точечными линиями показано несколько дивергентных трендов повышенной мощности *GSS*. Именно вдоль этих направлений могут быть обнаружены другие зоны русловых песчаников. Эти тренды совместно с уже известными нефте- и газоносными русловыми песчаниками в целом образуют ветвящуюся дренажную систему, которая, вероятно, сформировалась в конце периода накопления *GSS*.

Толща заполнения подводного каньона, округ Лавака, Техас. Средняя часть разреза толщи Уилкоккс в центральной части Техасского побережья Мексиканского залива представляет собой прекрасный пример очень мощной толщи руслового заполнения, сложенной главным образом алевритистыми глинами. Глины заполняют каньон, врезанный в очень мощную толщу песчаных пород формации Уилкоккс. На фиг. 79 приведена карта изопакит толщи руслового заполнения. Хойт [145] указывал: "Ширина зоны максимального развития этой толщи вблизи города Йокем достигает 16 км, а глубина залегания 900 м". Она прослежена вверх по течению к северо-западу приблизительно на 80 км. Хойт предполагал, что это русло образовалось за счет обрушения и оползания по крутым плоскостям нестабильных мощных толщ осадков, отлагавшихся близ окраин эоценового шельфа. Он считал, что причиной, стимулировавшей данное явление, послужило образование сбросов, благодаря которым "... возникали турбидитные потоки по мере того, как они достигали дна ущелья". Воды такого потока должны были характеризоваться скоростью течения и мобильностью, достаточными для того, чтобы вызвать эродирование и углубление русла.

На фиг. 80, представляющей собой разрез толщи руслового заполнения, можно отчетливо видеть, что последняя сложена алевритами и глинами. По обеим сторонам русла залегают слоистые песчаники Уилкоккс, а выше русла залегают массивные песчаники. Хойт [145] отмечал:

"... верхние массивные пески Уилкоккс залегают непосредственно на глинах руслового заполнения, а также на покровных глинах. Это обстоятельство и тот факт, что мощность глин русла постепенно сокращается по направлению к восточной и западной каемкам русла, соединяющихся там со сравнительно маломощной толщей глин, должны указывать на то, что накопление глин руслового заполнения происходило одновременно с накоплением покровных глин".

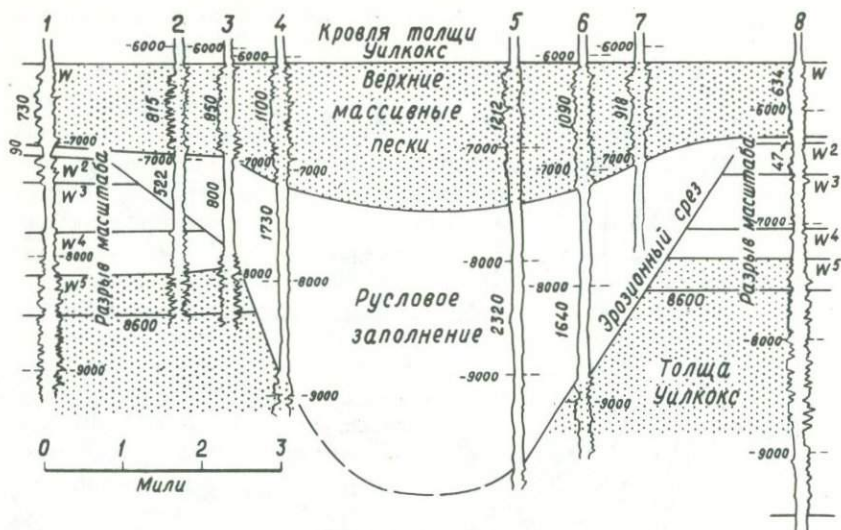
Хойт не пытался проследить характер изменения мощности покровных глин за пределами границ русла, где она не превышает 30 м (фиг. 79). Пунктирными линиями по обеим сторонам основного русла показана интерпретация автора данных Хойта, согласно



Ф и г. 79. Карта изобатит толщи руслового заполнения, относящейся к средней части разреза формации Уилкокс, центральная часть Техасского побережья Мексиканского залива.

Сплошные линии проведены по данным Хойта [145]; сечение изобатит 500 футов (150 м). Пунктирные линии — данные автора, дополняющие построения Хойта; сечение изобатит 20 футов (6 м).

которой к северо-востоку и юго-западу от основного русла развито несколько других русел, заполненных алевритисто-глинистым материалом, хотя последние гораздо менее отчетливо выражены.



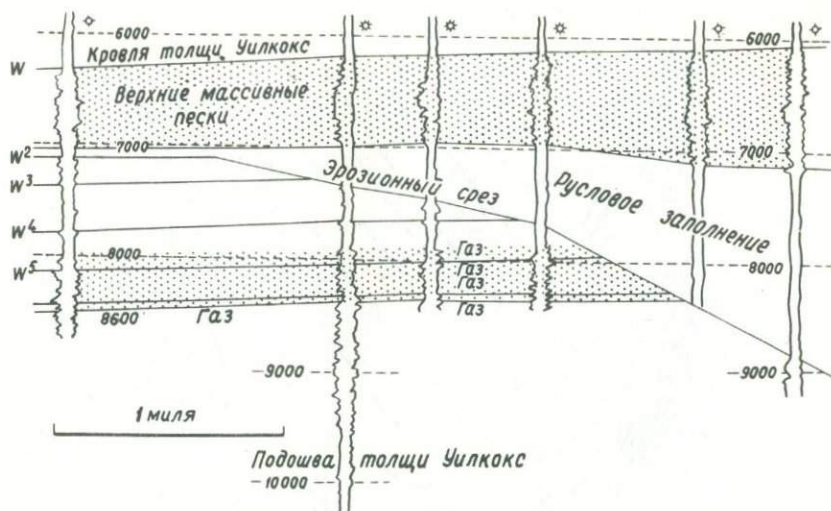
Ф и г. 80. Разрез толщи руслового заполнения, относящейся к средней части песчаников Уилкоккс [145].

Построен по данным картожа. Местоположение профиля показано на фиг. 79.

Мощность верхнего массивного песчаника в центральной части русла на 150 м и более превышает его мощность на краях русла. Это пример компенсированного осадконакопления, когда мощная толща песков отлагалась на мощных подстилающих глинах вследствие дифференцированного уплотнения последних.

Газовая залежь Йокем расположена в 3 км к юго-востоку от города Йокем. Продуктивный песчаник, залегающий на глубине 2620 м, вскрыт девятью скважинами (фиг. 81). Залежь приурочена к структурному носу, погружающемуся на запад-северо-запад. Граница залежи вверх по восстанию определяется эрозионным срезанием слоистых песчаников Уилкоккс. Выклинивание толщи руслового заполнения к западу препятствовало дальнейшей миграции газа в этом направлении.

На фиг. 82 приведена структурная карта подошвы покровных глин и подошвы глинистой толщи заполнения русла. Сечение изогипс, равное 500 футам (152 м), слишком велико для того, чтобы можно было выделить менее отчетливые русла, зафиксированные по краям главного русла (фиг. 79). Хойт [145] отмечал, что "линия, соединяющая изогипсы 7000 футов на западном и восточном бортах русла, пересечет под прямым углом изогипсу дна русла 10 000 футов, свидетельствуя тем самым, что в этом месте глубина русла



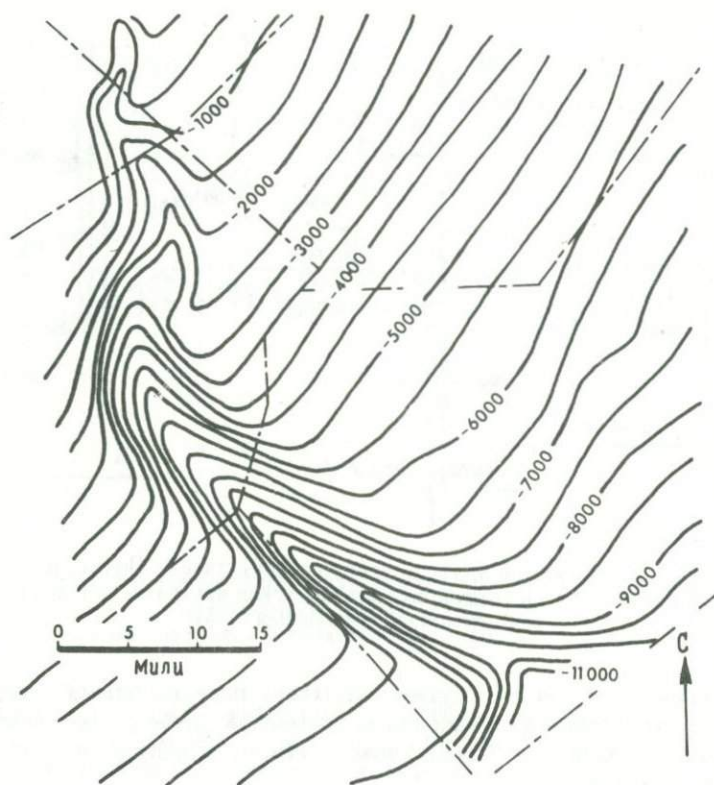
Ф и г. 81. Геологический профиль через газовую залежь Йокем, на котором видно, что песчаники срезаются выклинивающейся алевритисто-глинистой толщей руслового заполнения [145].

составляла 3000 футов". Путем вычитания первоначальной глубины русла в этой точке из значения современной глубины получаем, что с момента накопления пород Уилкокс наклон к центру бассейна составил 2130 м.

Для того чтобы объяснить такую форму тела руслового заполнения, Хойт допускал развитие быстрой и широкой трансгрессии моря, благодаря которой ущелье за короткое время заполнилось алевритистыми глинами, а по обеим берегам этого глубокого русла накопилась мощная толща покровных глин. В дальнейшем в процессе регрессии образовался мощный выдержанный по площади покров песчаников. Как уже указывалось, произошло компенсированное увеличение мощности регрессивных верхних массивных песков над уплотнившейся толщей глин руслового заполнения.

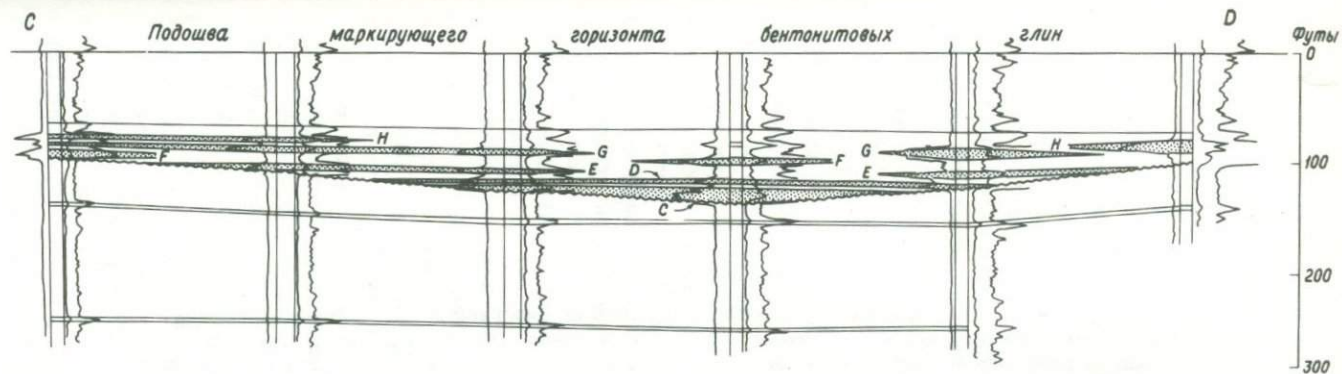
Песчаники Мадди, северо-восточный Вайоминг.

Толща Мадди, являющаяся составной частью глинистой формации Термополис в северо-восточной части Вайоминга, сложена серией линзовидных песчаных тел. Песчаники Мадди приурочены к верхней части разреза нижнего мела; они согласно перекрываются глинами Моури и несогласно залегают на неравномерно эродированных участках глин Скалл-Крик. Эта зона развития песчаных линз изучена на площади 1489 км², входящей в состав округов Уэстон, Крук и Кэмпбелл.



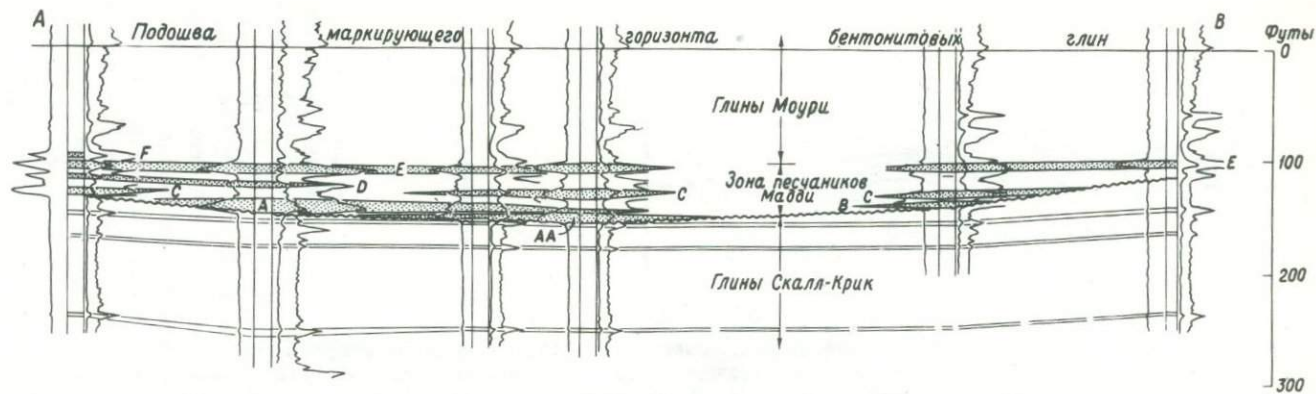
Ф и г. 82. Структурная карта подошвы покровных глин и подошвы глинистой толщи руслового заполнения.
Сечение изогипс 500 футов.

Легко выделяемые маркирующие горизонты алевритов и бентонитовых глин, залегающие выше и ниже песчаников Мадди, позволяют устанавливать и коррелировать отдельные песчаные пачки, слагающие толщу Мадди. На фиг. 83 приведен поперечный разрез, на котором показаны маркирующий слой бентонитовых глин (исходный репер) в толще Моури, залегающей выше песчаников Мадди, и два горизонта алевритов в глинах Скалл-Крик, залегающих ниже песчаников Мадди. Четко видна поверхность несогласия в основании толщи Мадди. Стратиграфически наиболее низко залегающая пачка песчаников Мадди развита там, где поверхность нижележащих глин Скалл-Крик эродирована наиболее глубоко. В алфавитном порядке снизу вверх обозначено несколько последовательно отлагавшихся горизонтов песчаников.



Фиг. 84. Профиль по линии С - D.

Исходный репер — подошва маркирующего слоя бентонитовых глин. Пачки песчаников зоны Мадди, развитые вдоль осевых трендов поверхности несогласия, занимают более высокое стратиграфическое положение, чем на фиг. 83. Местоположение профиля показано на фиг. 85. Вертикальный масштаб увеличен в 100 раз.



Ф и г. 83. Профиль по линии А — В.

Исходным репером является подошва маркирующего слоя бентонитовых глин. Можно видеть линзовидный характер песчаных тел, слагающих толщу Мадди, а также особенности строения поверхности несогласия, срезающей глины Скалл-Крик. Местоположение профиля показано на фиг. 85. Вертикальный масштаб увеличен в 100 раз.

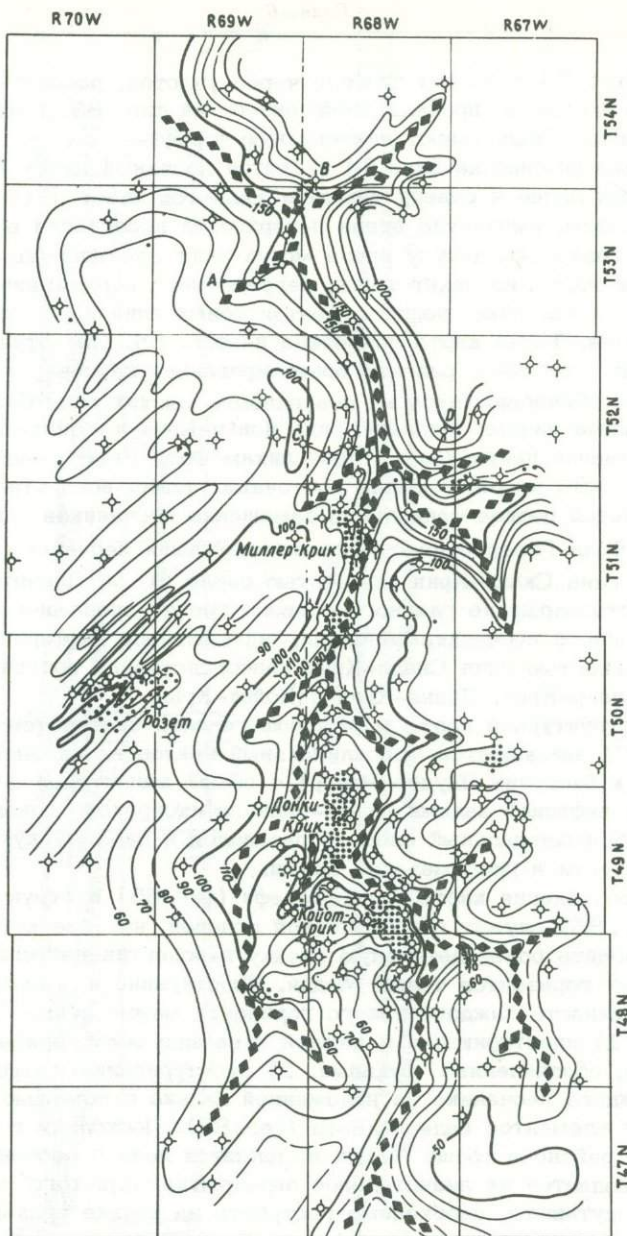
На фиг. 84 приведен профиль через участок, расположенный в 11–16 км южнее профиля, показанного на фиг. 83. Пачки песчаников зоны Мадди имеют линзовидную форму.

Самым нижним на фиг. 84 является песчаный пласт С, в то время как далее к северу таковым является пласт А (фиг. 83). Таким образом, амплитуда вреза поверхности несогласия возрастает с юга на север. Амплитуду вреза можно легко установить путем построения карты изопахит толщи непрерывного наращивания мощности между исходным репером бентонитовых глин и поверхностью несогласия. Такая карта приведена на фиг. 85. Она отчетливо показывает, что здесь развита ориентированная на север дренажная система, образовавшаяся на поверхности мягких глин Скалл–Крик.

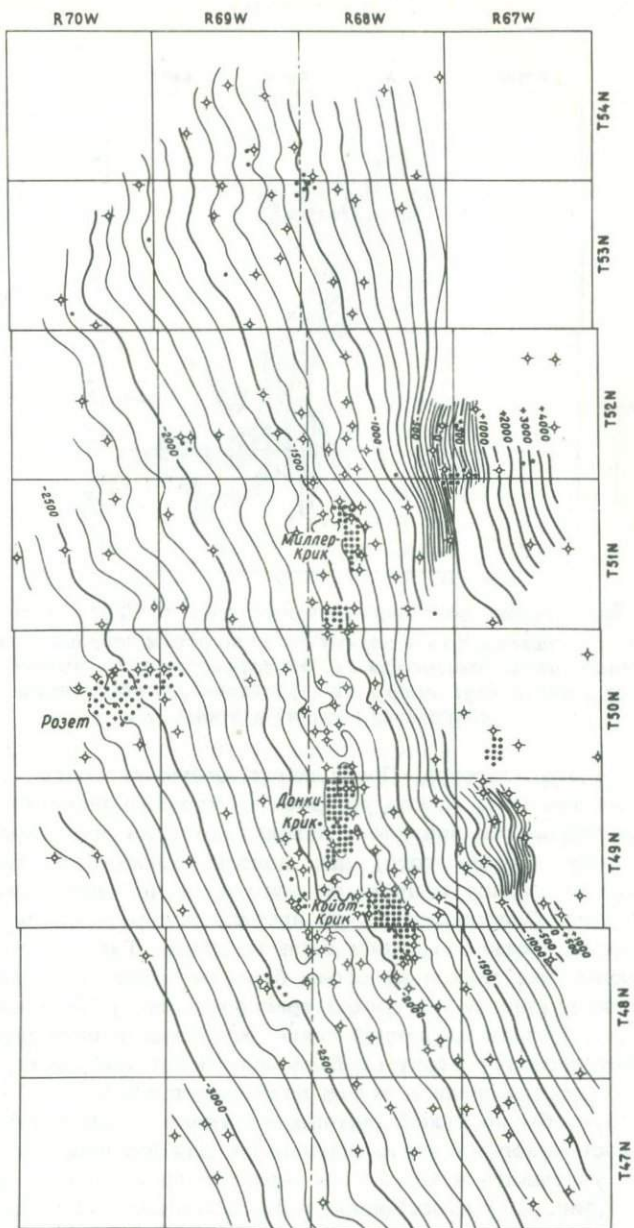
Нефтяные залежи Миллер–Крик, Донки–Крик и Койот–Крик преимущественно приурочены к песчаникам Фолл–Ривер, залегающим в нижней части разреза. Вдоль восточных границ всех этих залежей наблюдается резкое фациальное замещение песчаников глинами. Песчаники Фолл–Ривер отделены от вышележащих песчаников Мадди толщей глин Скалл–Крик мощностью около 60 м. Принято считать, что местоположение главного осевого тренда дренажного русла, выполненного песчаниками Мадди, определяется дифференцированной уплотненностью глин Скалл–Крик непосредственно восточнее залежей Миллер–Крик, Донки–Крик и Койот–Крик.

На структурной карте маркирующего слоя бентонитовых глин (фиг. 86) наблюдается моноклиальный наклон в западном направлении (к бассейну Паудер–Ривер) с общей амплитудой 1980 м. На участке нефтяной залежи Донки–Крик зафиксировано локальное поднятие. Моноклиальный склон образовался в ларамийскую фазу складчатости в послемеловое время.

Сопоставление карты палеорельефа (фиг. 85) и структурной карты (фиг. 86) служит геологической основой, на базе которой можно проводить более детальную оценку перспектив нефтегазоносности песчаных горизонтов толщи Мадди. Простирание и географическую приуроченность каждого такого горизонта можно легко определить путем: 1) идентификации в каждой скважине всех горизонтов песчаников, обозначенных буквами, 2) оконтуривания площади развития каждого песчаника на наложенной кальке с помощью трассирования элементов палеорельефа (фиг. 85). Поскольку в рассматриваемом районе в толще Мадди выделяется девять песчаных пачек, то наблюдается их значительное перекрытие. Для того чтобы избежать путаницы, необходимо построить на кальке несколько накладывающихся друг на друга карт. Одну из таких карт распределения песчаников представляет фиг. 87. На этой карте соответственно показаны зоны развития песчаников А, С, D и H. Песчаники А и С развиты в виде узких полос по обоим краям от осей основ-

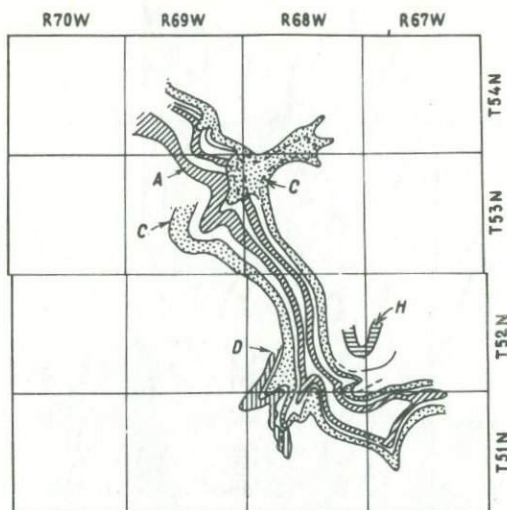


Ф и г. 85. Карта изопохит *GIS* между маркирующим слоем бентонитовых глин и поверхностью несогласия в подошве зоны песчаников Мадди. Карта отражает сглаженный палеорельеф поверхности несогласия до момента осадконакопления песчаников Мадди. Сечение изопохит 10 футов.



Ф и г. 86. Структурная карта маркирующего слоя бентонитовых глин, отражающая общий моноклиальный наклон к западу в сторону бассейна Паудер-Ривер.

Сечение изогипс 100 и 500 футов.



Ф и г. 87. Характер распределения песчаных пачек *A*, *C*, *D* и *H* толщи Мадди. Пачки *A* и *C* изображены в виде парных полос по обеим сторонам основных палеодренажных русел. Залегающие стратиграфически более высоко пачки песчаников более удалены друг от друга и пересекают ось основного потока соответственно выше по течению.

ного русла и его притоков. Проследивая любую из полос песчаников вверх по течению, можно установить, что она пересекает ось и далее протягивается вниз по течению потока на его противоположном берегу. Кроме того, две полосы любого из указанных песчаников тем дальше удалены от оси русла, чем выше они залегают в разрезе. Следовательно, на профиле они располагаются кулисообразно на противоположных берегах русла. Такое попарное развитие полос песчаников по обеим берегам русла объясняется циклическим погружением и морской трансгрессией, развивающейся с севера на юг. Исходя из данной концепции, каждая пара полос песчаников соответствует этапу стабилизации береговой линии, в течение которого формировались толщи пляжевых песков.

Для того чтобы по такой картине причудливо изгибающихся линзовидных песчаников наметить подходящие для бурения объекты, необходимо учитывать в комплексе характер площадного развития песчаников (фиг. 87) и особенности тектонического строения (фиг. 86). Благоприятными для образования залежей нефти и газа, вероятно, должны быть выклинивающиеся вверх по падению части песчаных линз. Каждая залежь, очевидно, будет иметь собственные очертания, и каждую линзу песчаников следует рассматривать в качестве самостоятельного перспективного объекта.

Глава 7

ДЕЛЬТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Только в последние 15–20 лет геологи–нефтяники по-настоящему заинтересовались поисками палеodelьт. Одновременно с интересом пришло и осознание того факта, что дельты различны как по внешней форме, так и по внутреннему строению слагающих их комплексов. На протяжении десятилетий почти ничего не было известно о палеodelьтах, если не считать работ Баррела [10] о классической дельте Катскилл–Шеманг Аппалачской геосинклинали и Гилберта [107] о небольших дельтах ледникового озера Бонневилл. Гораздо позднее в литературе появился ряд интересных статей о палеodelьтах. В работе Буша [41] описана пенсильванская дельта Буч в бассейне Аркома, Нанц [203] изучил олигоценовый песчаный резервуар месторождения Силигсон в бассейне Мексиканского залива, Уэймер [287] – поздне меловую дельту Ролинс, Халбоути и Барбер [125] – олигоценовую дельту в бассейне Мексиканского залива; Рейнуотер [225,226] – миоценовую дельту в бассейне Мексиканского залива и Суонн [256] – позднемиссисипскую дельту реки Мичиган. Знакомство с этими работами со всей очевидностью показывает, что ни одна из описанных дельт не похожа на другую и что требуется провести значительные объемы исследований современных дельт и условий их формирования с тем, чтобы выявить аналогичные осадочные комплексы в разрезах древних толщ. Современные дельты тоже характеризуются определенными различиями, которые обусловлены непостоянством таких параметров, как градиент потока, его плотность (взвешенные и растворенные компоненты потока), относительное количество и тип взвешенных частиц, плотность вод бассейна стока, ширина устьевой части потока, форма бассейна седиментации и энергетические уровни внутри бассейна.

В 1951 г. Американский нефтяной институт приступил к работе по реализации проекта № 51, которая продолжалась семь лет и заключалась в проведении интенсивных исследований современных осадков и соответствующих им обстановок осадконакопления в районах северо-западной части Мексиканского залива. Были детально изучены обстановки и отложения дельты реки Миссисипи, ре-

зультаты этих работ были опубликованы в многочисленных статьях. Благодаря этой работе, а также многочисленным исследованиям отдельных ученых, проведенным в более поздний период, условия осадконакопления дельтовой равнины реки Миссисипи оказались наиболее совершенно изученным типом обстановки седиментации. Несомненно, что многие, а возможно, и большинство осадочных процессов, изученных на примере этой территории, найдут широкое применение как при анализе современных, так и древних осадков. Однако дельту реки Миссисипи, имеющую форму птичьей лапки, не следует считать типичной для большинства современных и древних дельт земного шара. Как уже указывалось, эта голоценовая дельта образовалась в результате комплексного взаимодействия различных факторов; такая обстановка седиментации в настоящее время существует лишь в немногих специфических районах Земли.

ТЕОРИЯ СТРУЙНОГО ПОТОКА

Любая река, турбулентный поток которой разгружается в массу спокойной воды озера или океана, может рассматриваться в качестве свободной струи. Бейтс [17] и Бейтс и Фриман [18] проанализировали природу струйного потока по работам специалистов в области аэродинамики, химии, геотермии и гидравлики и применили эти данные для решения проблемы формирования дельт. Ими было установлено, что в любом бассейне могут образоваться три отчетливых типа дельт. Они выделяют два основных типа струйных потоков — плоский, в котором смешивание происходит в двух направлениях вдоль горизонтальной плоскости, и осевой, в котором смешивание происходит в трехмерном пространстве. Бейтс [17] писал, что в случае

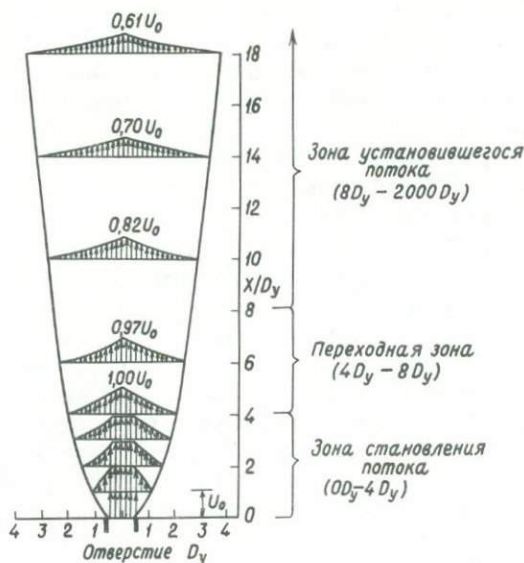
“... чисто инерционного течения латеральные границы осевого потока при постоянном угле наклона 20° расширяются вниз по течению потока. Однако в плоском потоке латеральные границы вниз по течению расширяются настолько, что образуется параболическая форма, в которой ширина струи мутных вод приблизительно равна трем корням квадратным расстояния до устья. Кроме того, поскольку в осевом потоке смешивание происходит в трех измерениях, то протяженность такой струи составляет лишь какую-то долю от протяженности плоского потока”.

Известно, что в устье потока может существовать некоторый гидравлический напор, что проявляется в более интенсивном его расширении и в более высокой скорости продвижения, чем в случае чисто инерционного струйного потока. Влияние такого гидравлического напора не учитывается в основной теории струи, которая рассматривает только инерционный поток.

На фиг. 88, заимствованной из работы Бейтса [17], показан характер распределения скорости течения воды, вытекающей через определенное отверстие (устье потока) в плоском струйном потоке. На этой диаграмме

- D_y — ширина отверстия,
- X — расстояние от отверстия,
- U_0 — осевая скорость в точке истечения,
- U — осевая скорость в любой другой точке.

Часть бассейна, находящуюся от отверстия на расстоянии от 0 до $4 D_y$, принято называть *зоной становления потока*. В центральной части этой зоны не наблюдается заметного понижения осевой скорости. Однако на периферии зоны становления потока вследствие замедления скорости движения воды из общей массы взвешенного материала отлагаются мелкозернистые осадки, образующие прирусловые валы. Такие валы сложены в основном алевритами и глинами с незначительной примесью мелкозернистого песка. Еще дальше в сторону бассейна разгрузки на площади между двумя гиперболическими кривыми выделяется *переходная зона*, простирающаяся в интервале от 4 до $8 D_y$. На этом участке постоянная осевая скорость изменяется до стандартного замедления и отлагается поперечный бар в форме полумесяца. Такие поперечные бары сложены преимущественно песком, который латерально и вблизи подошвы постепенно переходит в алеврит и алевритистую глину. Оба



Фиг. 88. Распределение скорости течения в случае плоской струи [17].

края этого бара сочленяются с удаленными краями прирусловых валов, которые развиты по обеим сторонам зоны становления потока, и таким образом блокируется устье потока. По мере продолжения разгрузки водного потока от взвешенного материала поперечный бар разрастается вверх до уровня, на котором должны происходить его "разрывы". Такие новые прорывы будут развиваться в понижениях поперечного бара или в прирусловых валах. Таким образом формируется система разветвленных протоков реки.

Если в переходной зоне образуется серповидный бар, то, по мнению Бейтса [17], происходит "значительное уменьшение глубины русла", которое должно компенсироваться

"... общим увеличением ширины русла в устьях протоков таким образом, что поперечное сечение потока и соответственно скорость течения будут оставаться почти постоянными до тех пор, пока воды не достигнут океана. Однако в силу более высокого трения мелководные русла обладают меньшей пропускной способностью, чем глубокие русла аналогичного поперечного сечения, и суммарная площадь поперечного сечения устьевой части всех протоков должна несколько превышать площадь поперечного сечения главного русла".

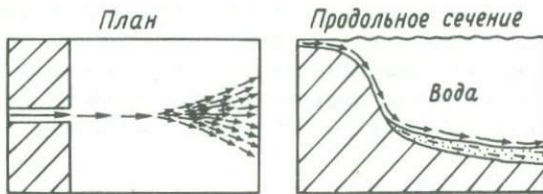
Он отмечал, что этот принцип подтверждается разветвлением протоков в нижнем течении реки Миссисипи, где происходит увеличение "... общей площади русла не более чем на 10% первоначальной площади, в то время как глубины протоков составляют только 42-72% глубины основного русла".

Третья зона с точки зрения общей картины распределения скорости течения (фиг. 88) называется *зоной установившегося потока*. Она охватывает интервал от $8 D_y$ до более чем $2000 D_y$ в случае плоского струйного потока. В пределах этой обширной площади выпадающий из взвеси алевритистый и глинистый материал образует толщи продельтовых глин.

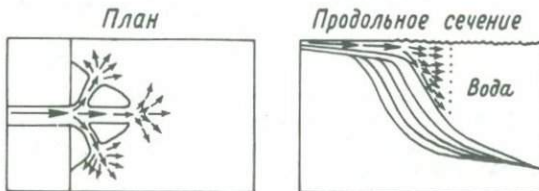
В случае осевого струйного потока воды русла смешиваются с водами залива в трех измерениях (плоскости x , y и z). Поперечный бар в таком случае располагается в интервале $4-8 D_z$ (D_z — диаметр округлого отверстия), а не $4-8 D_y$, как отмечалось для плоского струйного потока. Так как практически у всех рек ширина больше, чем глубина, то очень важно знать, ведут ли себя мутные воды как осевая или как плоская струя. Поперечный бар осевого струйного потока будет формироваться гораздо ближе к отверстию истечения, чем в случае плоского струйного потока. Кроме того, в случае осевого струйного потока в зоне установившегося потока интервал замедления скорости будет намного короче, т.е. $200 D_z$, а не $2000 D_y$.

Основные типы дельт. Типы дельт, образующихся в устьях потоков, обусловлены главным образом относительной плотностью привносимых вод и вод залива (озера или океана), куда они впадают. Если плотность мутных вод потока превышает плотность вод залива, то мы имеем дело с *гиперпикнальным подтоком* (hyperpycnal inflow), который представляет собой один из двух типов плоского струйного потока (фиг. 89). В этом случае переносимые водой осадки стекают под воды залива и формируют подводные русла в шельфовой зоне бассейна, а в батинальной части континентального склона выпахивают подводный каньон. Вертикальное перемешивание здесь минимальное. Непосредственно у места резкого уменьшения градиента потока будет формироваться подводная дельта. Такие дельты развиваются вдали от побережья на глубоководье как следствие различной плотности или турбидности течений.

Если воды вытекающего потока имеют приблизительно ту же плотность, что и воды залива, то используется термин *гомопикнальный подток* (homopycnal inflow). В этом случае воды смешиваются в трех измерениях (фиг. 90), что характерно и для осевого потока. Зоны замедления скорости гораздо короче, чем в случае плоского струйного потока, и образуется дельта с отчетливо выраженными осадками надводной равнины, подводного склона и донными отложениями. Наклон слоев склона может быть равным углу естественного откоса (приблизительно на 30°). Дельты этого типа,



Ф и г. 89. Подводная дельта: гиперпикнальный подток [18].

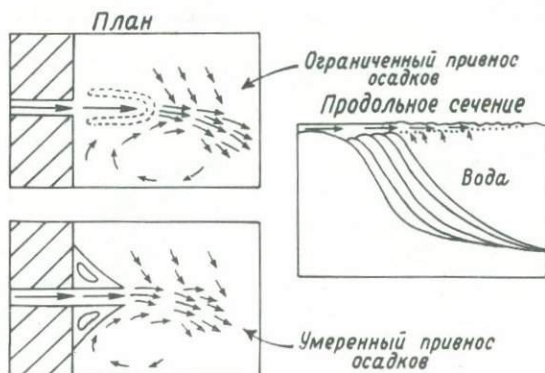


Ф и г. 90. Дельта типа Гилберта: гомопикнальный подток [18].

описанные Гилбертом [107], обычно образуются по окраинам пресноводных озер, где наблюдается очень небольшая разница плотности вод озера и вод потоков, впадающих в это озеро. Большинство авторов учебников по геоморфологии полагают, что все дельты относятся к типу Гилберта, не учитывая того обстоятельства, что в описанном им случае речь шла о дельтах озерных обстановок, а не морских. И как следствие этого многие геологи тщетно искали в морских дельтах крутонаклоненные отложения подводного склона.

Третий, наиболее важный тип дельты образуется в результате гипопикнального подтока (hypopycnal inflow), когда плотность разгружающихся турбулентных вод потока меньше плотности вод залива, в который он впадает. Это второй тип плоского струйного потока, в котором смешивание происходит только по двум направлениям, так как втекающие воды разливаются плашмя по поверхности более плотных вод залива (фиг. 91). В настоящее время практически все реки, впадающие в океаны, относятся к этому типу; таковыми же следует считать и палеодельты. Бейтс [17] отмечал, что "если интенсивность разгрузки мала, то серповидный бар образуется вдали от истока; если разгрузка от умеренной до интенсивной, то будет формироваться остроконечная, дугообразная или в виде птичьей лапки дельта". Далее он писал:

"Возникает вопрос, будут ли эти главные особенности дельтового осадконакопления способствовать формированию бара в форме полумесяца, остроконечной дельты или многорукавной дельты в форме птичьей лапки. В природе форма развивающейся в конечном счете дельты зависит от степени неравносности между силами наращивания и разрушения берегов вблизи истока. Так, например, грубые расчеты, проведенные для прибрежных условий между дельтой реки Миссисипи и городом



Ф и г. 91. Дельта литоральной области моря: гипопикнальный подток [18].

Фрипорт, Техас, показали, что потоки со среднегодовой разгрузкой менее $14 \text{ м}^3/\text{с}$ по естественным руслам не поставляют в море достаточного количества осадков для того, чтобы компенсировать тот объем обломочного материала, который уносится в сторону открытого моря благодаря деятельности волн. Потоки со среднегодовой разгрузкой $14\text{--}224 \text{ м}^3/\text{с}$ способны сформировать активные бары в виде полумесяца вдали от их устья, в то время как потоки с разгрузкой около $420 \text{ м}^3/\text{с}$ должны образовывать остроконечные дельты. При среднегодовой разгрузке свыше $1400 \text{ м}^3/\text{с}$, если русла не имеют отстойных бассейнов¹⁾, образуется система прирусловых валов, которые продвигаются в сторону моря, несмотря на то, что ключевые участки дельты в форме птичьей лапки маскируются деятельностью волн".

Хотя взаимосвязь между объемом разгрузки и типом образующих дельт играет важную роль, тем не менее данных для уверенных обобщений еще недостаточно. Интенсивность разгрузки можно рассматривать только как один из нескольких важных параметров, обуславливающих тот или иной тип формирующейся дельты. Нет таких двух рек, которые характеризовались бы одинаковыми условиями эрозии и накопления осадков в устье. Волны, вдольбереговые течения, приливы и отливы и даже силы Кориолиса в отдельности и совместно оказывают прямое воздействие на тип формирующейся дельты. К числу других контролирующих факторов относятся уклон поверхности подтока, градиент русла реки, наклон бассейна, количество и тип взвешенного материала, температура воды и даже эвстатические колебания уровня моря. Большая часть вышеупомянутых факторов, за исключением количества и типа взвешенного материала, по-видимому, имеет меньшее значение, чем интенсивность разгрузки.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕЛЬТ

Несмотря на множество факторов, в той или иной мере обуславливающих тип образующейся дельты, все-таки имеется определенное число таких форм, которые легко можно установить как по современному, так и по древним осадкам. В приведенных Бейтсом [17] трех основных типах дельт главное внимание обращается на относительную плотность речных вод и вод залива. Эти факторы имеют первостепенное значение. Теоретически дельты можно было бы классифицировать на основе фациальных факторов, литологической характеристики слагающих их толщ, относительного числа и

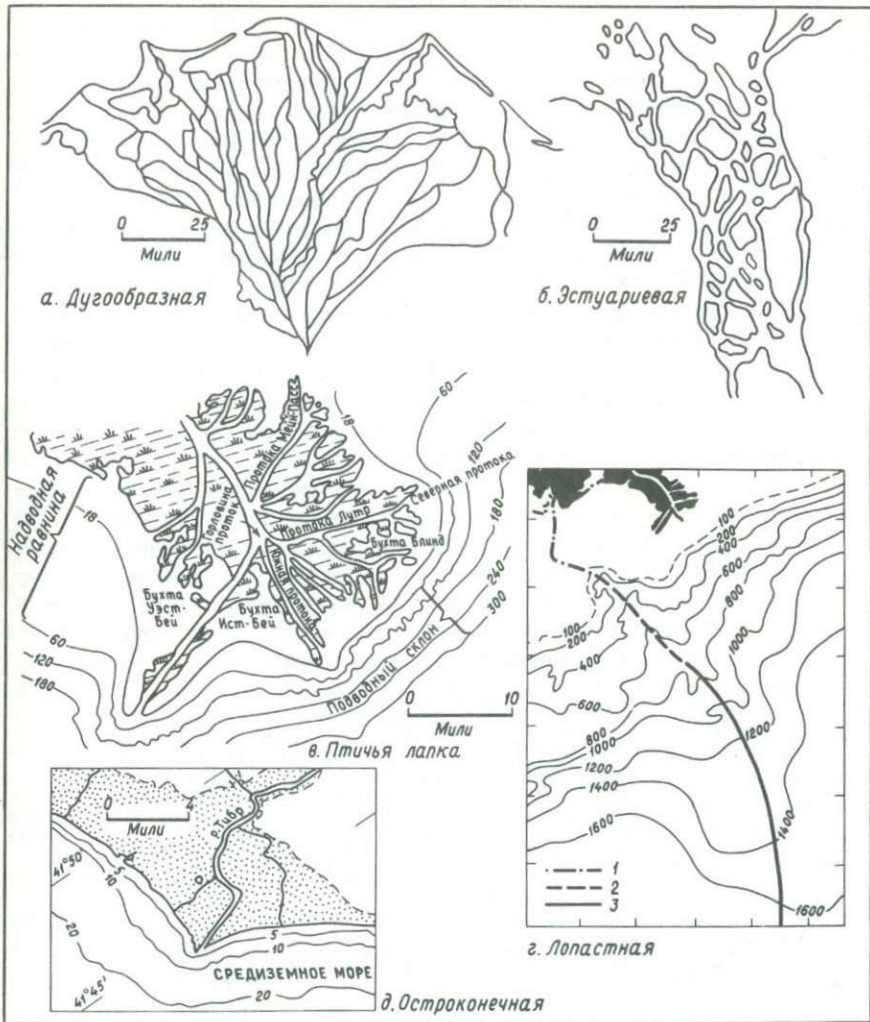
¹⁾Расширенный участок водовода, в котором отлагаются взвешенные частицы. — Прим. перев.

природы рукавов или формы. Любая классификация, основанная на учете фациальных факторов или количества и природы рукавов, не найдет большого применения при изучении палеodelьт. Даже классификация, базирующаяся на внутренних свойствах дельты, будет иметь только ограниченное применение в силу несовершенства наших знаний. До тех пор пока не будут достоверно установлены диагностические критерии фациальной и литологической обстановок, по мнению автора, можно использовать предварительную классификацию по внешней форме. Во всяком случае, известны палеodelьты, отчетливость форм которых позволяет отыскать их аналоги в современных обстановках осадконакопления. Несомненно, что дальнейшее расширение познаний о дельтах позволит установить их подтипы и создать более совершенную классификацию.

Дугообразная дельта. Еще 2500 лет назад Геродот обратил внимание на схожесть формы субаэральной части дельты Нила с греческой буквой Δ (дельта); таким образом, этот крупный участок наращивания берега он называл дельтой. При более пристальном рассмотрении (фиг. 92, а) можно обратить внимание, что дельта имеет вид треугольника, причем сторона, совпадающая с береговой линией, выпукла в сторону открытого моря (т. е. дугообразная). Как правило, дельту реки Нила считают прототипом всех дельт.

Эстуариевая дельта. Эстуариевая дельта имеет воронкообразную форму, ее длина обычно в несколько раз превышает максимальную ширину, что можно видеть на примере дельты реки Маккензи (фиг. 92, б). Рукава разъединяются и вновь соединяются и разобщены песчаными барами или островами, которые местами могут быть сложены алевритами. Состав осадков почти полностью контролируется особенностями пород, продукты выветривания которых переносятся рекой. Отложения эстуария могут аккумуляроваться в устьях тех рек, где направление потока вод меняется на обратное вследствие приливов. Эстуарии развиваются в устьях рек, впадающих в водоем, берега которого испытывают погружение. Однако эстуариевые дельты образуются не во всех эстуариях. Они образуются только там, где сила напора потока и энергия приливов почти эквивалентны и где потоками, помимо глинистого материала, переносится также песчаный и алевритистый материал. Нанцем [203] описан прекрасный пример олигоценовой палеodelьты такого типа.

Дельты в форме птичьей лапки. Дельты этого типа, как свидетельствует название, имеют форму птичьей лапки (фиг. 92, в). Число рукавов относительно невелико, и ширина отдельных русел вполне сопоставима с их глубиной. Такие дельты формируются в более глубоководных условиях, чем чаще встречающиеся дугообразные дельты: либо вблизи края континентального шельфа, либо в



Ф и г. 92. Классификация дельт по их форме.

а — дугообразная дельта; б — эстуариевая дельта; в — дельта в форме птичьей лапки; г — лопастная дельта (1 — погребенный каньон; 2 — подводный каньон; 3 — подводная дельта); д — остроконечная дельта.

озерной обстановке, где наблюдается сравнительно резкое "раскрытие" устья потока при его впадении в озеро. Этот тип дельт не совсем обычный, хотя характерными примерами дельт типа птичьей лапки прибрежно-морской и озерной обстановок могут служить со-

ответственно реки Миссисипи и Сент-Клер. Краткий обзор особенностей строения современной дельты реки Миссисипи приведен в специальном разделе. К сожалению, в отношении дельты реки Сент-Клер аналогичной информации не имеется.

Лопастная дельта. Под термином "лопастная дельта" автор понимает комплекс отлагаемых рекой осадков, мощность которого сокращается в направлении к центру бассейна. Бейтс [17] рассмотрел одну из таких дельт, образованную палео-Миссисипи в плейстоценовое время (фиг. 92, *г*) в условиях гиперпикнального подтока. Фиск [85] указывал, что уровень моря в течение пяти отделенных друг от друга этапов располагался на 137 м ниже современного, в результате чего палео-Миссисипи промывала каньон в толще пород субаэралью обнаженного шельфа Мексиканского залива. Фиск [88] установил, что верховья этого каньона почти совпадали с устьем реки Миссисипи в течение поздневисконсинского этапа понижения уровня моря. Бейтс [17] отмечал:

" В результате эрозии аллювиальной долины Миссисипи в течение каждого понижения уровня моря рекой переносилось около 5000 км³ обломочного материала, что дает основание предполагать образование в плейстоценовое время глубокого каньона при условии, если эродированный материал одного или двух ледниковых периодов перемещался в сторону моря тем же путем, что и турбидитовые потоки. Кроме того, в результате перемещения этого осадочного материала в сторону бассейна разгрузки в устье каньона должна была сформироваться дельта".

О возможном наличии такой подводной дельты свидетельствует отчетливый изгиб линий равных глубин на фиг. 92, против устья каньона между отметками 700 и 1700 фатом (1250 и 3050 м). Если обращенный к морю склон этого участка дна восстановить в том виде, каким он был в плейстоценовое время, то лопастная дельта будет уже и более утоненной.

Другой пример лопастной дельты приведен в работе Пеппера и др. [208] (см. фиг. 92, *г*). Эта раннемиссисипская дельта, по-видимому, сформировалась в мелководном эпиконтинентальном море. Она сложена преимущественно красноцветными глинами, в толщу которых врезаны глубокие русла, заполненные в дальнейшем песчаным материалом. Основное русло у устья не разветвлялось на серию протоков, как в случае дугообразной дельты, скорее, наоборот, оно питало многочисленные боковые русла, которые отходили от него в различных точках на всем его протяжении. Такая дельта, несомненно, формировалась явно в иных фациальных условиях, чем палеodelта реки Миссисипи. Данбар и Роджерс [73] предполагали, что она образовалась в мелководном эпиконтинентальном море, в котором приливы были незначительны. Они отмечали:

"В силу того что свод Цинциннати, образуя протяженный полуостров Цинциннати, блокировал с запада от штормовых волн залив Огайо, в последнем создались такие условия, при которых деятельность рек полностью доминировала над деятельностью сил моря. Тем не менее залив был настолько мелководным, что локально возникающие волны могли достичь дна, способствуя тем самым распространению мелкозернистых осадков. Резких перегибов склона не фиксируется, и весь комплекс представлен осадками надводной равнины".

Остроконечная дельта. Остроконечной дельтой называют комплекс осадков, образующийся по обоим краям основного русла по мере того, как оно, наращиваясь, выдвигается дальше в море от первоначальной береговой линии, и имеющий в плане треугольную форму. Дельты этого типа резко отличаются от дугообразных дельт тем, что в направлении к центру бассейна разгрузки они сужаются до точки. Кроме того, ниже середины дельты от основного русла отходит только одно ответвление без каких-либо видимых рукавов. Бейтс [17] дельты данного типа связывал с устьями тех рек, ежегодный объем разгрузки которых составлял около $420 \text{ м}^3/\text{с}$, и в качестве примера приводил дельту реки Бразос, Техас. Другой пример — дельта реки Тибр, Италия, — показан на фиг. 92, *д*.

ДЕЛЬТА РЕКИ МИССИСИПИ

В устье реки Миссисипи наблюдается аккумуляция наиболее молодых осадков, поставляемых рекой, образующей по меньшей мере шесть дельт, которые все вместе носят название "дельтовая равнина". В геологической литературе достаточно полно описаны особенности строения как современной дельты в форме птичьей лапки, так и дельтовой равнины. Описание типа фаций, условий осадконакопления и истории геологического развития дельтовой равнины читатель может найти в работах Трубриджа [264], Рассела [231], Рассела и Рассела [223], Фиска [85], Фиска и др. [94], Скрутона [240] и Колба и Ван-Лопика [161]. В настоящей работе при рассмотрении дельтового комплекса реки Миссисипи прежде всего особое внимание уделяется тем аспектам, которые, по мнению автора, должны иметь первостепенное значение при установлении и анализе его захороненных аналогов.

Современная дельта реки Миссисипи, имеющая форму птичьей лапки (Бализе), образовалась почти 500 лет назад. Субаэральная часть этой дельты занимает площадь 339 км². Однако свыше трех четвертей осадочного комплекса находится ниже уровня моря, где он отлагался на широкой платформе, простирающейся приблизительно до глубины 90 м (фиг. 92, *в*). Таким образом, суммарная площадь субаэральной и подводной частей дельты составляет около

1783 км². Эти размеры резко контрастируют с площадью палеодельты Миссисипи, которые занимали площадь до 7700 км². Максимальная мощность, включая прodelьтовые глины, в которые врезаны потоки, приблизительно составляет 90 м. Средняя интенсивность разгрузки современной реки Миссисипи достигает 16 800 м³/с.

В течение коротких периодов интенсивных штормов, как отмечал Кобб [51], скорость разгрузки возрастает до 37 800 м³/с. Фиск и др. [94] установили, что переносимый рекой материал приблизительно состоит из "7% песка, 38% алевритистых частиц и 55% глинистых частиц". По мнению Скрутона [240], "взвешенный в воде материал содержит около 50% глинистых частиц, 48% алевритистых частиц и только около 2% песка". Хотя данные Фиска и Скрутона о гранулометрическом составе переносимого материала различаются, тем не менее обращает на себя внимание очень низкое содержание песчаного материала в обоих подсчетах. В равной мере важен и тот факт, что немногим менее 99% песка представлено мелкозернистой и тонкозернистой фракциями. Среднегодовая масса материала, переносимого во взвешенном состоянии рекой Миссисипи в Мексиканский залив, по расчетам Холли [130], составляет 400 млн. т. К этой величине он добавляет 25%, приходящихся на илы, гравий и прочие обломки, влекаемые потоком по ложу, в связи с чем суммарная масса за год достигает 500 млн. т. В заливе в процессе седиментации происходит фракционирование осадочного материала. Максимальная скорость седиментации вблизи берега составляет 0,3–0,5 м/год, а далее в море 0,03 м/год.

Отложения надводной равнины. Согласно Скрутону [240], толща надводной равнины

"... сложена осадками маршей, алевритами и песками фронтальной части дельты совместно с отложениями русел, прирусловых валов, ответвляющихся протоков, а также глинами и ракушняком межпротоковых заливов, озер и приливных течений... Взаимные переходы по горизонтали и по вертикали бывают как постепенными, так и резкими. Глубокий размыв, отложения временных бурных потоков и обстановка спокойных маршей — все это характерные черты толщи надводной равнины. Наличие резких перерывов в осадконакоплении и обычная гетерогенность этих слоев заметно контрастирует с постепенными изменениями, которые наблюдаются в других осадочных комплексах... Мощность толщи надводной равнины вблизи современной береговой линии обычно не превышает 3 м. Однако мощность толщи заполнения может превышать 45 м".

Отложения маршей, представленные обогащенными органикой глинистыми алевритами и алевритистыми глинами, приурочены к межпротоковому участку. В современной дельте Миссисипи их мощность достигает 0,3–0,9 м.

Алевриты и пески фронтальной части дельты представляют собой наиболее существенную часть дельтовых отложений; они образуют почти сплошной покров вдоль фронтальной части дельты. Образование их обусловлено совместным воздействием приюба и вдольбереговых течений, благодаря которым перераспределились принесенные к берегу по протокам пески и алевриты. Отложения фронтальной части дельты распространены на площади в несколько сотен квадратных миль, что обусловлено постепенным выдвиганием дельты.

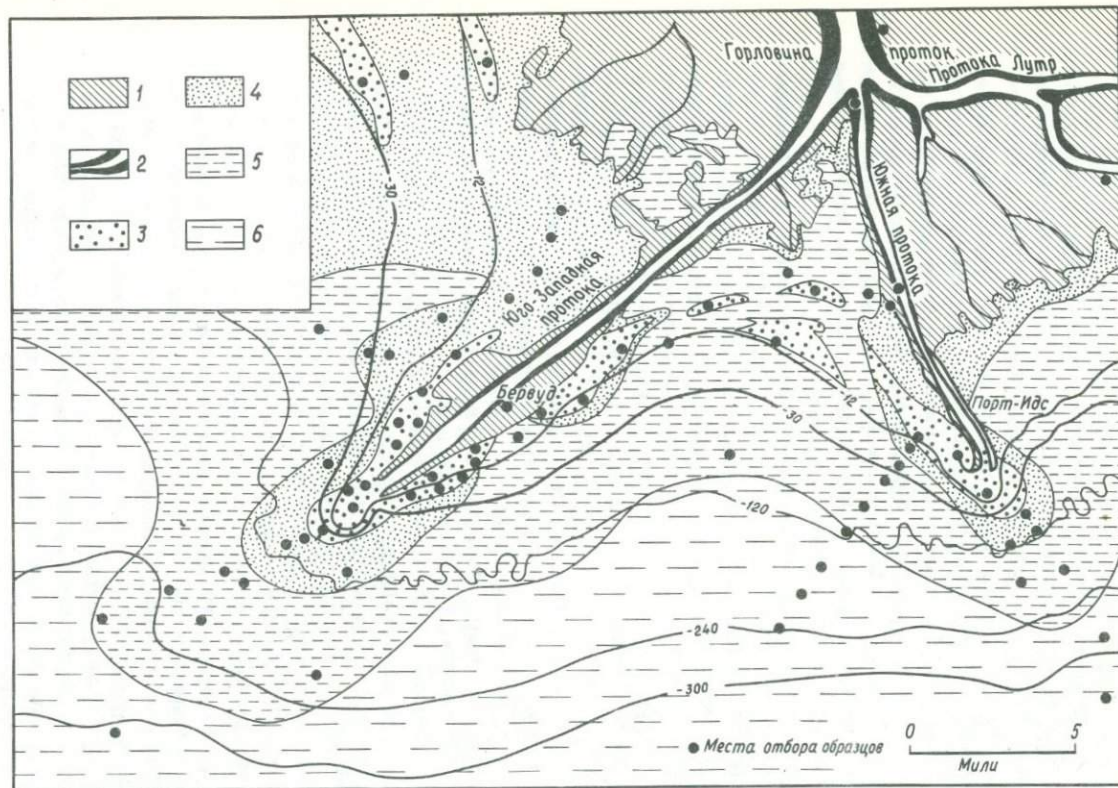
Некоторые небольшие протоки прекращали свое развитие и заполнялись в нижней части массивными, мелко- и тонкозернистыми песками, которые вверх по разрезу переходят в слоистые пески, песчанистые алевриты и алевритистые глины.

Прирусловые валы субаэральной надводной равнины образуют хребты по обеим сторонам протоков. Фиск и др. [94] писали:

"Отложения прирусловых валов образуют одну из самых четко выделяющихся групп осадков на дельтовой равнине. Они представлены отчетливо слоистыми, не содержащими ископаемых остатков глинистыми алевритами и алевритистыми глинами, отлагавшимися в течение сезонных паводков". Их высота над уровнем моря составляет в среднем 3 м. Колб и Ван-Лопик [161] отмечали, что "прирусловые валы возвышаются над центральной частью старицы Лалутр приблизительно на 3,5 и 2,5 м соответственно". Они указывали, что "высота, мощность, ширина и размер зерен осадков, слагающих прирусловые валы, развитые по краям современных и старых протоков Миссисипи, уменьшаются вниз по течению".

Вдоль фронтальной части маршей развиты отложения ответвляющихся протоков, они представлены переслаиванием косослоистых мелкозернистых песков и глинистых алевритов. Фиск и др. [94] отмечали, что "обширные марши развивались в зонах некоторых трогов как следствие разветвления разносящих протоков в период паводка". Объединяющиеся субаквальные субдельты, сложенные алевритистыми песками и песчанистыми алевритами, отлагались радиально расходящимися протоками. Эти осадки прежде всего аккумуляровались там, где они попадали в обстановку маршей, которые характеризовались обилием растительного материала. Помимо осадков ветвящихся протоков, в межпроточных трогах отлагались осадки других типов. Более глубокие участки трогов заполнялись массивными, плохосортированными алевритистыми глинами, в то время как в периферийных участках трогов накапливались слоистые песчанистые и глинистые алевриты.

Отложения подводного склона дельты. Скрутон [240] писал: "Отложения подводного склона дельты представлены алевритистыми глинами продельты и относительно более грубозернистыми песками, алевритами и глинами, отложившимися вне преде-

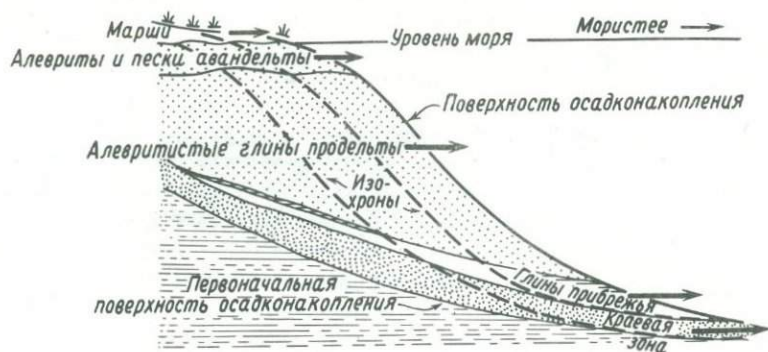


Фиг. 93. Схема распространения фациальных типов осадков в юго-западной части дельтового комплекса типа птичьей лапки [94 с изменениями].

Фации дельтовой равнины; 1 – марши (обогащенные органикой глинистые алевроиты и алевроитистые глины); 2 – прирусловые валы (глинистые алевроиты и алевроитистые глины). Фации дна залива: 3 – пески и алевроитистые пески; 4 – песчанистые алевроиты и глинистые алевроиты; 5 – алевроитистые глины (25 – 50% алевроита); 6 – глины (менее 25% алевроита).

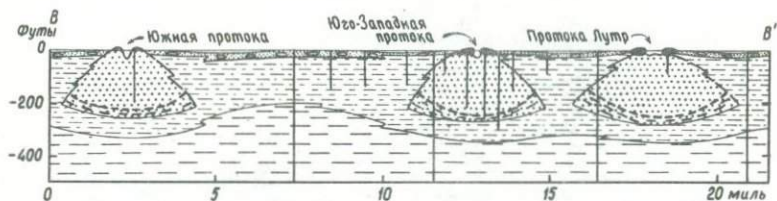
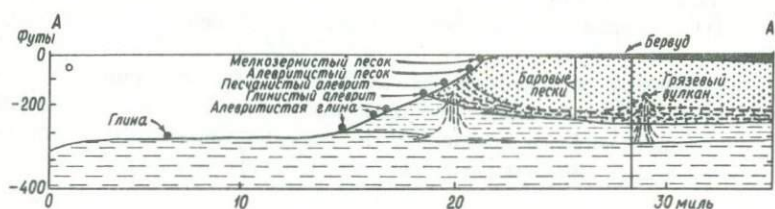
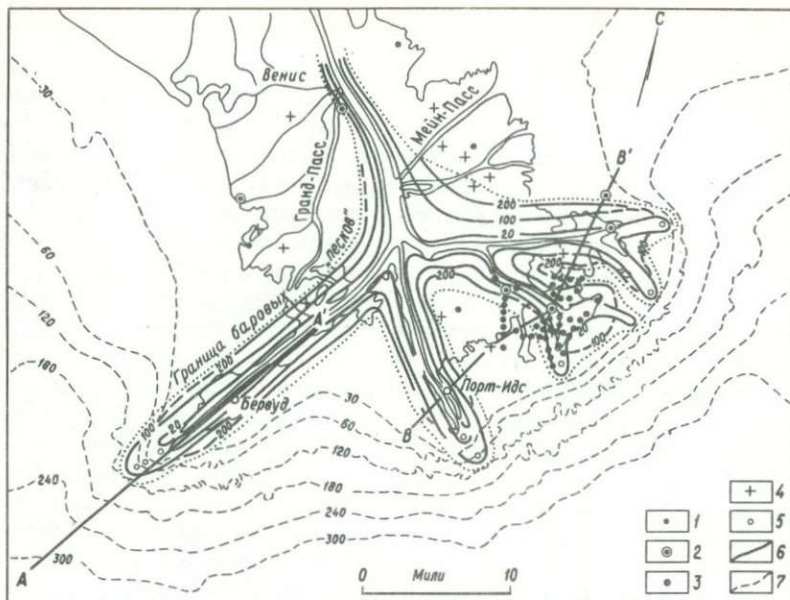
лов основных рукавов. Мощность осадков подводного склона на севере очень мала, а вблизи Юго-Западной протоки она достигает 75 м; увеличение мощности в сторону моря, обусловленное выдвиганием дельты в более глубоководные зоны, происходит главным образом за счет продельтовых алевритистых глин". Фиск и др. [94] отмечали, что осадки данного типа образуют зону мелкозернистых образований, покрывающих авандельту и прилегающее дно залива. Условно они расчленены на внутреннюю и внешнюю зоны линией, проходящей между алевритистыми глинами и глинами (фиг. 93); на участках выступов они переходят в баровые "пески". Осадки внутренней зоны являются переходными к баровым "пескам". Выдвигание подводного склона дельты в сторону моря схематически показано на фиг. 94. Поверхность осадконакопления подводного склона дельты субпараллельна изохронам. Наклон отложений подводного склона на фиг. 94 сильно увеличен. Непосредственно к юго-западу от Юго-Западной протоки поверхность осадконакопления подводного склона характеризуется наклоном $20'$. Наклон этой поверхности в зоне межпроточного трога между Юго-Западной и Южной протоками составляет $12'$. Следовательно, такие наклоны резко контрастируют с наклоном в 30° , характерным для надводного склона дельт типа Гилберта.

Каждая протока дельты типа птичьей лапки, как показано на фиг. 95, располагается над глубоководным баром пальцевидной формы. Последний сложен хорошо отсортированными мелкозернистыми тонкослоистыми песками, которые по простирацию переходят в



Фиг. 94. Последовательная смена обстановок осадконакопления в сторону моря [240].

С ростом дельты различные обстановки седиментации мигрируют в сторону моря, что приводит к формированию относительно однородных осадочных толщ.



Ф и г. 95. Пальцевидные бары дельты Миссисипи [94].

А — А' продольный разрез пальцевидного бара Юго-Западной протоки; В — В' поперечный разрез через пальцевидные бары под протоками Южной, Юго-Западной и Луитр. 1 — контрольное бурение; 2 — керн; 3 — описание шлама; 4 — электрокартажные диаграммы; 5 — образцы, взятые со дна залива; 6 — изогипсы кровли баровых "песков"; 7 — изогипсы поверхности дна залива, континентальные фации; 8 — прирусловый вал; 9 — межпроточный трог, прибрежные фации; 10 — баровые "пески"; 11 — авандельта; 12 — отложения дна залива.

алевриты и глины. Кроме того, переходная зона наблюдается в по­доше, причем она имеет наименьшую мощность на участке непо­средственно под средней частью пальцевидного бара (фиг. 95). Та­кие песчаные тела несколько более протяженны, чем сами протоки, и симметрично двояковыпуклы в поперечном сечении. Их ширина приблизительно составляет 6,5–8,0 км, а максимальная мощность 60–75 м. Пальцевидные бары генетически связаны с серповидными барами, которые формировались несколько ниже периферийных участков нескольких протоков. Как правило, пески баров в форме по­лумесяца до глубины около 15 м лишены примеси алевритов и глин. После того как образовалась такая толща, последующее на­копление песков приводило к уплотнению и смещению нижележащих продельтовых алевритов и глин. Этот процесс дифференциального уп­лотнения и смещения продолжается до тех пор, пока мощность пес­ков в осевой части достигнет приблизительно 75 м. Серповидный бар выдвигается в сторону моря и образует пальцевидный бар, как показано на фиг. 95. Фиск [89] писал:

“В результате этого выдвигающиеся пальцевидные бары в по­перечном сечении имеют двояковыпуклую форму. После того как устье протоки продвинулось еще далее в сторону моря, баровые осадки продолжают отлагаться до тех пор, пока переливающая­ся через них вода не сформирует прирусловые валы. Послед­ние, окаймляя русло протоки, образуются вдоль осевых участков каждого пальцевидного бара, и увеличиваются в мощности к краям русла; следовательно, основное тело прируслового вала располагается непосредственно над участком повышенной мощ­ности пальцевидного бара и суммарный вес песков этого бара и осадков вала обуславливает уплотнение нижележащих продель­товых осадков. В процессе длительного погружения верхняя поверхность бара в конце концов оказывается глубоко захоро­ненной под толщей пресноводных и солоноватоводных осадков”.

Следует отметить, что пески пальцевидных баров, имеющие мощ­ность 75 м и ширину 6,5–8 км, не отлагались в старых протоках. Известно, что они представлены протяженными, двояковыпуклыми линзами хорошо отсортированных песков, ширина которых на­много превышает ширину протоков, расположенных над ними. В силу этого их нельзя считать русловыми песками.

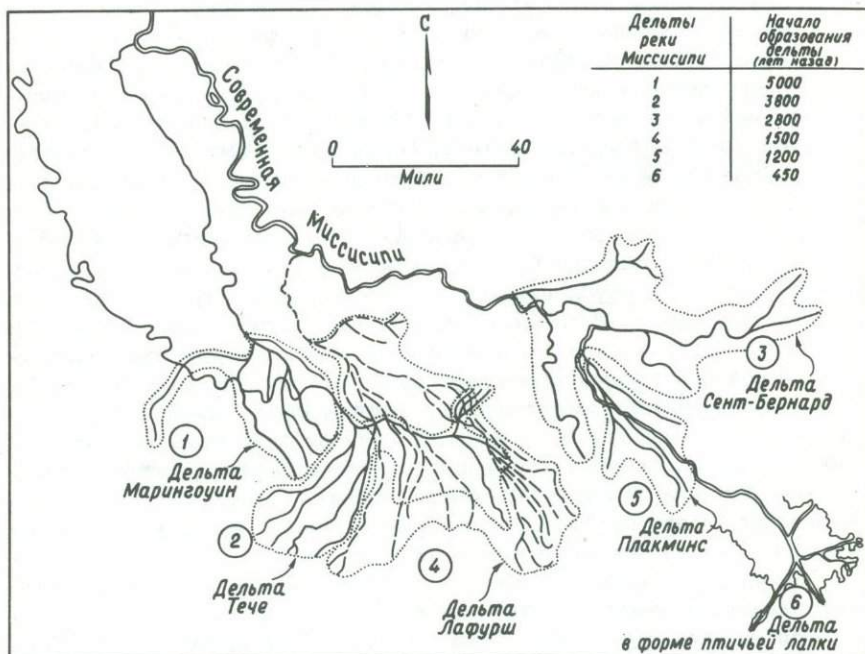
Донные отложения дельты. Максимальная мощность дон­ных отложений дельты составляет 6–9 м. Хотя они частично обра­зуются за счет приносимых рекой осадков, тем не менее при опре­делении донных отложений дельты отложения окраин, по­видимому, не следует объединять с прибрежными глинами, поскольку их не обнаружено в более глубоких водах южнее дельты.

Грязевые вулканы. Грязевые вулканы представляют собой небольшие, неправильной формы, недолговечные острова, сложенные

алевритистыми глинами и глинами, которые как бы "вскипают" вблизи устьев протоков. Известно также, что они внедряются в неконсолидированные пески пальцевидных баров. Они обычно сложно дислоцированы и нарушены сбросами и могут выступать над уровнем моря более чем на 3 м. Морган [197] считал, что это сместившиеся вертикально вверх глины и алевритистые глины подводного склона дельты, которые поднялись в результате опускания удаленных участков песков пальцевидного бара. В глинах этих грязевых вулканов найдена морская фауна, обитающая на глубине 90–120 м.

ДЕЛЬТОВАЯ РАВНИНА РЕКИ МИССИСИПИ

Дельтовая равнина Миссисипи сложена шестью или семью дельтовыми комплексами, формирование которых происходило в течение последних 5000 лет. Последовательность накопления отдельных дельтовых комплексов обозначена цифрами на фиг. 96, которая

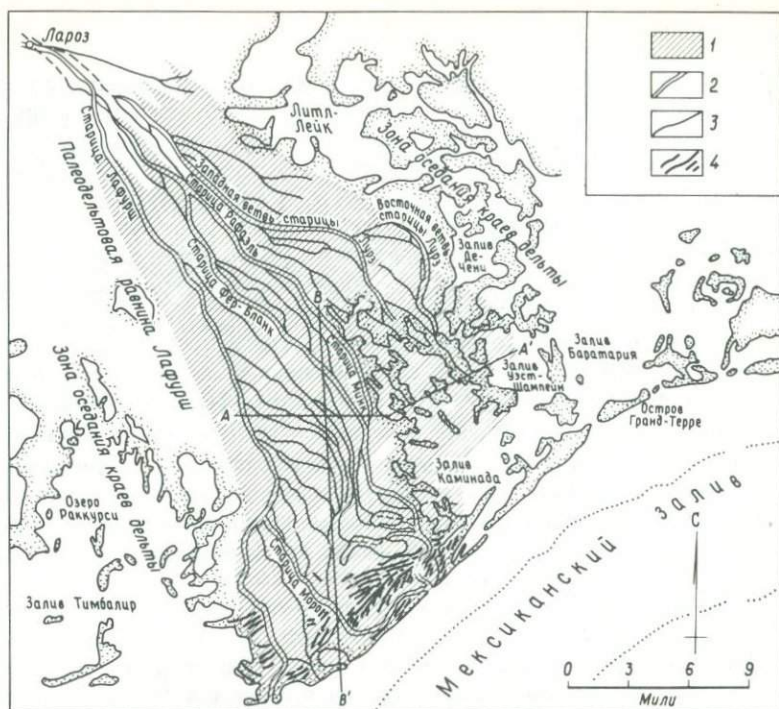


Фиг. 96. Последовательное смещение русла и развитие дельт в пределах дельтовой равнины Миссисипи [113].

представляет собой видоизмененную схему, заимствованную из работы Гулда и Моргана [113]. Время, соответствующее началу образования каждого комплекса, показано в верхнем правом углу фигуры. Каждая из этих дельт является следствием значительного смещения русла реки Миссисипи. Дельта в форме птичьей лапки (Бализе) заметно отличается от других дельт, которые предшествовали ей. Палеodelьты характеризуются грубодуговидными очертаниями, они крупнее, и им свойственно большее количество рукавов по сравнению с дельтой, имеющей форму птичьей лапки. Имеются отличия и во внутреннем строении, что в свою очередь сказывается на методике поисков захороненных дельт в форме птичьей лапки и дугообразных. Колб и Ван-Лопик [161] установили, что "в отложениях палеodelьт пески приурочены к маломощным, имеющим широкое латеральное распространение фронтальным отложениям проток и к мощным узким толщам заполнения проток. В современной дельте (в форме птичьей лапки) пески приурочены к широкому, большой мощности "пальцам"¹⁾, которые подстилают главные протоки. Такое несходство между древними и современными дельтами, надо полагать, обусловлено различием глубин водоемов, в которые они выдвигаются. Современная дельта Бализе образовалась у края континентального шельфа, где первоначально глубина превышала 90 м. В отличие от этого в результате разбуривания дельтовых комплексов Лафурш и Сент-Бернард установлено, что выдвигание этих дельт происходило в водоемы с глубинами от 9 до 45 м.

Развитые на обширной площади слои песков фронтальных частей проток Фиск [89] называл "покровными песками авандельты". Песчаный покров авандельты, распространенный на площади 777 км² и имеющий мощность от 6 до 24 м, подстилает восточную субдельту дельты Лафурш (фиг. 97). В удаленных частях проток такие пески в результате деятельности волн и вдольбереговых течений размывались и затем перестлаивались вдоль всей авандельты. По мере выдвигания всей дельты пески авандельты отлагались в виде регрессивного плаща. Условия отмелей или мелководья являются идеальными для отложения таких песчаных тел. Источники сноса, обуславливающие накопление песков авандельты, должны были располагаться на глубинах, не превышающих уровня волновой базы, который при обычных условиях приблизительно составляет 9 м. Там, где мощность авандельтовых песков превышала уровень волновой базы, они уплотнялись, что приводило к смещению нижележащих продельтовых глин.

¹⁾Согласно Ван-Лопику [письм. сообщ. 6 февраля 1974], "более точной следует считать такую формулировку: широкие, мощные, удлинённые линзы, образующие вытянутые пальцы".



Ширина талчи
заполнения русел проток
дана схематично

0 1 2 3
Мили

8
Футы
Старича Минк
Старича Фер-Бланк



Ф и г. 97. Покровные пески авандельты восточной части субдельты комплекса Лафури — Миссисипи [89].

1 — покровные пески; 2 — старичи на участках прежних рукавов Лафури; 3 — следы проток Лафури, не занятых потоками; 4 — баровые хребты в маршах.

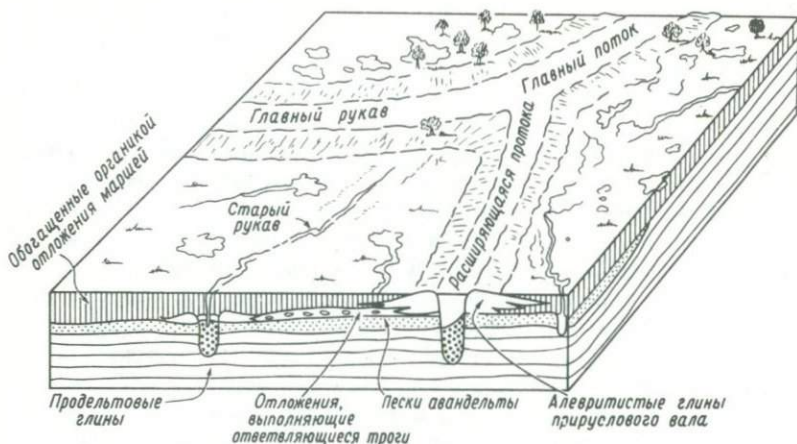
Все палеодельты дельтовой равнины Миссисипи, по-видимому, отлагались в мелководных обстановках, благоприятных для образования многочисленных рукавов. Фиск [89] писал:

"Эти палеопотоки прорезали глубокие узкие русла наподобие тех, что развиты в верхнем течении современной Миссисипи, где ее ложе и банки представлены алевроитами и глинами. Такие русла заметно отличаются от относительно широких и неглубоких рукавов дельты в форме птичьей лапки, которые прорезали свое русло в песчаных пальцевидных барах (фиг. 95). По мере выдвигания палеоавандельт рукава приобретали разветвленную форму, так как при их удлинении усложнялось строение русла и межпротоковые трогги разделялись на большое число мелких мульд... В процессе роста дельты протоки быстро закрывались и запечатывались хорошо отсортированными песками руслового заполнения, которые образуют узкие, мощные песчаные тела, характерные для мелководных дельтовых комплексов.

Когда какая-либо протока закрывается, то, согласно Колбу и Ван-Лопику [161],

"в том месте, где протока отходит от основного русла, образуются песчаные клинья. Последние прослеживаются на различные расстояния вниз по течению. В крупном заброшенном рукаве реки Миссисипи — Метери, который протягивается через Новый Орлеан, несколькими скважинами установлено наличие песчаного клина, выстилающего дно старой протоки, который протягивается вниз на расстояние около 14,5 км (Колб и Ван-Лопик, 1958 [161]). Выше этого песчаного клина залегает сопряженный клин мелкозернистого материала. Сомнительно, чтобы песчаный клин таких размеров мог образоваться где-либо, помимо крупной протоки. Однако известно, что в оставленной рекой дельте Лафурш развиты глубокие, узкие, заполненные песком протоки... Имеющиеся в настоящее время данные показывают, что осадочный материал, заполняющий протоки, чрезвычайно разнообразен, но клин относительно грубозернистого материала, напоминающий остатки толщи заполнения протоки, всегда запечатывает верховье".

Большинство рукавов прорезает авандельтовые пески и даже нижележащие продельтовые глины, как показано на фиг. 98. Когда эти русла заполняются песками, алевроитами и глинами, то в целом образуется единая толщина песков, прерываемая в отдельных участках линейными трендами повышенной мощности песков, увеличение мощности первоначально происходило за счет нижележащих глин. Дельта Лафурш (фиг. 97) характеризовалась большим числом крупных рукавов, которые, по мнению Колба и Ван-Лопика, "... были



Ф и г. 98. Блок-диаграмма мелководной дельты, на которой можно видеть, что русла врезаны в авандельтовые пески и даже в подстилающие продельтовые глины [91].

настолько тесно сближены, что внутридельтовые отложения образовали довольно выдержанный песчаный разрез, не прерываемый прослоями глин”.

Песчаные острова окраины дельты. Установлено, что в каждую из шести стадий, когда Миссисипи меняла свое русло, образование дельты происходило на новом участке. Когда на том или ином участке формирование дельты прекращалось, там продолжалось уплотнение нижележащих продельтовых илов подводного склона и последующее погружение поверхности дельты. Вследствие деятельности волн и вдольбереговых течений продолжалось переотложение осадков окраины дельты, прекратившей развитие. Скрутон [240] указывал, что “к числу наиболее отчетливых изменений древней дельты можно отнести образование крупного водоема на том месте, где были марши”. После того как река перестает поставлять осадки в окраинную часть дельты, волны и вдольбереговые течения перерабатывают неконсолидированные осадки, вымывая алевриты и глины и образуя дугообразный барьерный остров, обращенный выпуклой стороной к морю и отделяющий обводненную часть древней дельты от открытого моря. Барьерный остров продолжает расти по мере того, как дельтовые отложения опускаются под действием уплотнения. Скрутон [240] писал: “Процесс сортировки и концентрации наиболее активно протекает на мелководье, где наиболее интенсивно проявляется деятельность волн и где первоначально отложилась основная масса песка, но он фиксируется также и на глу-

бине 9–15 м в районе островов Шандалур¹⁾. Острова Шандалур образуют дугу, расположенную против дельтового комплекса Сент-Бернард–Гтакминс, и отделяет проливы Шандалур и Бретон от открытого моря. Другие барьерные острова развиты вблизи первоначальных границ других дельт палео-Миссисипи. Их генетическая связь с окраинами дельт рассматривается в качестве поискового признака, позволяющего отыскать их аналоги в разрезах палеодельт.

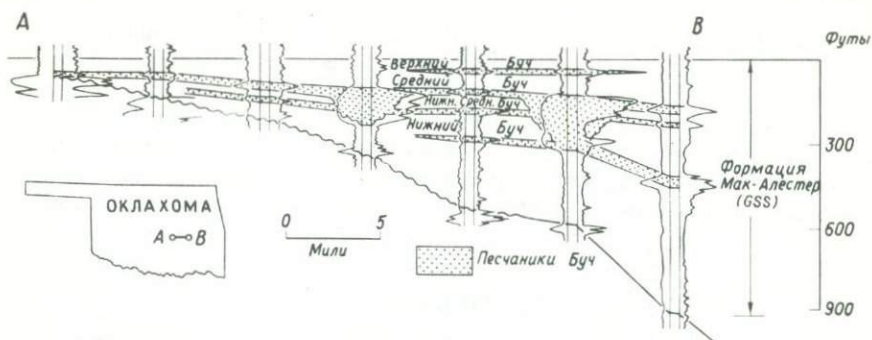
ПАЛЕОДЕЛЬТЫ

В геологической литературе описано довольно ограниченное число достоверно установленных палеодельт, несмотря на то обстоятельство, что с песчаниками такого типа связаны крупные залежи нефти и газа. Широкий диапазон размеров, разнообразие форм и фациальных типов таких комплексов затрудняют их выделение в разрезах. Нижеприведенный обзор основан на рассмотрении нескольких дельт, изученных автором. Некоторые палеодельты имеют довольно крупные размеры, и залежи нефти и газа приурочены только к отдельным их участкам, в то время как размеры других невелики и залежи углеводородов встречаются почти повсеместно там, где присутствуют русловые песчаники.

Дельта Буч¹⁾. На востоке оклахомской части бассейна Аркома в ранненеогеновое время сформировалась крупная дельта. Главная часть этой дельты занимает площадь около 5180 км². Она отлагалась в основном в мелководных условиях шельфа. При анализе песчаников, маскирующих данную дельту, следует рассмотреть всю генетически взаимосвязанную толщу GSS, частью которой они являются. Для этой цели была построена серия геологических профилей, аналогичных изображенному на фиг. 99, по границам рядов квадратов, показанных на фиг. 101. Затем эти профили были увязаны воедино путем построения серий меридиональных профилей. Все скважины, не использованные при построении серии корреляционных разрезов, в дальнейшем были увязаны с наиболее близко расположенными скважинами, попадающими на линии разрезов. Таким образом, перед тем как приступить к построению карты изоплахит формации Мак-Алестер, были установлены ее верхняя и нижняя границы (GSS).

На фиг. 99 показан электрокаротажный разрез формации Мак-Алестер, характеризующий большую часть округа Семинол, Оклахома, на котором можно видеть увеличение мощности этой толщи вкострости простирающегося северо-западного шельфа бассейна Аркома. В

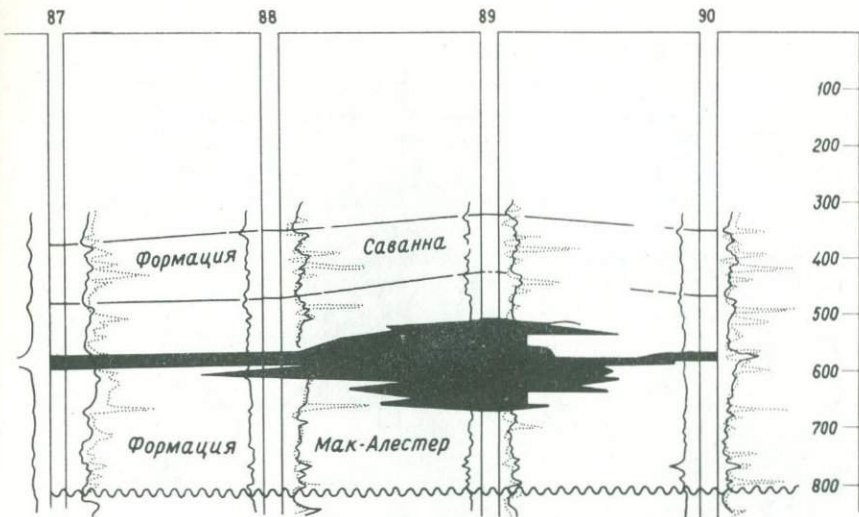
¹⁾ Этот раздел и два других взяты по существу без изменений из более ранней статьи автора [44].



Ф и г. 99. Корреляция пачек песчаников Буч формации Мак-Алестер (пенсильваний), западная часть бассейна Аркома.

целом эта выклинивающаяся толща преимущественно сложена глинами, среди которых выделяются четыре пачки песчаников Буч. Все песчаные тела имеют линзовидную форму, за исключением средней пачки, которая на фиг. 99 изображена в виде почти сплошного покрова. Данный профиль нельзя считать достоверным, поскольку расстояние между скважинами велико. Например, известно, что мощность песчаника Средний Буч резко возрастает до 250 футов (76 м). Вследствие этого он в разрезе сливается с песчаником Нижний Средний Буч и даже с песчаником Нижний Буч. Мощность в основном возрастает по направлению к центру бассейна седиментации за счет глин, которые обычно отделяют песчаник Средний Буч от песчаников Нижний Средний Буч и Нижний Буч (фиг. 99). Характер локального увеличения мощности песчаника Средний Буч показан на разрезе (фиг. 100), пересекающем участок, где песчаники Нижний Средний и Нижний Буч не отлагались. Максимальная мощность песчаника Средний Буч достигает 45 м, причем 90% этой мощности приращено за счет подстилающих глин. Наблюдается небольшое сокращение мощности интервала глин выше раздува песчаника.

Формация Мак-Алестер согласно перекрывается отложениями формации Саванна, причем глины этих двух формаций петрографически не различаются. Контакт между ними условно проведен по легко коррелируемому двойному "пику" на кривых сопротивления, снятых малым потенциал-зондом. Этот "пик" выделяется более чем на 90% из 650 проанализированных электрокаротажных диаграмм; он соответствует пласту, залегающему в 9 м ниже подошвы известняка Браун-Лайм, который выбран в качестве исходного репера для построения профилей, изображенных на фиг. 99 и 100.



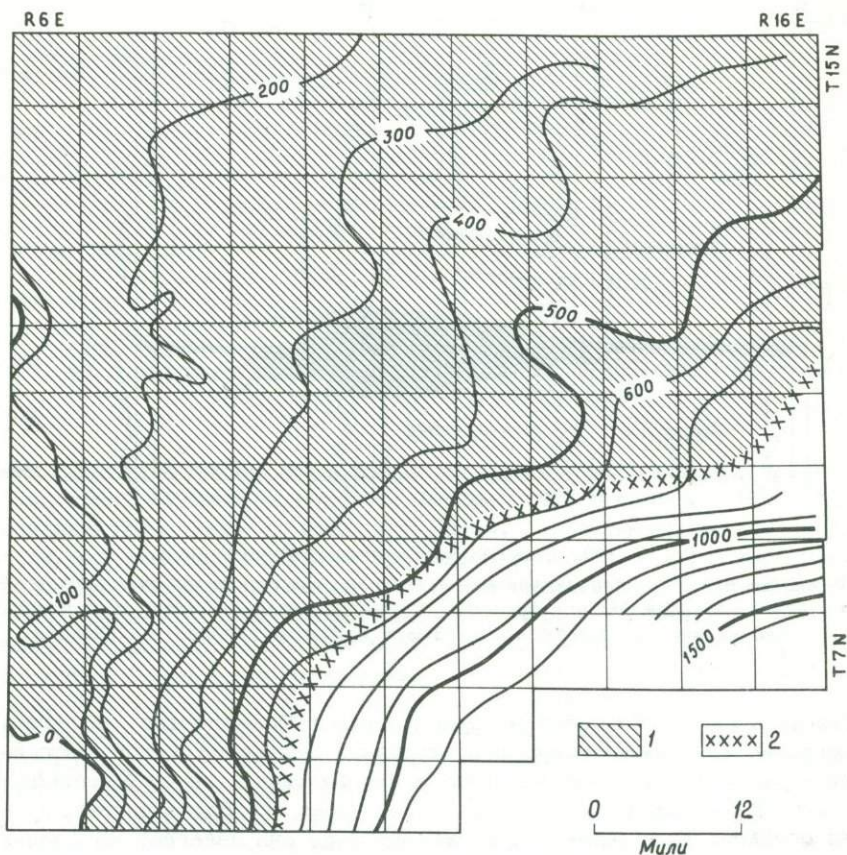
Фиг. 100. Корреляция песчаников Буч (черное).

Мощность русловых песчаников возрастает за счет подстилающих осадков; отмечается незначительное сокращение мощности интервала глин, залегающих непосредственно над участком наибольшей мощности руслового песчанника.

Ближе к центру бассейна Аркома формация Мак-Алестер залегает согласно на глинах Атока, а в окраинной шельфовой части бассейна — несогласно. Далее на запад в направлении к своду Хантон формация Мак-Алестер несогласно перекрывает все более древние пачки осадков. Так, например, на юго-востоке она залегает на глинах и песчаниках свиты Атока, северо-западнее — на последовательно все более древних формациях серии Морроу, а вдоль западной окраины бассейна, где "послеатокское" воздымание и эрозия были наиболее интенсивными, — на миссисипских глинах и известняках.

В результате анализа электрокаротажных диаграмм и проб отложений Мак-Алестер было установлено, что в депрессионной (юго-восточной) зоне развития данная формация почти нацело сложена глинами, но на площади, где ее мощность не превышает 180 м, разрез характеризуется переслаиванием пластов глин, песчаников, известняков и углей. О том, что данный шельф никогда не был по-и крыт большой толщей воды, свидетельствует наличие пластов угля.

Карта изолохит формации Мак-Алестер (фиг. 101) была построена с целью: 1) реконструкции формы северо-западной части седиментационного бассейна Аркома; 2) определения простираения и



Ф и г. 101. Карта изопакит формации Мак-Алестер, округ Семинол, восточная Оклахома.

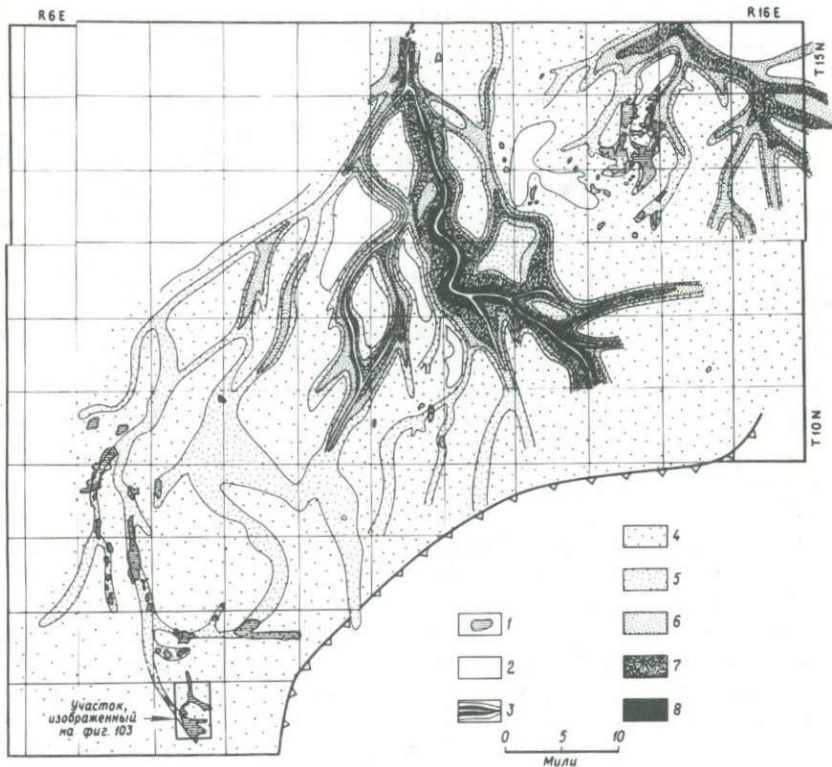
Шарнирная линия отделяет обстановку шельфа на северо-западе от более резко погружающейся области на юго-востоке. 1 — область шельфа; 2 — шарнирная линия.

местоположения "линии флексуры" (шарнирной линии), которая существовала в течение осадконакопления формации Мак-Алестер, и 3) установления основного направления транспортировки песков и илов формации Мак-Алестер.

Мощность формации Мак-Алестер резко возрастает к юго-востоку от "линии флексуры" (фиг. 101) в той части бассейна, где погружение было более интенсивным. В обстановке шельфа к северо-западу от "линии флексуры" мощность в юго-восточном направ-

лении возрастает более плавно. Наибольшая мощность осадков на рассматриваемой площади (499 м) зафиксирована на планшете T7N, R 17E. Простирание изопакит постепенно меняется с северо-восточного до близмеридионального. Такое изменение простирания свидетельствует о том, что в течение осадконакопления формации Мак-Алестер северо-восточная и северо-центральная части закартированного района испытывали соответственно большее прогибание, чем западная.

На фиг. 102 приведена карта суммарных изопакит песчаных лачек Буч формации Мак-Алестер. В северо-восточной части района (планшеты T13-15N, R14-16E) преимущественно развит песчаник Верхний Буч. Затененные площади в северо-центральной части



Ф и г. 102. Карта изопакит песчаников Буч, округ Семинол, восточная Оклахома.

1 - нефтяная залежь; 2 - глины; 3 - рукава; мощность толщи песчаников: 4 - от 0 до 20 футов; 5 - от 20 до 60 футов; 6 - от 60 до 120 футов; 7 - от 120 до 240 футов; 8 - более 240 футов.

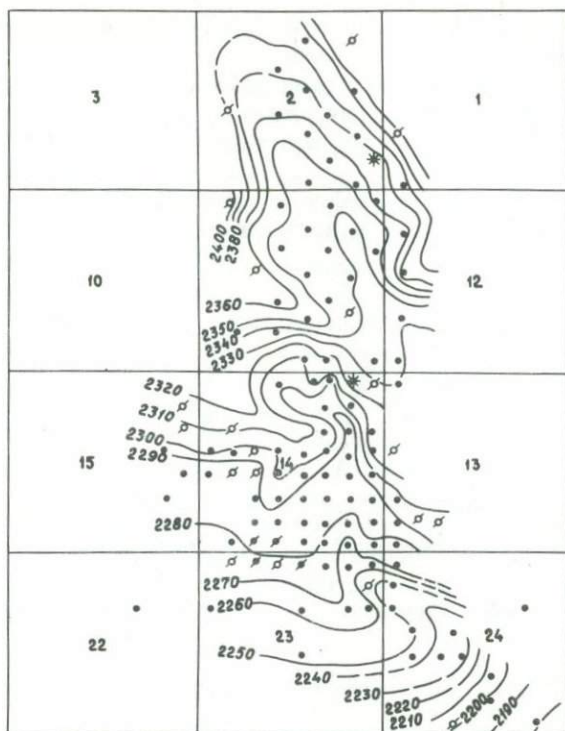
закартированного района соответствуют участкам, в пределах которых совмещены все четыре песчаные пачки Буч. В районе к западу от планшета R12E, где мощность песчаников Буч менее 18,5 м, преимущественным развитием пользуются песчаники Средний Буч; остальная часть разреза представлена глинистыми и известковистыми алевролитами и тонкими прослоями песчаников. Последние можно сопоставлять лишь как "горизонты", а не как литологические пачки. Песчаники Нижний Средний Буч и Нижний Буч отсутствуют, за исключением тех участков, где в разрезе они сливаются с другими пачками в пределах русел.

Наибольшая мощность песчаников на фиг. 102 фиксируется в пределах русла шириной 5–8 км, простирающегося к юго-востоку от планшета T15N, R11E до планшета T11N, R14E. Прослеженная длина этого тела руслового песчаника превышает 56 км, а максимальная мощность составляет более 75 м. Несомненно, что этот песчаник продолжается и далее на юго-восток, но пока не имеется данных, позволяющих проследить его дальнейшее развитие. Участки наибольшей мощности руслового песчаника составляют более 50% суммарной мощности формации Мак-Алестер, остальная часть разреза представлена преимущественно глинами. Под воздействием вышележащих осадков глины формации Мак-Алестер значительно уплотнились, в связи с чем местоположение и простирающие основного песчаника легко можно установить на карте изопахит формации Мак-Алестер (фиг. 101). Поскольку песчаники относительно не уплотнены, то выпуклость изопахит 300, 400 и 500 футов к северо-западу обусловлена исключительно наличием песчаника руслового типа. Этот главный русловой песчаник и многочисленные, меньшие по размерам тела русловых песчаников, заполняли отдельные протоки крупной дельты, вершина которой расположена на севере. Маловероятно, что все протоки, изображенные на фиг. 102, образовались одновременно; данный рисунок, по-видимому, объединяет все стадии развития русловой системы в течение осадконакопления формации Мак-Алестер.

Карта изопахит осадков дельтового комплекса Буч (фиг. 102) построена на основе анализа нескольких тысяч электрокаротажных диаграмм и буровых журналов. Такая карта может служить предварительной геологической основой для проведения более детальных исследований. Пример более детального анализа резервуара Буч и связанной с ним залежи Хокинс в пределах квадрата T6N, R8E приведен на фиг. 103. Продуктивен песчаник Средний Буч, непосредственно перекрытый пластом угля, последнему на кривой сопротивления стандартного каротажа большим потенциал-зондом соответствует характерный "пик". На структурной карте (фиг. 103, а) над залежью вырисовываются куполовидное, с изрезанными

очертаниями поднятие и узкий раздвоенный хребет на севере. Максимальная амплитуда рельефа над залежью (южная половина фигуры) составляет приблизительно 75 футов (23 м). К северу от залежи превышение достигает 120 футов (37 м). В результате проведенного сравнения трендов структурных "возвышений" (жирные линии) с осями зон максимальной мощности песчаников (фиг. 103, б) установлено, что структура частично обусловлена различной мощностью песчаников. Изучение каротажных диаграмм скважин, расположенных на границе залежи, показало, что песчаники Буч характеризуются линзовидной формой и по всем направлениям от участка залежи замещаются глинами. Подошва пласта угля позволяет фиксировать кровлю песчаника Средний Буч за пределами площади нефтегазоносности. На фиг. 103, в приведена карта изолиний продуктивности песчаников Буч; сечение изолиний 25 баррелей (3,5 т). Расчетный суточный дебит скважин будет более значительным, если принять во внимание, что эти скважины пробурены до применения гидравлического разрыва. Тренды максимально возможной первоначальной продуктивности скважин (жирные линии) точно совпадают с трендами максимальной мощности песчаников (фиг. 103, б). Такая взаимосвязь не случайна, поскольку первоначальная продуктивность косвенным образом отражает величину относительной проницаемости песчаника в той или иной скважине. Дельтовый характер этого песчаника более ярко отражается на фиг. 103, б и в, чем на фиг. 103, а. В результате постседиментационных деформаций на отдельных участках структура песчаника Средний Буч изменилась (фиг. 103, а); наиболее ярко это проявилось в образовании локальной структурной депрессии на прилегающих участках квадратов 16 и 21. Построение таких карт изопакит и изолиний продуктивности дает надежную основу для проведения эксплуатационного бурения. Места заложения скважин выбираются на участках расширения осевых трендов.

Залежь Уэвока-Лейк расположена в пределах планшета T8N, R7E (фиг. 102). В зоне развития русловых песчаников Средний Буч она характеризуется меридиональным простираем. В структурном отношении (фиг. 104) она представляет собой два нечетких кулисообразных мыса, слегка наклоненных к северо-западу. Эти структурные мысы осложняют региональную моноклинал, падающую к западу. Замкнутость структур не установлена. Изучение немногочисленных шлифов песчаника Средний Буч из скважин, пробуренных вдоль восточной границы этой залежи, показало, что песчаник очень мелкозернистый и межзерновые пространства в нем заполнены глиной. Водо-нефтяной контакт установить не удалось, поэтому высказано предположение, что границы залежи обусловлены резким снижением проницаемости.

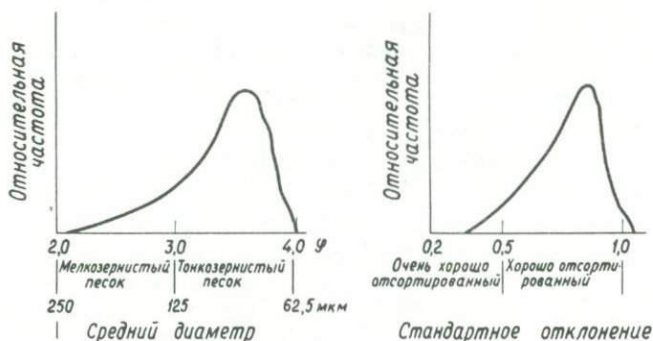


Ф и г. 104. Структурная карта песчаников Буч, залежь Уэвока-Лейк, планшет Т8N, R7E, округ Семинол, Оклахома.
Сечение изолипс 10 футов (3 м).

Отмечены существенные петрографические различия между русловыми песчаниками и песчаниками междурусловых участков, особенно в юго-восточной половине дельты (фиг. 102). Там, где мощность русловых песчаников превышает 6 м, они характеризуются более крупным размером зерен по сравнению с междурусловыми участками; средние диаметры этих двух типов песчаников соответственно составляют 99 и 86 мкм. Русловые песчаники отличаются лучшей сортированностью по сравнению с междурусловыми. Помимо этих отличий, для междурусловых песчаников характерно содержание глин в среднем 20%, в то время как в русловых песчаниках оно составляет 15%. Повышенным содержанием глинистого материала и меньшей зернистостью песков междурусловых участков, по-видимому, объясняется относительно редкое нахождение здесь залежей нефти.

Песчаники Буч тонкозернисты и относятся к граувакковому типу, т.е. в них содержатся многочисленные обломки более древних пород и сравнительно много глинистого цемента. На фиг. 105 показаны характер распределения размера зерен и стандартное отклонение. Петрографические характеристики песчаников Буч сведены в табл. 4.

Большая часть залежей нефти в песчаниках Буч приурочена не к раздувам мощности русловых песчаников, а к участкам несколько



Ф и г. 105. Средний диаметр зерен и стандартное отклонение для песчаников Буч.

Т а б л и ц а 4

Петрографические характеристики песчаников Буч

	Диапазон	Среднее	Количество образцов
Средний диаметр зерен, мкм	71-91	83	28
Стандартное отклонение	0,34-1,01	0,76	28
Кластический кварц, %	45-90	54	36
Карбонат, %	0-33	4	36
Глина, %	2-40	16	36
Обломки пород, %	9-50	22	36
Вторичный кремнезем, %	9-50	22	36
Другие минералы, %	0-3	2	36

меньшей мощности. Неправильной формы группа залежей нефти расположена в пределах планшетов T13-14N, R14E (фиг. 102), почти посредине между двумя русловыми системами. Если бы для данного района имелся достаточный каротажный материал, то, возможно, он позволил бы показать, что эти залежи связаны главным образом с русловыми песчаниками небольшой мощности, контактирующими с глинами области пойменных болот. Несколько вытянутых залежей приурочено к русловым песчаникам юго-западной части фиг. 102. Ни одна из них не обнаруживает связи со структурой; их образование, вероятно, обусловлено наличием непроницаемых барьеров, изолирующих более пористые и проницаемые участки руслового песчаника. Несколько крупных залежей нефти (не показано) выявлено в определенных участках повышенной мощности руслового песчаника в центре фиг. 102. На этой площади русловой песчаник представлен средне- и крупнозернистыми разностями и содержит меньше глинистого вещества в межзерновых пространствах. Такие залежи приурочены к участкам пересечения осей погружающихся на запад структурных мысов с осью зоны развития главного руслового песчаника. В этом случае водо-нефтяной контакт легко устанавливается на северной и южной окраинах залежей, а проницаемость резко снижается на восточной и западной границах, где русловые песчаники сливаются с мелкозернистыми горизонтально-слоистыми алевритистыми песчаниками.

Дельта Тонкава. Самая верхняя часть песчаников Тонкава (верхняя часть серии Миссури, пенсильваний) представляет собой яркий пример газоносного коллектора дельтового типа. Палеодельта Тонкава расположена на территории округа Бивер, Оклахома, в пределах бассейна Анадарко. Эту дельту детально описал Хайвк [156]. Он указывал, что верхняя пачка песчаников Тонкава перекрывается маломощным (0,9 м), выдержанным известняком Хаскелл. Джордан [152] отмечал, что эта маломощная стратиграфическая единица представляет собой маркирующий слой; его удобно использовать в качестве исходного репера для палеоструктурного анализа нижележащей верхней пачки песчаников Тонкава. На фиг. 106,а дана электрокаротажная и микрокаротажная характеристика трех пачек песчаников Тонкава и их взаимосвязь с известняком Хаскелл. На фиг. 106,б показано увеличение мощности верхней пачки песчаников Тонкава по отношению к исходному реперу — известняку Хаскелл. Этот геологический профиль является типичным для данного района; на нем хорошо можно видеть русловой характер песчаного тела. Общий вид русловой системы верхней пачки песчаников Тонкава приведен на двух картах изопакит. Особенности распределения данного песчаника Хайвк [156] продемонстрировал путем построения карты изопакит интервала

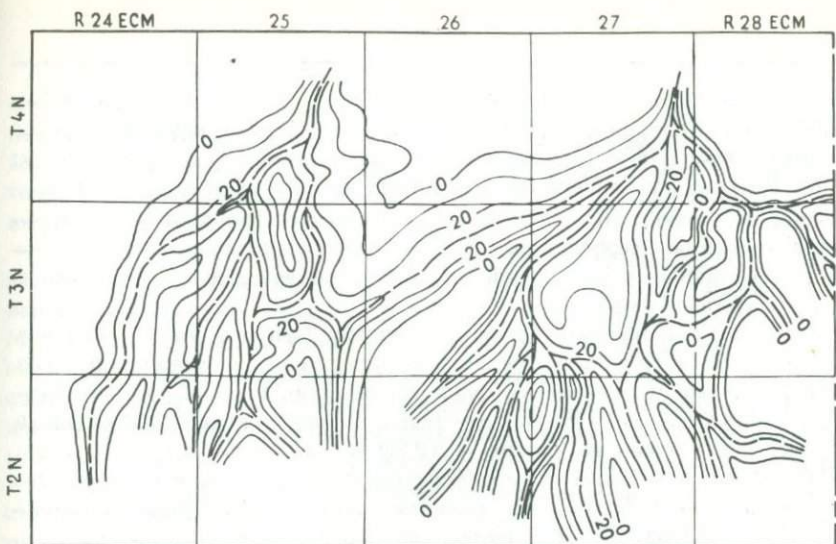


Ф и г. 106.

а — электрокаротажные и микрокаротажные диаграммы, на которых выделяются три пачки песчаников Тонкава и известняк Хаскелл; *б* — геологический поперечный разрез по линии А — А' верхней пачки песчаников Тонкава, мощность которой возрастает за счет нижележащих глинистых сланцев. Исходный репер — кровля известняка Хаскелл. Местоположение профиля показано на фиг. 107.

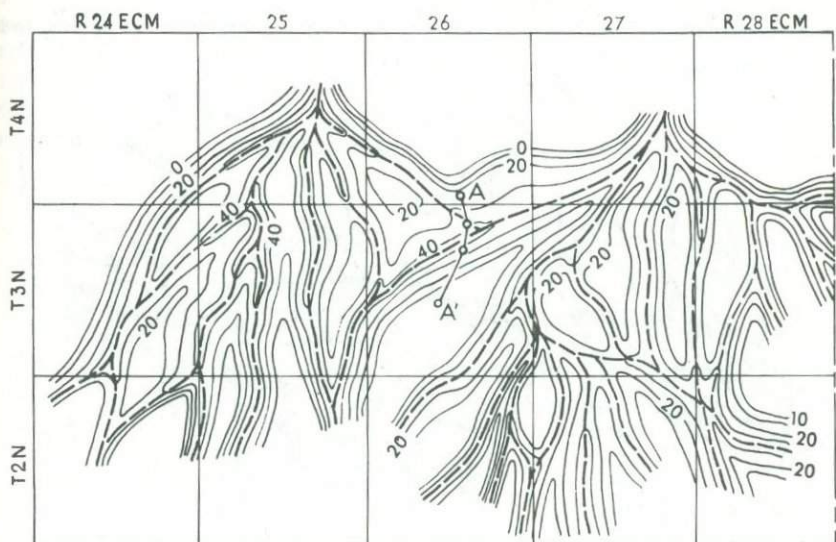
осадков, залегающих между известняком Хаскелл и подошвой верхней песчаной пачки, который соответствует толще непрерывного наращивания мощности (фиг. 107). Он указывал, что "эта карта представляет собой по существу карту подводного палеорельефа с дельтовой многорукавной системой русел..., зона наибольшей мощности соответствует максимальной глубине вреза; оси соответствующих долин рисуются вдоль трендов максимального вреза (наибольшей мощности)". Максимальная плотность сетки — одна скважина на 2,6 км², поэтому интерпретация носит лишь общий характер.

Руководствуясь фиг. 107, Хайвка построил субъективную модель распределения мощностей верхней пачки песчаников Тонкава (фиг. 108). Анализируя ее, он указывал, что "местами рукава дельты смещаются по горизонтали, как, например, в районе сочленения планшетов Т3 и 4N, R24 и 25ЕСМ, в юго-западном углу планшета Т4N,



Ф и г. 107. Карта изопачит GIS между кровлей известняка Хаскелл и подошвой верхнего песчаника Тонкава, округ Бивер, Оклахома [156].

На карте можно видеть две сливающиеся в плане русловые системы. Сечение изопачит 10 футов (3 м).



Ф и г. 108. Карта изопачит верхнего песчаника Тонкава, округ Бивер, Оклахома [156].

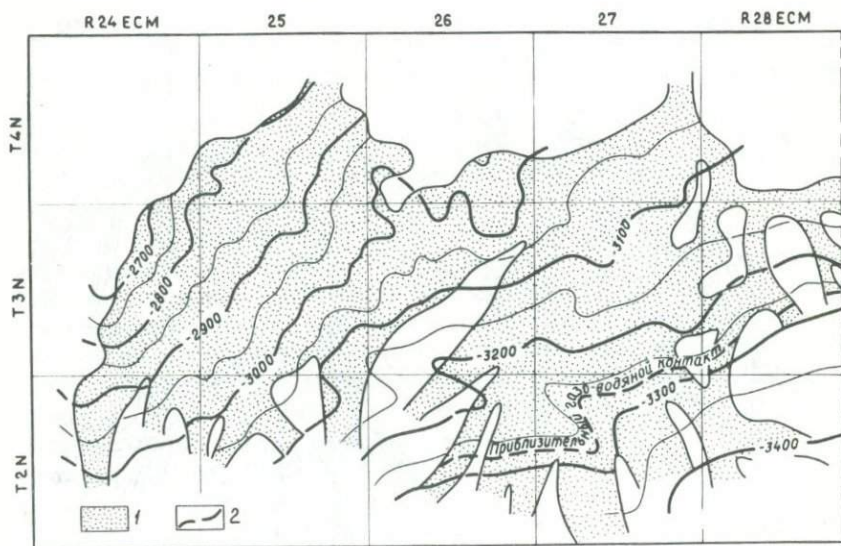
Сечение изопачит 10 футов (3 м).

R26ECM, на площади планшетов T3N, R27ECM и T2N, R24 и 25ECM.* Таким образом, тренды максимальной мощности песчаников не повсеместно совпадают с трендами максимальной амплитуды вреза. Мощность верхней пачки песчаников Тонкава варьирует от 0 до 35 футов. Кровля ее относительно плоская, а базальная поверхность достаточно неровная. Межрусловые участки обычно плащеобразно перекрыты песчаниками небольшой мощности, обладающими хорошими коллекторскими свойствами.

Газоносность верхней пачки песчаников Тонкава, как показано на фиг. 109, контролируется их распределением и структурой. Газ мигрировал на север-северо-запад до тех пор, пока не достиг границы распространения песчаника вверх по восстанию. Газо-водяной контакт расположен на уровне - 3270 футов (-997 м).

Такой региональный стратиграфический анализ оказал существенную помощь геологам при разведке этой залежи. Зная седиментационную природу данного песчаника, можно легко прогнозировать положение газо-водяного контакта и закладывать скважины там, где мощность песчаника наибольшая.

Дельта Эндикотт. Другим примером песчаников дельтового типа может служить песчаник Эндикотт, залегающий в нижней части серии Вирджилл пенсильванского возраста и распространенный в

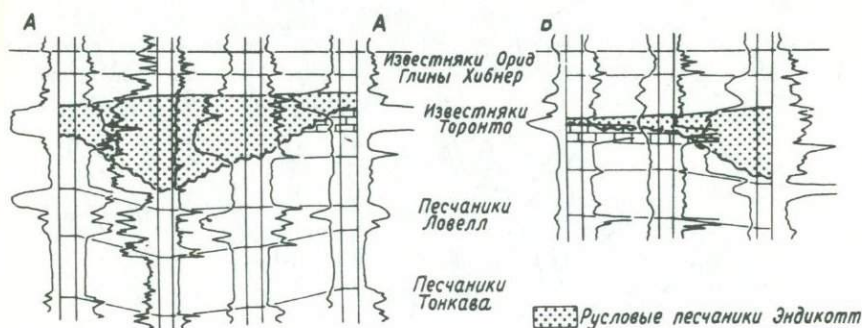


Ф и г 109. Структурная карта кровли песчаников Тонкава, округ Бивер, Оклахома.

1 — площадь развития песчаников; 2 — приблизительное положение газо-водяного контакта. Сечение изогипс 50 футов (15 м).

округе Харпер, Оклахома. Он отлагался в условиях серии раздвоенных русел, которые эродировали северный склон бассейна Анадарко. Региональное простираение зоны седиментации в течение накопления толщи Вирджилл было запад-северо-западным, а региональный наклон на юг-юго-запад.

В рассматриваемом районе песчаник Эндикотт залегает несогласно либо на известняках Торонто, либо на глинах, непосредственно подстилающих известняки Торонто, как показано на фиг. 110. Мощность песчаников Эндикотт возрастает за счет погружения нижнего контакта. Поскольку в качестве исходного репера выбран известняк Орид, то песчаники Ловелл, известняки Хаскелл и песчаники Тонкава прогнуты вниз в скважинах, которыми зафиксирована максимальная мощность руслового заполнения Эндикотт. Такая форма залегания обусловлена в основном неравномерной уплотненностью глин, отделяющих известняки Торонто от песчаников Ловелл. О том, что дифференцированное уплотнение этих глин происходило одновременно с накоплением глин Хибнер (выше песчаников Эндикотт), свидетельствует тот факт, что участки сокращенной мощности глин Хибнер соответствуют участкам повышенной мощности песчаников Эндикотт и наоборот. Такие сокращения и увеличения мощности обусловлены компенсированным осадконакоплением на участках бассейна с несколько большей глубиной. Единственное известное исключение из этого основного принципа представляет самая восточная скважина профиля А-А' (фиг. 110). Это связано с тем, что в данной скважине под песчаниками Эндикотт залегает останец известняков Торонто и, по всей вероятности, уплотнению подвергалась лишь только толща песчаников Эндикотт.

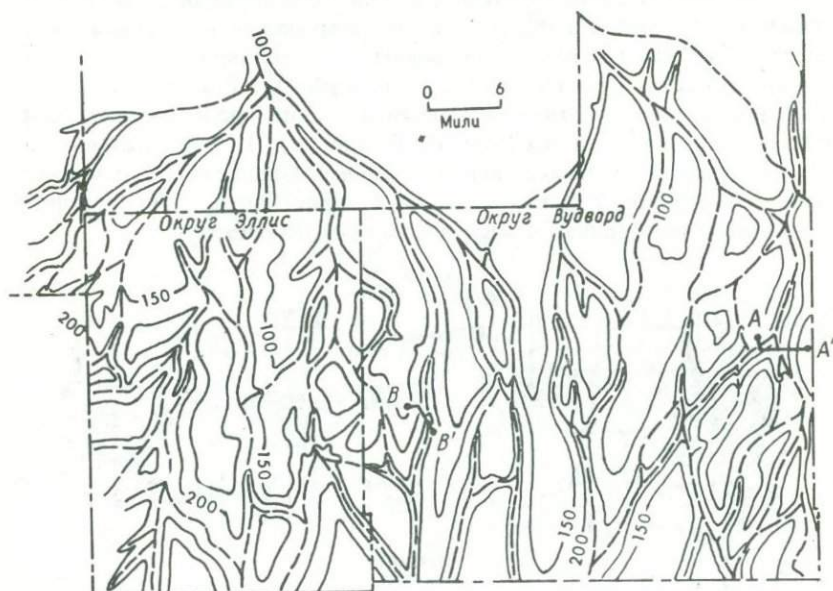


Фиг. 110. Геологические разрезы, иллюстрирующие русловую природу песчаников Эндикотт, северо-западная Оклахома.

Известняки Торонто размыты на участках максимальной мощности песчаников. Линии разрезов показаны на фиг. 111.

Известняк Орид для данного района является прекрасным маркирующим горизонтом и служит верхней границей толщи непрерывного наращивания мощности, которая протягивается вниз по разрезу до поверхности несогласия в подошве русловых песчаников Эндикотт. Карта изопахит этой толщи (фиг. 111) дает представление о "форме" эрозионной поверхности, существовавшей в период, непосредственно предшествовавшей накоплению песчаников Эндикотт. Этой неровной поверхностью в основном контролировалось местоположение трендов повышенной мощности песчаников Эндикотт. Осевые участки трендов максимальной амплитуды вреза до момента накопления толщи Эндикотт показаны разветвляющимися пунктирными линиями. В общем толща представляет собой дельтовый комплекс, состоящий из двух сливающихся в плане дельт, которые раскрываются к югу.

Хайвка [156] указывал, что "Капс (1959) и позднее Уинтер (1963) относили песчаники Эндикотт к покровному типу". Такая трактовка верна, если рассматривать только обычно гладкую и протяженную верхнюю поверхность песчаников Эндикотт. Однако мощность этой формации варьирует от 0 до 180 футов (55 м), причем



Фиг. 111. Карта изопахит GIS между кровлей известняков Орид и подошвой песчаников Эндикотт, северо-западная Оклахома.

Эта карта позволяет судить о характере эрозионной поверхности, на которую отлагались песчаники Эндикотт в районе развития двух, сливающихся в плане дельтовых русловых систем. Сечение изопахит 5С футов (15 м).

на расстоянии в 1 милю (1,6 км) нередко диапазон изменения мощности достигает 100 футов. Хайвкa построил карту изопакит формации Эндикотт (не опубликованная, но просмотренная авторами), которая почти идентична фиг. 111, если ее рассматривать с точки зрения трендов максимальной мощности. В порядке комментария (личное сообщение) он отмечал, что "эта аналогия свидетельствует о незначительности или полном отсутствии миграции рукавов дельты. Ветвящиеся тальвеги отдельных русел почти совпадают на обеих картах". Он полагал, что "дельта Эндикотт отлагалась в непосредственной близости от прибрежной равнины с относительно высоким рельефом, поскольку песчаные тела являются главными элементами этой системы".

В результате изучения небольшого числа образцов и шлифов установлено, что формация Эндикотт представлена серыми, плохо отсортированными, мелкозернистыми, слюдястыми и известковистыми песчаниками. Хайвкa отмечал, что они содержат 85–90% кварца. Местами мусковит и хлорит составляют почти 10% общего объема. На других участках в шлифах обнаружено до 10% кремния и 5% полевых шпатов (преимущественно плагиоклаза). Пористость варьирует от высокой до хорошей; ее максимальное значение 18%. Песчаники переслаиваются со светло- и темно-серыми глинистыми сланцами и перекрываются темно-серыми и пиритизированными глинистыми сланцами с пропластками углей в подошве.

В структурном отношении толща Эндикотт залегает в виде погружающейся к югу моноклинали, не осложненной сколько-нибудь значительными структурными мысами или замкнутыми структурами. Несмотря на то что на территории, показанной на фиг. 111, толща Эндикотт характеризуется хорошими коллекторскими свойствами, тем не менее условий, благоприятных для образования нефтяных залежей, например непроницаемого барьера вверх по восстанию или структурной ловушки, здесь нет. Промышленные притоки получены только в нескольких скважинах, расположенных в оклахомской и тexasской частях бассейна Анадарко.

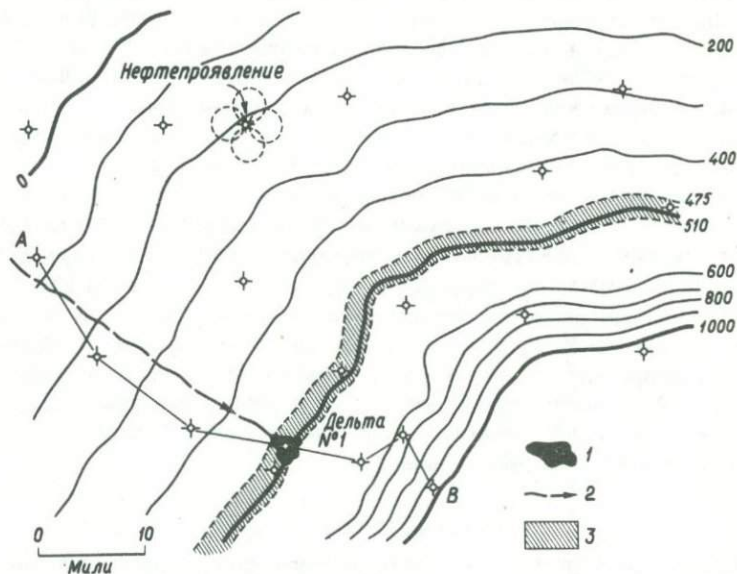
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕЛЬТ

Дельты, несмотря на различие их размеров, редко представляют собой какое-то изолированное явление вдоль современных побережий. Прибрежно-морские условия, благоприятные для формирования в устьях рек дельт, обычно простираются на много миль вдоль побережий. Большинство приподнятых участков суши, особенно в гумидной и полугумидной обстановках, дренировано серией потоков, несущих свои воды в окраинные заливы. Несмотря на то что среди современных дренажных систем Мексиканского залива доминирующее положение занимают реки Миссисипи и Рио-Гранде, тем не ме-

нее установлено множество меньших дренажных русел, впадающих в залив вдоль техасско-луизианского побережья.

Для того чтобы образовалась дельта, береговая линия залива должна оставаться стабильной. Таким образом, если относительно стабильная береговая линия благоприятна для развития дельты в устье какой-либо одной реки, то она также должна быть благоприятной для развития дельт в устьях большинства, если не всех других рек, впадающих в этот залив.

Если береговая линия трансгрессирует в связи с циклическим (прерывистым) прогибанием бассейна (или эвстатическим подъемом уровня моря), то создаются идеальные условия для образования нескольких рядов дельт на участках последовательной стабилизации береговой линии. Циклическая трансгрессия береговой линии также создает идеальные условия для сохранения дельт. Данное положение лучше всего можно продемонстрировать на примере гипотетической схемы (фиг. 112), на которой показана первая стадия, представляющая собой одну из трех стадий метода прогнозирования



Фиг. 112. Стадия 1. Гипотетическая карта изопохит GSS, отложившейся в процессе циклического погружения.

Нефтеносный песчаный коллектор образовался при стабильном положении береговой линии там, где палеодренажный поток разгружался от осадков в бассейне на границе с береговой линией. 1 — дельта; 2 — предполагаемое русло; 3 — береговая зона. Сечение изопохит 100 футов (30 м).

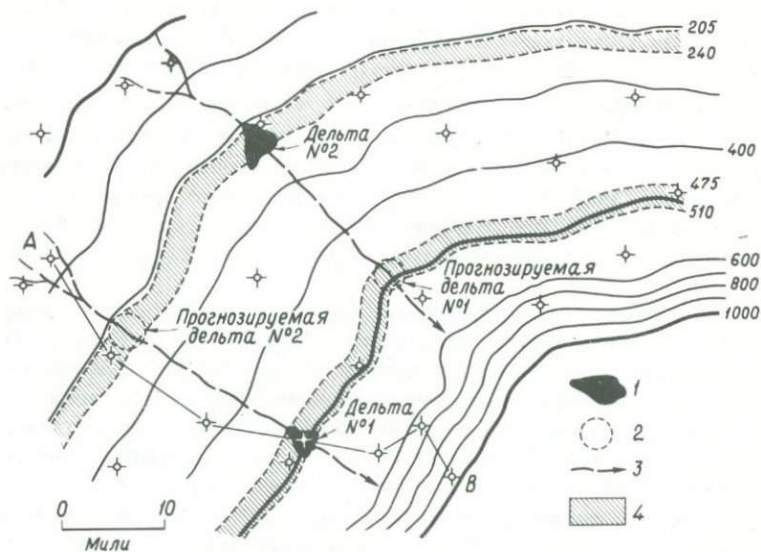
палеодельт. На фиг. 112 приведена карта изопахит генетически взаимосвязанной толщи GSS, включающей в себя нефтеносные песчаники дельты № 1. Эта толща была выделена после построения серии геологических профилей, которые в комплексе дали корреляционную схему данного района. В дельте № 1 продуктивны песчаники, залегающие либо в подошве GSS, которая представляет собой поверхность несогласия, либо вблизи нее. На карте изопахит GSS отмечается отчетливое, равномерное нарастание мощности в юго-восточном направлении. Морская трансгрессия развивалась с юго-востока на северо-запад, а береговая линия простиралась в северо-восточном направлении.

Детальный стратиграфический анализ дельты № 1 показал, что нефтеносные песчаники образуют серию разветвляющихся к юго-востоку палеорусел. Все русловые песчаники могут располагаться на одном стратиграфическом уровне по отношению к маркирующему горизонту в кровле GSS или на нескольких тесно сближенных уровнях. Эта система соподчиненных русел рассматривается либо как единичный, либо как сложный палеодельтовый комплекс. Его вершина располагается приблизительно у изопахиты 475 футов (145 м), а юго-восточная окраина — у изопахиты 510 футов (155 м). Таким образом, песчаные коллекторы дельты № 1 отлагались в береговой зоне (выделена пунктиром). Эта береговая зона субпараллельна ближайшим изопахитам GSS. Поскольку несколько дельт, вероятно, отлагались одновременно в устьях рек, которые впадали в залив, то вдоль береговой зоны могло образоваться несколько перспективных резервуаров. В этой зоне уже было пробурено три скважины, в которых не получено притоков, и для того, чтобы дать обоснованный прогноз, необходимо получить дополнительную информацию.

Можно допустить, что дренажное русло протягивалось к северо-западу от вершины дельты № 1 и его тренд был по существу перпендикулярен к зоне осадконакопления. Дельта № 1 расположена там, где это предполагаемое русло пересекается с береговой линией. Если можно было бы выделить дополнительные палеорусла, то аналогичные участки пересечения были бы высокоперспективными. В результате обработки всего имеющегося каротажного материала и данных по опробованию установлено, что в скважине, расположенной в 30 милях (48 км) к северу, в северо-западной части фиг. 112, песчаник, в котором обнаружены нефтепроявления, залегают стратиграфически более высоко. Образцы керна из этой скважины пропитаны нефтью, а при опробовании получен непромышленный приток. Эта скважина, очевидно, находится у периферии залежи, но где расположена сама залежь, пока неясно. Пунктирными кругами показаны четыре варианта возможного положения залежи.

На данной ранней стадии региональных исследований около этой сухой скважины необходимо пробурить достаточное число скважин с целью обнаружения залежи.

Поскольку в дельте № 1 продуктивными являются песчаники руслового типа, отлагавшиеся в течение одного из периодов стабилизации береговой линии при ее циклическом погружении, то песчаники дельты № 2 (фиг. 113), очевидно, отлагались в аналогичных условиях на более поздней стадии циклического погружения. На фиг. 113 показано местоположение, очертания и природа песчаных резервуаров дельты № 2. Дренажное русло этой дельты предположительно проведено на северо-запад, перпендикулярно к простиранию зоны седиментации. Морская трансгрессия оказывала незначительное влияние или вовсе не влияла на положение дренажного русла; следовательно, есть все основания предположить, что дренирование через дельту № 2 происходило в юго-восточном направлении. Это предполагаемое направление дренажного русла пересекается с береговой зоной на юго-востоке, в пределах площади, названной "прогнозируемая дельта № 1".



Фиг. 113. Стадия 2. Гипотетическая карта изопакит толщи, отложившейся в процессе циклического погружения.

Дельта №1 и прогнозируемая дельта №1 расположены там, где дренажные русла пересекают береговую линию, а дельта №2 и прогнозируемая дельта №2 — там, где более высокие участки дренажных русел пересекаются с другими береговыми линиями. 1 — дельта; 2 — прогнозируемая дельта; 3 — предполагаемое русло; 4 — береговая зона.

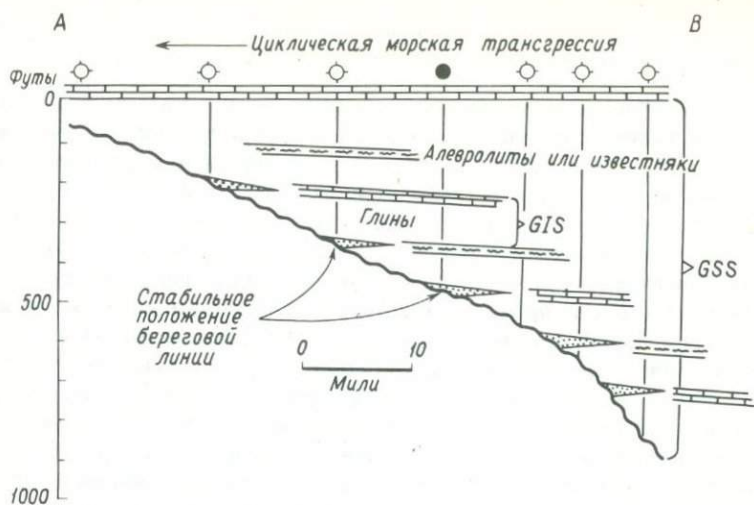
На этой стадии исследования принимают, что прогнозируемая дельта № 2 аналогичная по своей значимости прогнозируемой дельте № 1. Она также располагается в зоне пересечения предполагаемого дренажного русла с установленной береговой линией.

Естественно предположить, что к тому моменту, когда будут обнаружены и разведаны прогнозируемые дельты № 1 и № 2, на данной территории будет пробурено множество дополнительных сухих (а возможно, и продуктивных) скважин. Новые данные явятся основой для более детального стратиграфического анализа и прогнозирования. С учетом дополнительных данных можно будет прогнозировать многие другие залежи (различного типа). Так, например, если поверхность несогласия в подошве GSS достаточно ровная, то на востоке и юго-западе можно предполагать наличие еще нескольких дренажных русел (с дельтами), расположенных друг от друга на расстояниях, аналогичных расстоянию между двумя постулируемыми руслами. К юго-востоку от первой береговой линии, а возможно, и между двумя уже выявленными береговыми линиями могут быть обнаружены другие береговые линии.

Сводный геологический профиль GSS для участка между дельтой № 1 и прогнозируемой дельтой № 2 (профиль по линии А-В, фиг. 114) будет служить основой для определения мощности интервала глин, залегающих между "продуктивными" песчаниками двух выявленных береговых линий. Если мощность этого интервала глин составляет 50 футов (15 м) или более, есть основания для предположения о наличии по крайней мере еще одной береговой линии между песчаниками. Непродуктивные песчаники, установленные в сухих скважинах, пробуренных на площади между этими двумя береговыми линиями, свидетельствуют о наличии береговых зон.

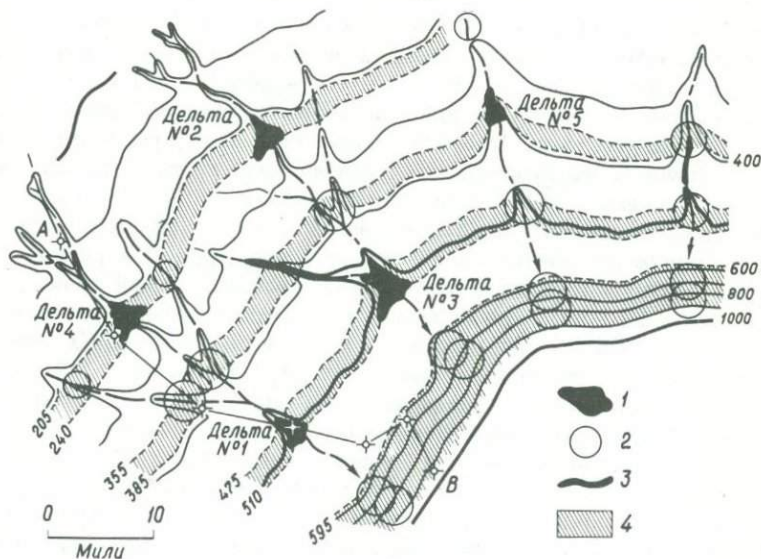
Материалы дополнительно пробуренных скважин позволят установить степень выравнивания поверхности несогласия, а также ее наклон к центру бассейна в период циклической морской трансгрессии. На фиг. 113 расстояние между береговыми линиями составляет приблизительно 2 мили (32 км), а мощность GSS — 270 футов (82 м). Градиент увеличения мощности 13,7 футов на милю (2,6 м/км) заставляет предположить еще несколько береговых зон между двумя уже выявленными. Циклическое изменение уровня моря (или погружение) на 25–50 футов (7,6–15,2 м) представляется более вероятным, чем изменение на 270 футов (82 м).

По мере накопления новых данных по бурению можно будет четко установить местоположение береговых линий на рассматриваемой территории. Для этого следует сократить сечение изопахит на карте мощности GSS до 50 футов (15,2 м), а возможно, и до 20 футов (6,1 м). Поскольку данная GSS в каком-то смысле отражает "характер" поверхности несогласия, то изолинии будут изогнуты вверх по течению потока, как показано на фиг. 115. Отдельные



Ф и г. 114. Геологический разрез по линии А – В гипотетической GSS, иллюстрирующий развитие песчаников на участках последовательной стабилизации береговой линии.

Местоположение профиля показано на фиг. 115. Вертикальный масштаб увеличен в 183 раза.



Ф и г. 115. Стадия 3. Гипотетическая карта палеорельефа, на которой показаны коллекторы дельтового типа и прогнозируемые дельты на участках пересечения береговых линий с зонами палеодренажа.

Показаны также отдельные залежи нефти в русловых песчаниках. 1 – дельта; 2 – прогнозируемая дельта; 3 – русловое заполнение; 4 – береговая зона.

участки этих русел могут быть запружены песчаниками, что является идеальным для образования залежей нефти и газа простейшего руслового типа или, возможно, типа прирусловой отмели.

Фиг. 115 иллюстрирует, что бурение дополнительных скважин сделало возможным трассирование других береговых зон, а затем установить местоположение и строение других дельтовых резервуаров. Вновь выявленные на Юго-востоке береговые зоны перекрывают друг друга, так как мощность *CSS* на обращенной к морю стороне шарнирной зоны резко возрастает. На участках такого резкого градиента происходит меньшее латеральное смещение береговой линии в связи с циклическим погружением. Следовательно, часть одной дельты может перекрывать вершину более ранней дельты. На таких участках отдельные береговые зоны, вероятно, уже, чем на шельфе, но мощность песчаников должна быть больше.

Там, где наблюдалась интенсивная деятельность вдольбереговых течений, перераспределявших осадки, приносимые в устья рек, могли отлагаться пляжевые пески. Такие пляжевые песчаники обычно газonosны, хотя причина этого явления в настоящее время не ясна. В качестве примера можно привести песчаники Клинтон (нижний силур) в восточно-центральной части Огайо, песчаники Атока (пенсильваний) в восточно-центральной части Оклахомы, песчаники Морроу (пенсильваний) в северо-западной части Оклахомы и северной части Техаса и песчаники Месаверде (мел) в северо-западной части Нью-Мексико.

При анализе идеализированной схемы, изображенной на фиг. 115 (стадия 3), можно выделить многие дополнительные объекты для постановки поискового бурения. При построении этой фигуры не учитывалось влияние постседиментационной тектоники. Однако, используя имеющиеся теоретические представления при построении фиг. 115, было бы проще создать структурную карту по синхронному маркирующему горизонту в кровле *CSS*. Таким образом, можно легко установить в какой мере структурный фактор влиял на образование залежей углеводородов. В данном гипотетическом примере основное внимание следует обратить на прогнозирование участков благоприятного развития песчаных резервуаров независимо от того, являются ли они отложениями проток дельты, субазральными русловыми песчаниками или отложениями пляжей. На этой стадии геолог способен установить степень влияния постседиментационной структуры на формирование залежей нефти и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allen J.R.L.*, A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments, *Sedimentology* (spec. issue), **5**, No. 2, p. 191, 1965a.
2. *Allen J.R.L.*, Late Quaternary Niger delta, and adjacent areas: sedimentary environments and lithofacies, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **49**, No. 5, pp. 547 – 600, 1965b.
3. American Commission on Stratigraphic Nomenclature, Note 3 – Rules of geological nomenclature of the Geological Survey of Canada, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **32**, No. 3, pp. 366 – 367, 1948.
4. *Amsden T.W.*, Lithofacies map of Lower Silurian deposits in central and eastern United States, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **39**, pp. 60 – 74, 1955.
5. *Andresen M.J.*, Geology and petrology of the Trivoli sandstone in the Illinois Basin, *Illinois Geol. Survey Circ.* 316, 31 p., 1961.
6. *Andresen M.J.*, Paleodrainage patterns: their mapping from subsurface data, and their paleogeographic value, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **46**, No. 3, pp. 398 – 405, 1962.
7. *Ashley C.H.*, The coal deposits of Indiana, *Indiana Dept. Geology and Nat. Resources, Ann. Rept.* 23, pp. 1 – 1573, 1899.
8. *Bagnold R.A.*, The physics of blown sand and desert dunes, New York, Wm. Morrow and Co., 1941.
9. *Barrell J.*, Criteria for the recognition of ancient delta deposits, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **23**, pp. 377 – 446, 1912.
10. *Barrell J.*, The Upper Devonian delta of the Appalachian geosyncline, *Am. Journ. Sci.*, **37**, pp. 87 – 109, 225 – 253, 1914.
11. *Barton D.C.*, Deltaic coastal plain of southeastern Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **41**, No. 3, pp. 359 – 382, 1930.
12. *Bascom W.N.*, Characteristics of natural beaches, chap. 10 of J.W. Johnson, ed., 4th Coastal Engineering Conf. Proc., October 1953, pp. 163 – 180, 1954.
13. *Bass N.W.*, Origin of Bartlesville shoestring sands, Greenwood and Butler Counties, Kansas, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **18**, No. 10, pp. 1333 – 1342, 1934.
14. *Bass N.W.*, Verden sandstone of Oklahoma – an exposed shoestring sand of Permian age, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **23**, No. 4, pp. 559 – 581, 1939.

15. Bass N.W., Some features common to sand bars on modern coasts and in geologic column (abs.), Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **42**, No. 1, pp. 210 – 211, 1958.
16. Bass N.W., et al., Origin and distribution of Bartlesville and Burbank sands in parts of Oklahoma and Kansas, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **21**, No. 1, pp. 30 – 66, 1937.
17. Bates C.C., Rational theory of delta formation, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **37**, No. 9, pp. 2119 – 2162, 1953.
18. Bates C.C., Freeman J.C., Interrelations between jet behavior and hydraulic processes observed at deltaic river mouths and tidal inlets, chap. 12 of J.W. Johnson, ed., 3d Coastal Engineering Conf. Proc., October 1952, pp. 165–175, 1953.
19. Bates C.C., et al., World-wide evidence of deltas off the mouths of submarine canyons, in: International Oceanography Congress Preprints, Am. Assoc. Adv. Sci., p. 595, 1959.
20. Beal M.A., Shepard F.P., A use of roundness to determine depositional environments, Journ. Sed. Petrology, **27**, pp. 49 – 60, 1956.
21. Beall A.O., Jr., Sedimentary processes operative along the western Louisiana shoreline, Journ. Sed. Petrology, **38**, No. 3, pp. 869 – 877, 1968.
22. Beerbower J.R., Hait M.H., Silurian fish in northeastern Pennsylvania and northern New Jersey, Pennsylvania Acad. Sci. Proc., **33**, pp. 198 – 203, 1959.
23. Bernard H.A., LeBlanc R.J., Resume of the Quaternary geology of the northwestern Gulf of Mexico province, in: Wright H.E., Jr., Frey D.G., eds., The Quaternary of the United States, Princeton, New Jersey, Princeton Univ. Press, pp. 137 – 185, 1965.
24. Bernard H.A., Major C.F., Jr., Recent meander belt deposits of the Brazos River: an alluvial "sand" model (abs.), Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **47**, No. 2, p. 350, 1963.
25. Bernard H.A., LeBlanc R.J., Major C.F., Recent and Pleistocene geology of southeast Texas, Field excursion No. 3, in: Geology of the Gulf Coast and central Texas and guidebook of excursions, Geol. Soc. Am., 1962, Ann. Mtg., Houston, Texas, Houston Geol. Soc., pp. 175 – 224, 1962.
26. Bernard H.A., Major C.F., Jr., Parrott B.S., The Galveston barrier island and environs: a model for predicting reservoir occurrence and trend, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **9**, pp. 221 – 224, 1959.
27. Bernard H.A., et al., Recent sediments of southeast Texas, a field guide to the Brazos alluvial and deltaic plains and the Galveston barrier island complex, Texas Univ. Bur. Econ. Geology Guidebook 11, 1970.
28. Beutner E.C., Gleckinger L.A., Gard T.M., Bedding geometry in a Pennsylvanian channel sandstone, Geol. Soc. Am. Bull., **78**, No. 7, pp. 911 – 916, 1967.
29. Blanton S.L., Birth and death of a offshore bar, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **13**, pp. 95 – 97, 1963.
30. Blench T., Hydraulics of sediment-bearing canals and rivers, Vancouver, British Columbia, Evans Industries, Ltd., 1951a.

31. *Blench T.*, Regime theory for self-formed sediment-bearing channels, *Am. Soc. Civil Engineers Proc.*, **77**, separate 70, pp. 1 – 18, 1951b.
32. *Bluck B.J.*, Sedimentation of beach gravels: examples from South Wales, *Journ. Sed. Petrology*, **37**, No. 1, pp. 128 – 156, 1967.
33. *Boyd D.R., Dyer B.F.*, Frio barrier bar system of South Texas, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **14**, pp. 309 – 322, 1964; *South Texas Geol. Soc. Bull.*, **5**, No. 4, pp. 3 – 16, 1965.
34. *Bradley J.S.*, Differentiation of marine and subaerial sedimentary environments by volume percentage of heavy minerals, Mustang Island, Texas, *Journ. Sed. Petrology*, **27**, pp. 116 – 125, 1957.
35. *Bradley W.C.*, Origin of marine-terrace deposits in the Santa Cruz area, California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **68**, No. 4, pp. 421 – 444, 1957.
36. *Brown L.F., Jr.*, Geometry and distribution of fluvial and deltaic sandstones (Pennsylvanian and Permian), north-central Texas, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **19**, pp. 23 – 47, 1969.
37. *Brune G.M.*, Dynamic concept of sediment sources, *Am. Geophys. Union Trans.*, **31**, No. 4, pp. 587 – 594, 1950.
38. *Buckley A.B.*, The influence of silt on the velocity of flowing water in open channels, *Inst. Civil. Engineers Proc.*, **216**, pp. 183 – 211, 1922 – 1923.
39. *Bullard F.M.*, Source of beach and river sands on Gulf Coast of Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **53**, No. 7, pp. 1021 – 1043, 1942.
40. *Burnham W.L.*, Sand studies, 14 to K interval, central Anzoategui, Venezuela, unpub. rept., 1956.
41. *Busch D.A.*, The significance of deltas in subsurface exploration, *Tulsa Geol. Soc. Digest*, **21**, pp. 71 – 80, 1953.
42. *Busch D.A.*, Prospecting for stratigraphic traps, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **43**, No. 12, pp. 2829 – 2843, 1959.
43. *Busch D.A.*, Methods of prospecting for stratigraphic oil and gas traps, *Assoc. Française Tech. Pétrole Bull.* 160, pt. 1, pp. 459 – 464; *Bull.* 161, pt. 2, pp. 633 – 643, 1963.
44. *Busch D.A.*, Genetic units in delta prospecting, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **55**, No. 8, pp. 1137 – 1154, 1971.
45. *Byrne J.V., LeRoy D.O., Riley C.M.*, The chenier plain and its stratigraphy, southwestern Louisiana, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **9**, pp. 1 – 23, 237 – 260, 1959.
46. *Calvert W.L.*, Sub-Trenton rocks from Lee County, Virginia, to Fayette County, Ohio, *Ohio Div. Geol. Survey Rept. Inv.* 45, 57 p., 1962.
47. *Calvert W.L.*, Sub-Trenton rocks of Ohio in cross sections from West Virginia and Pennsylvania to Michigan, *Ohio Div. Geol. Survey Rept. Inv.* 49, 5 p., 1963.
48. *Campbell C.V.*, Depositional model – Upper Cretaceous Gallup beach shoreline, Shiprock area, northwestern New Mexico, *Journ. Sed. Petrology*, **41**, No. 2, pp. 395 – 409, 1971.

49. *Cherry J.A.*, Sand movement along equilibrium beaches north of San Francisco, *Journ. Sed. Petrology*, **36**, No. 2, pp. 341 – 357, 1966.
50. *Choubert B.*, Sur des phenomenes actuels de sedimentation le long des cots guyanaises, *Acad. Sci. Comptes Rendus*, **227**, 1948.
51. *Cobb W.C.*, The passes of the Mississippi River, *Am. Soc. Civil Engineers*, Preprint 13, 23 p., 1952.
52. *Coleman J.M.*, Recent coastal sedimentation: central Louisiana coast, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst. Tech. Rept. **29**, pp. 1 – 73, 1966.
53. *Coleman J.M.*, Brahmaputra River: processes and sedimentation, *Sed. Geology*, **3**, No. 2 – 3, pp. 131 – 239, 1969.
54. *Coleman J.M.*, *Gagliano S.M.*, Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst. Tech. Rept. **16**, pt. G.; *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **14**, pp. 67 – 80, 1964.
55. *Coleman J.M.*, *et al.*, Minor sedimentary structures in a prograding distributary, *Marine Geology*, **1**, pp. 240 – 258, 1964.
56. *Conatser W.E.*, Grand Isle: a barrier island in the Gulf of Mexico, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **82**, No. 11, pp. 3049 – 3068, 1971.
57. *Corbett D.M.*, *et al.*, Stream-gaging procedure, U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 888, 245, p., 1943.
58. *Cotton C.A.*, Deductive morphology and genetic classification of coasts, *Sci. Monthly*, **78**, No. 3, pp. 163 – 181, 1954.
59. *Cross W.P.*, *Bernhagen R.H.*, Ohio stream-flow characteristics, pt. I, flow duration, *Ohio Dept. Nat. Resources Bull.* **10**, 40 p., 1949.
60. *Curry J.R.*, Dimensional grain orientation studies of recent coastal sands, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **40**, No. 10, pp. 2440 – 2456, 1956.
61. *Curry J.R.*, *Emmel F.J.*, *Crampton P.J.S.*, Holocene history of a strand plain, Nayarit, Mexico, in: *Castañares A.A.*, *Phleger F.B.*, eds., *Coastal lagoons, a symposium – UNAM – UNESCO, Mexico, D.F.*, 1967, Mexico, D.F., Univ. Nac. Autónoma México, pp. 63 – 100, 1969.
62. *Dapples E.C.*, *Krumbein W.C.*, *Sloss L.L.*, Tectonic control of lithologic associations, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **32**, No. 10, pp. 1924 – 1947, 1948.
63. *Das I.*, Theory of the flow of water and universal hydraulic diagrams, *Journ. Central Board Irrigation (India)*, **7**, No. 2, pp. 151 – 162, 1950.
64. *Davis R.A., Jr.*, *Fox W.T.*, Coastal processes and nearshore sand bars, *Journ. Sed. Petrology*, **42**, No. 2, pp. 401 – 412, 1972.
65. *Davis W.M.*, The geographical cycle, *Geog. Journ.*, **14**, pp. 481 – 504, 1899.
66. *Davis W.M.*, Base-level, grade and peneplain, *Journ. Geology*, **10**, pp. 77 – 111, 1902.
67. *Dillard W.R.*, *Oak D.P.*, *Bass N.W.*, Chanute oil pool, Neosho County, Kansas – a water-flooding operation, in: *Levorsen A.I.*, ed., *Stratigraphic type oil fields, Tulsa, Oklahoma*, *Am. Assoc. Petroleum Geologists*, pp. 57 – 77, 1941.

68. *Dodge C.F.*, Genesis of an Upper Cretaceous offshore bar near Arlington, Texas, *Journ. Sed. Petrology*, **35**, No. 1, pp. 22 – 35, 1965.
69. *Donaldson A.C.*, Deltaic sands and sandstones, in: Symposium on recently developed geologic principles and sedimentation of the Permo-Pennsylvanian of the Rocky Mountains, *Wyoming Geol. Assoc. 20th Ann. Field Conf., Casper, Wyoming, 1966, Guidebook*, pp. 31 – 62h, 1967.
70. *Doran E., Jr.*, Land forms of the southeast Bahamas, *Texas Univ. Pub. No. 5509, Dept. Geography*, pp. 1 – 38, 1955.
71. *Duboul-Razavet C.*, Contribution a l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône, *Soc. Géol. France Mém.* 76, **35**, No. 3, 234 p., 1956.
72. *Duboul-Razavet C., Kruit C.*, Sédimentologie du delta du Rhône, *Inst. Français Pétrole Rev.*, **12**, No. 4, pp. 399 – 410, 1957.
73. *Dunbar C.O., Rodgers J.*, Principles of stratigraphy, New York, John Wiley and Sons, 356 p. (especially pp. 74 – 88, 137 – 140), 1957.
74. *Einstein H.A.*, The bed-load function for sediment transportation in open channel flow, *U.S. Dept. Agriculture Tech. Bull.* 1026, 1950.
75. *Einstein H.A., Barbarossa N.L.*, River channel roughness, *Am. Soc. Civil Engineers Proc.*, **77**, p. 12, 1951.
76. *Eisenstatt P.*, Little Creek field, Lincoln and Pike Counties, Mississippi, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **10**, pp. 206 – 213, 1960.
77. *Élie de Beaumont L.*, Leçons de géologie pratique, Paris, pp. 223 – 252, 1945.
78. *Ellison W.D.*, Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration, *Am. Geophys. Union Trans.*, **26**, No. 3, pp. 415 – 430, 1945.
79. *Evans O.F.*, The origin of spits, bars and related structures, *Journ. Geology*, **50**, No. 7, pp. 846 – 965, 1942.
80. *Fergusson J.*, Delta of the Ganges, *Geol. Soc. London Quart. Journ.*, **19**, pp. 321 – 354, 1863.
81. *Fisher J.J.*, Barrier island formation: discussion, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **79**, No. 10, pp. 1421 – 1426, 1968.
82. *Fisher W.L., McGowen J.H.*, Depositional systems in the Wilcox Group of Texas and their relationship to oil and gas, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **17**, pp. 105 – 125, 1967.
83. *Fisher W.L., McGowen J.H.*, Depositional systems in the Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **53**, No. 1, pp. 30 – 54, 1969.
84. *Fisher W.L., et al.*, Delta systems in the exploration for oil and gas, a research colloquium, *Texas Univ. Bur. Econ. Geology*, 78 p., 1969.
85. *Fisk H.N.*, Geological investigation of the alluvial valley of the lower Mississippi River, Vicksburg, Mississippi, *U.S. Army Corps Engineers, Mississippi, River Comm.*, 1944.
86. *Fisk H.N.*, Fine-grained alluvial deposits and their effects on Mississippi River activity, Vicksburg, Mississippi, *U.S. Army Corps Engineers, Mississippi River Comm.*, 1947.

87. *Fisk H.N.*, Geological investigations of the lower Mermentau River basin and adjacent areas in coastal Louisiana, Vicksburg, Mississippi, U.S. Army Corps Engineers, Mississippi River Comm., p. 78, 1948.
88. *Fisk H.N.*, Geological investigation of the Atchafalaya Basin and problems of Mississippi River diversion, Vicksburg, Mississippi, U.S. Army Corps Engineers, Mississippi River Comm., pp. 1 – 145, 1952.
89. *Fisk H.N.*, Sand facies of Recent Mississippi delta deposits: 4th World Petroleum Cong. Proc., Rome, 1955, sec. 1, pp. 377 – 398, 1955.
90. *Fisk H.N.*, Padre Island and the Laguna Madre flats, coastal south Texas, in: *Russell R.J.*, chm., 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 103 – 151, 1959.
91. *Fisk H.N.*, Recent Mississippi River sedimentation and peat accumulation, in: *Ernest van Aelsi*, ed., 4th Congrès pour l'avancement des études de stratigraphie et de géologie du Carbonifère, Heerlen, Sept. 15 – 20, Compte Rendu, **1**, pp. 187 – 199, 1960.
92. *Fisk H.N.*, Bar-finger sands of the Mississippi delta, in: *Peterson J.A., Osmond J.C.*, eds., Geometry of sandstone bodies, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 29 – 52, 1961.
93. *Fisk H.N., McFarlan E., Jr.*, Late Quaternary deltaic deposits of the Mississippi River – local sedimentation and basin tectonics, in: *Poldervaart A.*, ed., Crust of the earth, a symposium, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 62, pp. 279–302, 1955.
94. *Fisk H.N., et al.*, Sedimentary framework of the modern Mississippi delta, Journ. Sed. Petrology, **24**, No. 2, pp. 76 – 99, 1954.
95. *Flores R.M.*, Relationship of geometry to the origin of the Lower Freeport sandstone (middle Allegheny) of eastern Ohio, Journ. Sed. Petrology, **37**, No. 2, pp. 624 – 632, 1967.
96. *Folk R.L.*, Of skewnesses and sands (disc.), Journ. Sed. Petrology, **32**, pp. 145 – 146, 1962.
97. *Folk R.L., Mason C.C.*, Differentiation of environments, Journ. Sed. Petrology, **28**, No. 2, pp. 211 – 226, 1958.
98. *Frazier D.E.*, Recent deltaic deposits of the Mississippi River: their development and chronology, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **17**, pp. 287 – 315, 1967.
99. *Frazier D.E., Osanik A.*, Point-bar deposits, Oil River locksite, Louisiana, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **11**, pp. 121 – 137, 1961.
100. *Frazier D.E., Osanik A.*, Recent peat deposits, Louisiana coastal plain, in: Environments of coal deposition, Geol. Soc. Am. Spec. Paper 114, pp. 63 – 85, 1969.
101. *Friedman G.M.*, Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics, Journ. Sed. Petrology, **31**, pp. 514 – 529, 1961.
102. *Friedman G.M.*, Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands, Journ. Sed. Petrology, **37**, No. 2, pp. 327 – 354, 1967.

103. *Friedman S.A.*, Channel sandstones in the Middle Pennsylvanian rocks of Indiana, Indiana Geol. Survey Rept. Prog., No. 23, p. 59, 1960.
104. *Galloway W.E., Brown L.F., Jr.*, Depositional systems and shelf-slope relationships in Upper Pennsylvanian rocks, northcentral Texas, Texas Univ. Bur. Econ. Geol. Rept. Inv. No. 75, 62 p., 1972.
105. *Gary M., McAfee R., Jr., Wolf C.L.*, eds., Glossary of geology, Washington, D.C., Am. Geol. Inst., 805 p., bibliog. 52 p., 1972.
106. *Geyskes D.C.*, On the structure and origin of the sandy ridges in the coastal zone of Surinam, Koninkl. Nederlandsch Aardrijksk. Genoot. Tijdschr., **69**, pp. 15 – 237, 1948.
107. *Gilbert G.K.*, The topographic feature of lake shores, U.S. Geol. Survey 5th Ann. Rept., pp. 69 – 123, 1885.
108. *Gilbert G.K.*, Transportation of debris by running water, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 86, 263 p., 1914.
109. *Glymph L.M.*, Relation of sedimentation to accelerated erosion in the Missouri River basin, U.S. Dept. Agriculture Oil Consulting Service SCS-TP-120, p. 20, 1951.
110. *Goldstein A., Jr.*, Sedimentary petrologic provinces of the northern Gulf of Mexico, Journ. Sed. Petrology, **12**, No. 2, pp. 77 – 84, 1942.
111. *Gould H.R.*, Environmental indicators – a key to the stratigraphic record, Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub. No. 16, pp. 1 – 3, 1972.
112. *Gould H.R., McFarlan E., Jr.*, Geologic history of the chenier plain, southwestern Louisiana, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **9**, pp. 261 – 270, 1959.
113. *Gould H.R., Morgan J.P.*, Coastal Louisiana swamps and marshlands, Field Trip No. 9, in: Geology of the Gulf Coast and central Texas and guidebook of excursions, Geol. Soc. Am. 1962 Ann. Mitg., Houston, Tex., Houston Geol. Soc., pp. 287 – 341, 1962.
114. *Grabau A.W.*, The Medina and Shawangunk problems in Pennsylvania (abs.), Science, n.s., **30**, p. 415, 1909.
115. *Grabau A.W.*, Principles of stratigraphy, New York, 1185 p.; revised, 1924, New York, A.G. Seiler, 1185 p., reprinted, 1960, New York, Dover Publications, 2 v., 1185 p. (especially, pp. 607 – 640, 1913).
116. *Greenman N.N., LeBlanc R.J.*, Recent marine sediments and environments of northwest Gulf of Mexico, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **40**, No. 5, pp. 813 – 847, 1956.
117. *Gresswell R.K.*, The physical geography of beaches and coastlines, London, Hulton Educational Publications, 1957.
118. *Griffith E.G.*, Geology of Saber bar, Logan and Weld Counties, Colorado, Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull., **50**, No. 10, pp. 2112 – 2118, 1966.
119. *Griffith W.M.*, A theory of silt and scour, Inst. Civil Engineers Proc., **223**, 1927.

120. *Griggs G.B., Kulm L.D.*, Sedimentation in Cascadia deep-sea channel, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, No. 5, pp. 1361 – 1384, 1970.
121. *Guilcher A.*, Coastal and submarine morphology, New York, John Wiley and Sons, 274 p., 1958.
122. *Guilcher A.*, Coastal sand ridges and marshes and their environment near Grand Popo and Ouidah, Dahomey, in: *Russell R.J., ed.*, 2nd Coastal Geography Conf., April 6–9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 189–212, 1959.
123. *Guillou R.B., Glass J.J.*, A reconnaissance study of the beach sands of Puerto Rico, U.S. Geol. Survey Bull. 1042-1, pp. 273 – 305, 1957.
124. *Halbouty M.T.*, Hidden trends and features, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **17**, pp. 2 – 23, 1967.
125. *Halbouty M.T., Barber T.D.*, Port Acres and Port Arthur fields, Jefferson County, Texas, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **11**, pp. 225 – 234, 1961.
126. *Hammond E.H.*, A geomorphic study of the Cape region of Baja, California, *California Univ. Pubs. Geography*, **10**, pp. 45 – 112, 1954.
127. *Hedgpeth J.W.*, The Laguna Madre of Texas, 12th North Am. Wildlife Conference Trans., pp. 364 – 380, 1947.
128. *Hembree C.H., et al.*, Sedimentation and chemical quality of water in the Powder River drainage basin, Wyoming and Montana, U.S. Geol. Survey Circ. 170, 92 p., 1952.
129. *Hobday D.K., Reading J.G.*, Fair weather versus storm processes in shallow marine sand bar sequences in the late Precambrian of Finnmark, north Norway, *Journ. Sed. Petrology* **42**, No. 2, pp. 318 – 324, 1972.
130. *Holle C.G.*, Sedimentation at the mouth of the Mississippi River, ch. 10, of J.W. Johnson, ed., 2nd Coastal Engineering, Conf. Proc., November, 1951, pp. 111–129, 1952.
131. *Hollenshead C.T., Pritchard R.L.*, Geometry of producing Mesaverde sandstones, San Juan basin, in: *Peterson J.A., Osmond J.C., eds.*, Geometry of sandstone bodies, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 98 – 118, 1961.
132. *Hopkins M.E.*, Geology and petrology of the Anvil Rock Sandstone of southern Illinois, *Illinois Geol. Survey Circ.* 256, 49 p., 1958.
133. *Horton R.E.*, Erosional development of streams and their drainage basins – hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **56**, No. 3, pp. 275 – 370, 1945.
134. *Hoskins D.M.*, Stratigraphy and paleontology of the Bloomsburg Formation of Pennsylvania and adjacent states, Pennsylvania and adjacent states, *Pennsylvania Geol. Survey Bull.* G36, 4th ser., 125 p., 1961.
135. *Hoskins D.M., Conlin R.R.*, Invertebrate fossils from the Bloomsburg Formation of central Pennsylvania, *Pennsylvania Acad. Sci. Proc.*, **32**, pp. 156 – 161, 1958.

136. *Howe H.V., et al.*, Physiography of coastal southwest Louisiana; reports on the geology of Cameron and Vermilion Parishes, Louisiana Geol. Survey Geol. Bull., No. 6, pp. 1 - 72, 1935.
137. *Howell J.V., chm.*, Glossary of geology and related sciences, Washington, D.C., Am. Geol. Inst., 325 p., Supplement, 72 p., 1960.
138. *Hoyt J.H.*, Barreier island formation, Geol. Soc. Am. Bull., **78**, No. 9, pp. 1125 - 1136, 1967.
139. *Hoyt J.H.*, Barrier island formation: reply, Geol. Soc. Am. Bull., **79**, No. 10, pp. 1427 - 1432, 1968.
140. *Hoyt J.H.*, Development and migration of barrier islands, north Gulf of Mexico: discussion, Geol. Soc. Am. Bull., **81**, No. 12, pp. 3779 - 3782, 1970.
141. *Hoyt J.H., Henry V.J., Jr.*, Significance of inlet sedimentation in the recognition of ancient barrier islands, in: Sedimentation of Late Cretaceous and Tertiary outcrops, Rock Springs uplift, Wyoming Geol. Assoc. 19th Field Conf., Casper, Wyoming, Guidebook, pp. 190 - 194, 1965.
142. *Hoyt J.H., Henry V.J., Jr.*, Influence of island migration on barrier island sedimentation, Geol. Soc. Am. Bull., **78**, No. 1, pp. 77 - 86, 1967.
143. *Hoyt J.H., Weimer R.J., Henry V.J., Jr.*, Late Pleistocene and recent sedimentation, central Georgia coast, U.S.A., in: Developments in sedimentology, 1, Deltaic and shallow marine deposits, 6th Internat. Sedimentological Amsterdam and Antwerp. 1963, Proc., pp. 170-176, 1964.
144. *Hoyt J.H., et al.*, Geologic history and development of the barrier islands in the vicinity of Sapelo Island, Georgia (abs.), Southeastern Section Geol. Soc. Am. Mtg., April 13, 1952.
145. *Hoyt W.V.*, Erosional channel in the middle Wilcox near Yoakum, Lavaca County, Texas, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **9**, pp. 41 - 50, 1959.
146. *Johnson D.W.*, Shore processes and shoreline development, New York, John Wiley and Sons, 584 p., 1919.
147. *Johnson D.W.*, The New England-Acadian shoreline, New York, John Wiley and Sons, 608 p., 1925.
148. *Johnson J.W.*, Laboratory investigations on bed-load transportation and bed roughness, U.S. Soil Conserv. Service Tech. Pub. 50, 1943.
149. *Johnson K.G., Friedman G.M.*, The Tully clastic correlatives (Upper Devonian) of New York State: a model for recognition of alluvial, dune (?), tidal, nearshore (bar and lagoon), and offshore sedimentary environments in a tectonic delta complex: Journ. Sed. Petrology, **39**, No. 2, pp. 451 - 485, 1969.
150. *Johnson W.H.*, Sedimentation of the Fraser River delta, Canada Geol. Survey Mem. 125, p. 46, 1921.
151. *Johnson W.H.*, The character of the stratification of the sediments in the recent delta of the Fraser River, British Columbia, Canada, Journ. Geology, **30**, pp. 115 - 129, 1922.
152. *Jordan L.*, Subsurface stratigraphic names of Oklahoma, Okla. Geol. Survey Guidebook 6, 220 p., 1957.

153. Keller W.D., Size distribution of sand in some dunes, beaches, and sandstones, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **29**, pp. 215 – 221, 1945.
154. Kennedy R.G., Prevention of silting in irrigation canals, Inst. Civil Engineers Proc., **119**, pp. 281 – 290, 1895.
155. Kerr R.D., Nigra J.O., Eolian sand control, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **36**, pt. 2, pp. 1541 – 1573, 1952.
156. Khaiwka M.H., Geometry and depositional environments of Pennsylvania reservoir sandstones, northwestern Oklahoma, Univ. Oklahoma, Ph. D. thesis, 126 p., 1968.
157. Khaiwka M.H., Geometry and depositional environment of Morrow reservoir sandstones, northwestern Oklahoma, Shale Shaker, **23**, No. 9, pp. 196– 214; **23**, No. 10, pp. 228 – 232, 1973.
158. Kholief M.M., Hilmy E., Shahat A., Geological and mineralogical studies of some sand deposits in the Nile delta, U.A.R., Journ. Sed. Petrology, **39**, No. 4, pp. 1520 – 1529, 1969.
159. King C.A.M., Beaches and coasts, London, E. Arnold, 1959.
160. Klenova M.V., Regularities in formation of delta sediments and relief (lithomorphogenesis) (abs.), 1st Internat. Oceanography Cong., Preprints, pp. 630 – 634 (Engl. summary), 1959.
161. Kolb C.R., Van Lopik J.R., Depositional environments of the Mississippi River deltaic plain, southeastern Louisiana, in: Deltas in their geological framework, Houston, Texas, Houston Geol. Soc., pp. 17 – 61, 1966.
162. Kruit C., Sediments of the Rhône delta; I, Grain size and microfauna, Koninkl. Nederlandsch Geol.-Mijnb. Genoot., Verh., Geol. Ser., **15**, pp. 357 – 499, 1955.
163. Krumbein W.C., Sedimentary maps and oil exploration, New York Acad. Sci. Trans., ser. 2, **7**, pp. 159 – 166, 1945.
164. Krumbein W.C., Lithofacies maps and regional sedimentary-stratigraphic analysis, Am. Assoc. Petroleum Geologists. Bull., **32**, No. 10, pp. 1909 – 1923, 1948.
165. Kuenen Ph.H., Marine geology, New York, John Wiley and Sons, 568 p., 1950.
166. Kuenen Ph. H., Dutch post-war coastal studies, in: Russell R.J., *chm.*, 2nd Coastal Geology Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 285 – 300, 1959.
167. Kuwahiro I., Morphological studies on alluvial plains in Setouchi district, Geog. Rev. Japan, **31**, No. 3, pp. 160 – 168, 1958.
168. Lacey G., Stable channels in alluvium, Inst. Civil Engineers Proc., **229**, pt. 1, pp. 259 – 384, 1930.
169. Lacey G., Regime flow in incoherent alluvium, Simla, Central Board Irrigation (India) Pub. 20, 1939.
170. Lagaaij R., Kopstein F.P.H.W., Typical features on a fluvio-marine offlap sequence, in: Developments in sedimentology, 1, Deltaic and shallow marine deposits, 6th Internat. Sedimentological Cong. Proc., **1**, pp. 216 – 226, 1964.

171. *Lahee F.H.*, Field geology, New York, McGraw-Hill, 853 p. (especially pp. 80–83), 1941.
172. *Lane D.W.*, Sedimentary environments in Cretaceous Dakota Sandstone in northwestern Colorado, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **47**, No. 2, pp. 229 – 256, 1963.
173. *Lane E.W.*, Stable channels in erodible materials, *Am. Soc. Civil Engineers Trans.*, No. 102, pp. 123 – 194, 1937.
174. *Lane E.W.*, *Borland W.M.*, Estimating bed-load, *Am. Geophys. Union Trans.*, **32**, No. 1, pp. 121 – 123, 1951.
175. *Lara J.M.*, *Miller C.R.*, Conveyance channel widening study, Middle Rio Grande Project, U.S. Bur. Reclamation Open-File Rept., 1951.
176. *Leatherock C.*, Physical characteristics of Bartlesville and Burbank sands in northeastern Oklahoma and southeastern Kansas, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **21**, pp. 246 – 258, 1937.
177. *LeBlanc R.J.*, *Hodgson W.D.*, Origin and development of the Texas shoreline, in: *Russell R.J.*, *chm.*, 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 57 – 101, 1959a.
178. *LeBlanc R.J.*, *Hodgson W.D.*, Origin and development of the Texas shoreline, *Gulf Coast Assoc. Geol. Socs. Trans.*, **9**, pp. 197 – 220, 1959b.
179. *LeBlanc R.J.*, *Hodgson W.D.*, Origin and development of the Texas shoreline, in: Symposium on Late Cretaceous rocks, Wyoming and adjacent areas, Wyoming Geol. Assoc. 16th Ann. Field Conf., Casper, Wyoming, pp. 253 – 275, 1961.
180. *Leontyev O.K.*, *Nikiforov L.G.*, An approach to the problem of the origin of barrier bars, 2nd Internat. Oceanographic Cong., Abs. of Papers, pp. 221 – 222, 1966.
181. *Leopold L.B.*, *Maddock T., Jr.*, The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 252, 57 p., 1953.
182. *Lindley E.S.*, Regime channels, Punjab Eng. Cong. Proc., **7**, 1919.
183. *Lins T.W.*, Origin and environment of the Tonganoxie sandstone in northeastern Kansas, *Kansas Geol. Survey Bull.* 86, pt. 5, pp. 105 – 140, 1950.
184. *Linsley R.K.*, *et al.*, Applied hydrology, New York, McGraw-Hill, 689 p., 1949.
185. *Lohse E.A.*, Dynamic geology of the modern coastal region, northwest Gulf of Mexico, in: *Hough J.L.*, *Menard H.W.*, eds., Finding ancient shorelines, a symposium, Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub., No. 3, pp. 99 – 105, 1955.
186. *Louman S.W.*, Sedimentary facies in Gulf Coast, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **33**, No. 12, pp. 1939 – 1997, 1949.
187. *Lynch S.A.*, Geology of the Gulf of Mexico, in: chap. 2 of Gulf of Mexico – its origin, waters, and marine life, U.S. Fish and Wildlife Service Fishery Bull. 89, pp. 67 – 86, 1954.
188. *Macklin J.H.*, Concept of the graded river, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **59**, pp. 463 – 512, 1948.

189. *Martin R.*, Paleogeomorphology and its application to exploration for oil and gas (with examples from Western Canada), *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **50**, No. 10, pp. 2277 – 2311, 1966.
190. *McCurdy P.G.*, Manual of coastal delineation from aerial photographs, Washington, D.C., U.S. Hydrographic Office, 143 p., 1947.
191. *McEwen M.C.*, Sedimentary facies of the Trinity River delta, Texas, Houston, Texas, Rice Univ., unpubl. thesis, 1963.
192. *McGill J.T.*, Coastal classification maps – a review, in: *Russell R.J., chm.*, 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 1 – 21, summary, 1959, *Geog. Rev.*, **48**, No. 3, pp. 402 – 405, 1959.
193. *McGowen J.H.*, Gum Hollow fan delta, Nueces Bay, Texas, Texas Univ. Bur. Econ. Geology Rept. Inv. 69, 1970.
194. *McKee E.D.*, Flume experiments on the production of stratification and cross-stratification, *Journ. Sed. Petrology*, **27**, No. 2, pp. 129 – 134, 1957.
195. *McKee E.D., Sterrett T.S.*, Laboratory experiments on form and structure of longshore bars and beaches, in: *Peterson J.A., Osmond J.C.*, eds., *Geometry of sandstone bodies*, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 13 – 28, 1961.
196. *Miller D.N., Jr.*, Patterns of barrier bar sedimentation and its similarity to Lower Cretaceous Fall River stratigraphy, in: *Symposium on Earla Cretaceous rocks of Wyoming and adjacent areas*, Wyoming Geol. Assoc. 17th Ann. Field Conf., Casper, Wyoming, pp. 232 – 247, 1962.
197. *Morgan J.P.*, Report on the mudlumps at the mouths of the Mississippi River: pt. 1, The occurrence and origin of the mudlumps at the mouths of the Mississippi River, New Orleans District, U.S. Army Corps Engineers, unpubl. rept., 127 p., 1951.
198. *Morgan J.P., Larimore P.B.*, Changes in the Louisiana shoreline, Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans., **17**, pp. 303 – 310, 1957.
199. *Morgan J.P., Shaver R.H.*, Deltaic sedimentation, modern and ancient, *Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Pub.*, No. 15, 1970.
200. *Morgan J.P., et al.*, Mudlumps – diapiric structures in Mississippi delta sediments, in: *Braunstein J., O'Brien G.D.*, eds., *Diapirism and diapirs*, a symposium, Am. Assoc. Petroleum Geologists Mem. 8, pp. 145 – 161, 1968.
201. *Mothersill J.S.*, A grain size analysis of longshore-bars and troughs, Lake Superior, Ontario, *Journ. Sed. Petrology*, **39**, No. 4, pp. 1317 – 1324, 1969.
202. *Muller J.*, Palynology of Recent Orinoco delta and shelf sediments; Reports of the Orinoco shelf expedition, **5**, *Micropaleontology*, **5**, No. 1, pp. 1 – 32, 1959.
203. *Nanz R.N.*, Genesis of Oligocene sandstone reservoir, Seeligson field, Jim Wells and Kleberg Counties, Texas, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **38**, No. 1, pp. 96 – 117, 1954.
204. *Nota D.J.G.*, Sediments of the western Guiana shelf, Utrecht Univ. dissert., 98 p.; Wageningen, H. Veenman and Zonen; Landbouwhogeschool, Med. 58 (2), 1958.

205. *Oomkens E.*, Depositional sequences and sand distribution in a deltaic complex; a sedimentological investigation of the post-glacial Rhône delta complex, *Geologie en Mijnbouw*, **46**, No. 7, pp. 265 – 278, 1967.
206. *Otvos E.G., Jr.*, Development and migration of barrier islands, northern Gulf of Mexico, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, No. 1, pp. 241 – 246, 1970a.
207. *Otvos E.G., Jr.*, Development and migration of barrier islands, north Gulf of Mexico: reply, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, No. 12, pp. 3783 – 3788, 1970b.
208. *Pepper J.F., de Witt W.R., Jr., Demarest D.F.*, Geology of the Bedford shale and Berea sandstone in the Appalachian basin, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 259, 111 p., 1954.
209. *Pepper J.F., et al.*, Map of the Second Berea sand in Gallia, Meigs, Athens, Morgan, and Muskingum Counties, Ohio, *U.S. Geol. Survey Oil and Gas Inv. Prelim. Map* 5, 1944.
210. *Pepper J.F., et al.*, Geology of the Bedford shale and the Berea sandstone in the Appalachian basin, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 259, p. 111, 1955.
211. *Peterson J.A., Osmond J.C., eds.*, Geometry of sandstone bodies, Tulsa, Oklahoma, *Am. Assoc. Petroleum Geologists*, 240 p., 1961.
212. *Phleger F.B., Ewing G.C.*, Sedimentology and oceanography of coastal lagoons in Baja California, Mexico, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **73**, No. 2, pp. 145 – 181, 1962.
213. *Pincus H.J.*, Type features of the Ohio shoreline of Lake Erie, *Am. Soc. Civil Engineers Proc., Journ. Waterways and Harbors Div.*, **85**, Paper 2297, No. WW4, pp. 1 – 27, 1959.
214. *Pincus H.J.*, Engineering geology of the Ohio shoreline of Lake Erie, Ohio Div. Shore Erosion Tech. Rept. 7, 1960.
215. *Potter P.E.*, Shape and distribution pattern of Pennsylvanian sand bodies in Illinois, *Illinois Geol. Survey Circ.* 339, p. 35, 1962a.
216. *Potter P.E.*, Late Mississippian sandstones of Illinois, *Illinois Geol. Survey Circ.* 340, p. 36, 1962b.
217. *Potter P.E., Pettijohn F.J.*, Paleocurrents and basin analysis, New York, Acad. Press., 296 p., 1963.
218. *Powers W.E.*, Geomorphology of the Lake Michigan shoreline, final report, Northwestern Univ. Dept. Geography ONR Contract Nonr-1228 (07), pp. 1 – 103, 1958.
219. *Price W.A.*, Barrier island, not "offshore bar", *Science*, **113**, No. 2939, pp. 487 – 488, 1951.
220. *Price W.A.*, Correlation of shoreline type with offshore conditions in the Gulf of Mexico, in: *Russell R.J., chm.*, 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 11 – 30, 1954a.
221. *Price W.A.*, Shoreline and coasts of the Gulf of Mexico, in: chap. 2 of *Gulf of Mexico – its origin, waters, and marine life*, U.S. Fish and Wildlife Service Fishery Bull. 89, **55**, pp. 39 – 65, 1954b.
222. *Price W.A.*, Environment and formation of the chenier plain, Quaternaria, **2**, pp. 75 – 86, 1955.

223. Price W.A., Patterns of flow and channeling in tidal inlets, *Journ. Sed. Petrology*, **33**, No. 2, pp. 279 – 290, 1963.
224. Pugh J.C., The Porto Novo-Badagri sand ridge complex, Univ. Coll. Ibadan, Nigeria, Dept. Geography Research Notes, No. 3, pp. 3 – 14, 1953.
225. Rainwater E.H., Stratigraphy and its role in the future exploration for oil and gas in the Gult Coast, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **13**, pp. 33 – 75, 1963a.
226. Rainwater E.H., The environmental control of oil and gas occurrence in terrigenous clastic rocks, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.*, **13**, pp. 79 – 94, 1963b.
227. Reineck H.E., Layered sediments in tidal flats, beaches, and shelf bottoms of the North Sea, in: *Estuaries*, Am. Assoc. Adv. Sci. Pub. 83, pp. 191 – 206, 1967.
228. Rich J.L., Shoestring sands of eastern Kansas, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **7**, pp. 103 – 113, 1923.
229. Rubey W.W., Equilibrium conditions in debris-laden streams, *Am. Geophys. Union Trans.*, 14th Ann. Mtg., pp. 497 – 505, 1933.
230. Rubey W.W., Geology and mineral resources of Hardin and Brussels quadrangles (in Illinois), U.S. Geol. Survey Prof. Paper 218, 179 p., 1952.
231. Russell R.J., Physiography of the lower Mississippi River delta, in: *Reports on the geology of Plaquemines and St. Bernard Parishes*, Louisiana Dept. Conserv. Geol. Bull. 8, pp. 3 – 193, 1936.
232. Russell R.J., Howe H.V., Cheniers of southwestern Louisiana, *Geog. Review*, **25**, pp. 449 – 461, 1935.
233. Russell R.J., Russell R.D., Mississippi River delta sedimentation, in: *Trask P.D.*, ed., *Recent marine sediments*, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 153 – 177, 139.
234. Sabins F.F., Jr., Anatomy of stratigraphic trap, Bisti field, New Mexico, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **47**, No. 2, pp. 193 – 228, 1963.
235. Samojlov I.V., *Die Flussmündungen*, Gotha, Hermann Haack, 647 p., 1956.
236. Schlee J.S., Moench R.H., Properties and genesis of "Jackpile" sandstone, Laguna, New Mexico, in: *Petersen J.A., Osmond J.C.*, eds., *Geometry of sandstone bodies*, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 134 – 150, 1961.
237. Schumm S.A., River morphology, Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 448, p., 1972.
238. Schumm S.A., Khan H.R., Experimental study of channel patterns, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **83**, No. 6, pp. 1755 – 1770, 1972.
239. Schwartz M.L., Spits and bars, Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 464 p., 1972.
240. Scruton P.C., Delta building and the deltaic sequence, in: *Shepard F.P.*, et al., eds., *Recent sediments, northwest Gulf of Mexico*, Tulsa, Oklahoma, Am. Assoc. Petroleum Geologists, pp. 82 – 102, 1960.
241. Serra E.F., III, Progress report – investigations of fluvial sediments of the Niobrara River near Cody, Nebraska, U.S. Geol. Survey Circ. 67, 25p., 1950.

242. *Serra E.F.*, III, Measurement of bed-load sediment, *Am. Geophys. Union Trans.*, **32**, pp. 123 – 126, 1951.
243. *Shepard F.P.*, Revised classification of marine shorelines, *Journ. Geology*, **45**, pp. 602 – 624, 1937.
244. *Shepard F.P.*, *Submarine geology*, New York, Harper and Brothers, 348 p., 1948.
245. *Shepard F.P.*, Longshore-bars and longshore-troughs, Beach Erosion Board Tech. Memo, No. 15, 32 p., 1950a.
246. *Shepard F.P.*, Submarine topography of the Gulf of California, *Geol. Soc. Am. Mem.* **43**, 32 p., 1950b.
247. *Shepard F.P.*, Revised nomenclature for depositional coastal features, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **36**, No. 10, pp. 1902 – 1912, 1952.
248. *Shepard F.P.*, *Moore D.G.*, Sediment zones bordering the barrier islands of central Texas coast, in: *Hough J.L.*, *Menard H.W.*, eds., *Finding ancient shorelines*, a symposium, *Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists Spec. Publ. No. 3*, pp. 78 – 98, 1955a.
249. *Shepard F.P.*, *Moore D.G.*, Central Texas coast sedimentation: characteristics of sedimentary environments, recent history, and diagenesis, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **39**, No. 8, pp. 1463 – 1593, 1955b.
250. *Sherrill R.E.*, *Dickey P.A.*, *Matteson L.S.*, Types of stratigraphic oil pools in Venango sands of northwestern Pennsylvania, in: *Levorsen A.I.*, ed., *Stratigraphic type oil fields*, a symposium, Tulsa, Oklahoma, *Am. Assoc. Petroleum Geologists*, pp. 507 – 538, 1941.
251. *Shulits S.*, Rational equation of river-bed profile, *Am. Geophys. Union Trans.*, 22d Ann. Mtg., pt. 3, pp. 622 – 630, 1941.
252. *Siever R.*, The Mississippian-Pennsylvanian unconformity in southern Illinois, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **35**, No. 3, pp. 542 – 581; reprinted as *Illinois Geol. Survey Rept. Inv. 152*, 1951.
253. *Steinmetz R.*, Sedimentation of an Arkansas River sand bar in Oklahoma: a cautionary note on dipmeter interpretation, *Shale Shaker*, **23**, No. 2, pp. 32 – 38, 1972.
254. *Stevens J.C.*, Discussion of E.W. Lane, Stable channels in erodible materials, *Am. Soc. Civil Engineers Trans.*, No. 102, pp. 145 – 149, 1937.
255. *Sverdrup H.U.*, *Johnson M.W.*, *Fleming R.H.*, *The oceans, their physics, chemistry, and general biology*, New York, Prentice-Hall, 1087 p., 1942.
256. *Swann D.H.*, Late Mississippian rhythmic sediments of Mississippi Valley. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **48**, No. 5, pp. 637 – 658, 1964.
257. *Sykes G.G.*, *The Colorado delta*, Carnegie Inst. Washington Pub. 460, 193 p., 1937.
258. *Thomas A.R.*, Slope formulas for rivers and canals, *Journ. Central Board Irrigation (India)*, **3**, No. 1, pp. 40 – 49, 1946.
259. *Thomas A.R.*, Analysis of hydraulic data of some boulder rivers, *Journ. Central Board Irrigation (India)*, **6**, No. 1, pp. 67 – 71, 1949.
260. *Thompson W.O.*, Original structures of beaches, bars and dunes, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **48**, No. 6, pp. 723 – 751, 1937.

261. *Thompson W.O.*, Lyons sandstone of Colorado Front Range, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **33**, No. 1, pp. 52 – 72, 1949.
262. *Tinler K.J.*, Active valley meanders in south-central Texas and their wider implications, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **82**, No. 7, pp. 1783 – 1800, 1971.
263. *Todd T.W.*, Dynamic diversion: Influence of longshore current-tidal flow interaction on chenier and barrier island plains, *Journ. Sed. Petrology*, **38**, No. 3, pp. 734 – 746, 1968.
264. *Trowbridge A.C.*, Building of Mississippi delta, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **14**, No. 7, pp. 867 – 901, 1930.
265. *Twenhofel W.H.*, Treatise on sedimentation, Baltimore, Williams and Wilkins, 661 p., 1926, reprinted 1961, New York, Dover Publications, 2 v., 926 p. (especially pp. 836 – 850).
266. U.S. Army Corps of Engineers, Studies of river bed materials and their movement, with special references to the lower Mississippi River, U.S. Army Corps Engineers Waterways Expt. Sta. Misc. Paper 17, 161 p., 1935.
267. *U.S. Bureau of Reclamation*, Report of river control work and investigations, lower Colorado River basin, calendar year 1948 and 1949, Boulder City, Nevada, U.S. Bur. Reclamation Open-File Rept., 124 p., 1949.
268. U.S. Congress, Gulf shore of Galveston Island, Texas, Beach Erosion Control Study, House Doc. 218, 83d Cong., 1st Sess., 1953.
269. *van Andel T.H.*, Sediments of the Rhône delta, II, Sources and deposition of heavy minerals, *Koninkl. Nederlandsch Geol.-Mijnb. Genoot., Verh., Geol. Ser.*, **15**, pp. 515 – 556, 1955.
270. *van Andel T.H.*, The Orinoco delta, *Journ. Sed. Petrology*, **37**, No. 2, pp. 297–310, 1967.
271. *van Andel T.H., et al.*, Eeцент sediments of the Gulf of Paria, Reports of the Orinoco shelf expedition, **1**, *Koninkl. Nederlandse Akad. Wetensch. Proc.*, **20**, No. 5, 238 p., 1954.
272. *van de Graaf F.R.*, Fluvial-deltaic facies of the Castlegate sandstone (Cretaceous), east-central Utah, *Journ. Sed. Petrology*, **42**, No. 3, pp. 558 – 571, 1972.
273. *van Straaten L.M.J.U.*, Rhythmic patterns on Dutch North Sea beaches, *Geologie en Mijnbouw*, **15**, No. 3, pp. 31 – 43, 1953.
274. *van Straaten L.M. J.U.*, Composition and structure of recent marine sediments in the Netherlands, *Leidse Geol. Med.*, pt. 19, pp. 1 – 96, 1954.
275. *van Straaten L.M. J.U.*, Recent sandstones on the coasts of the Netherlands and of the Rhône delta, *Geologie en Mijnbouw*, **19**, pp. 196 – 213, 1957.
276. *van Straaten L.M. J.U.*, Littoral and submarine morphology of the Rhône delta, in: *Russel R.J., chm.*, 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst., pp. 233 – 264, 1959.
277. *van Straaten L.M. J.U.*, Coastal barrier deposits in south- and north-Holland, in particular in the areas around Scheveningen and Ijmuiden, *Netherlands Geol. Stichting, Med., n.s.*, No. 17, pp. 41 – 75, 1965.
278. *Vanoni V.A.*, Some experiments on the transportation of suspended load, *Am. Geophys. Union Trans.*, 22d Ann. Mtg., pt. 3, pp. 608 – 620, 1941.

279. *Vanoni V.A.*, Transportation of suspended sediment by water, *Am. Soc. Civil Engineers Trans.*, No. 111, pp. 67 – 133, 1946.
280. *Vann J.H.*, The geomorphology of the Guiana coast, in: *Russell R.J.*, chm., 2nd Coastal Geography Conf., April 6 – 9, Louisiana State Univ. Coastal Studies, Inst., pp. 153 – 187, 1959.
281. *Vice R.B.*, *Serra E.F.*. III, Progress report, investigations of fluvial sediments, Middle Loup River near Dunning and Milburn, Nebraska, U.S. Geol. Survey Open-File Rept., 1950.
282. *von Engelhardt W.*, Die Unterscheidung wasser- und windsortierter Sande auf Grund der Korngrößenverteilung ihrer leichten und schweren Gemengteile, *Chemie der Erde*, **12**, No. 4, pp. 445 – 465, 1940.
283. *von Engeln O.D.*, *Caster K.E.*, *Geology*, New York, McGraw-Hill, 730 p., 1952.
284. *Wanek A.A.*, Geologic map of the Mesa Verde area, Montezuma County, Colorado, U.S. Geol. Survey Oil and Gas Inv. Map OM152, scale 1:63,630, 1954.
285. *Wanless H.R.*, Pennsylvanian cycles in western Illinois, *Illinois Geol. Survey Bull.*, **60**, pp. 179 – 193, 1931.
286. *Wanless H.R.*, *Weller J.M.*, Regional persistence of Pennsylvanian cycles (abs.), *Geol. Soc. Am. Bull.*, **43**, No. 1, p. 139, 1932.
287. *Weimer R.J.*, Upper Cretaceous delta on tectonic foreland, northern Colorado and southern Wyoming (abs.), *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **45**, No. 3, p. 417, 1961.
288. *Weirich T.E.*, Shelf principle of oil origin, migration and accumulation, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **37**, pp. 2027 – 2045, 1953.
289. *Welder F.A.*, Processes of deltaic sedimentation in the lower Mississippi River, Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst. Tech. Rept. No. 12, pp. 1 – 90, 1959.
290. *Weller J.M.*, Cyclical sedimentation of the Pennsylvanian period and its significance, *Journ. Geology*, **38**, No. 2, pp. 97 – 135, 1930.
291. *Weller J.M.*, Environment and history in identification of shoreline types, *Quaternaria*, **3**, pp. 151 – 166, 1956.
292. *Willard B.*, The age and origin of the Shawangunk formation, *Journ. Paleontology*, **1**, No. 4, pp. 255 – 258, 1928.
293. *Wilson C.W., Jr.*, Channels and channelfilling sediments of Richmond age in southcentral Tennessee, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **59**, No. 8, pp. 733 – 765, 1948.
294. *Yeakel L.S., Jr.*, Tuscarora, Juniata, Bald Eagle paleocurrents and paleogeography in the central Appalachians, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **73**, pp. 1515–1540, 1962.
295. *Zenkovich V.P.*, Some new Exploration results about sand shore development during the sea transgression, *De Ingenieur*, No. 17, *Bouw en Waterbouwkunde*, **9**, pp. 113 – 121, 1962.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Анадарко, бассейн 80, 177, 181, 183
 Анахуак, песчаники 107, 108
 Аппалачская геосинклиналь 26, 37, 38
 Аппалачский бассейн 70
 Аркома, бассейн 145, 167–169
 Атока, формация 81, 82, 169, 189
 Бак, гряда 50
 Бар 54–69
 – пальцевидный 106, 119, 159–162
 – поперечный 147, 148
 – серповидный 148, 161
 – устьевой 54, 71
 Барьерный остров, см. Бар
 Бедфорд, толща 27, 70
 Бериа, песчаники 27
 Берм 45, 46, 56
 Биг-Лайм, известняк 26
 Бикментаун, доломиты 37
 Бисти, баровый комплекс 75–80
 Блэк-Ривер, карбонатные породы 37
 Браун-Лайм, известняк 168
 Буч, палеодельта 145, 167–177
 Бэк, гряда 50
 Вдольбереговой вал, см. Бар
 "Верхний" Манкос, глина 76, 77, 79, 80
 Вирджилл, серия 180, 181
 Восточный Внутренний бассейн 18
 Галлеп, песчаник 76–78, 80
 Генетически взаимосвязанная толща
 (GSS) 41, 44, 45, 81, 83, 94, 95,
 131–134, 167, 184–189
 Гранд, низкая гряда 51
 Гранерос, глины 72
 Гринхорн, известняки 72
 Грязевой вулкан 161, 162
 Дакотская группа 89
 Дельта 145–189
 – дугообразная 150, 152–155, 163
 – лопастная 153, 154
 – остроконечная 150, 151, 153, 155
 – типа Гилберта 149, 150, 159
 – – птичьей лапки (Бализе) 106,
 150–155, 158, 159, 162, 163, 165
 – эстуариевая 152, 153
 Денкман, песчаники 113, 114
 Джуниус, гряда 50
 Донки-Крик, нефтяная залежь 141,
 142
 Западный Внутренний бассейн 75
 "Зеленый маркирующий горизонт"
 92–96
 Йокем, нефтяная залежь 136, 137
 Карсон, бар 75–77
 Катскилл-Шеманг, палеодельта 145
 Киртленд, формация 89
 Клинтон, формация 26, 27, 189
 Клифф-Хаус, формация 89, 90, 92–96
 Койот-Крик, нефтяная залежь 141, 142
 Коппер-Ридж, доломиты 37
 Криола, гряда 50, 51
 Лафурш, палеодельта 162–165
 Литл, низкая гряда 51
 Литл-Крик, месторождение 113–115
 Литл-Пекан-Айленд, низкая гряда 50
 Ловелл, песчаники 181
 Льюис, формация 89, 90, 92, 93
 Мадди, песчаники 109, 137–142, 144
 Мак-Алестер, формация 167–172
 Мак-Дермот, формация 89

- Манкос, формация 89, 90, 93
 Маракайбо, бассейн 112, 117
 Марие, бар 75-77
 Марингоуин, палеодельта 162
 Месаверде, группа 89-96, 189
 Мидконтинент 97
 Миллер-Крик, нефтяная залежь 141, 142
 Миифи, формация 89, 90, 93-95
 Миссури, серия 177
 Морроу, серия 80-88, 169, 189
 Моури, глины 137-139
 Нашвилл, купол 27
 "Нижний" Манкос, глины 76, 77
 Нижняя Таскалуса, песчаники 114, 115
 Норт-Айленд, низкая гряда 51
 Норфлет, формация 114
 Обстановки осадконакопления, классификация 10
 Ок-Гров, гряда 51
 Орид, известняк 181, 182
 Осадочная формация, определение 26
 Офсина, песчаники 115, 117
 Пакер-Лайм, известняк 27
 Палео-Миссисипи 154-167
 Памкин, гряда 51
 Паудер-Ривер, бассейн 63, 109, 141, 143
 Пекан-Айленд, низкая гряда 49, 51
 Пердью, низкая гряда 51
 "Песчаники долины по простиранию" 97-100
 Пикчерд-Клиффс, формация 89
 Плакминс, палеодельта 162, 167
 Playaевые пески 49-69
 Подток гиперпикальный 149, 154
 - гипопикальный 150
 - гомопикальный 149
 Пойнт-Лукаут, формация 89-95
 Поток консеквентный 102
 - обсеквентный 102
 - осевой 146, 148
 - плоский 146-150
 - ресеквентный 102
 - субсеквентный 102
 Приливно-дельта 63, 65, 71
 - протока 54, 55, 63, 65
 Прирусловая отмель 109-114
 Прирусловой вал 147, 148, 151, 156-158, 161, 166
 Регрессивное перекрытие 15, 16
 - прилегание 15, 16
 Регрессия, определение 15
 Риган, песчаники 36, 37
 Розет, нефтяная залежь 141, 142
 Руслевой песчаник 101-144
 Сабер, бар 72-74
 Саванна, формация 168, 169
 Сан-Хуан, бассейн 75, 88-96
 "Секонд-Берия", бар 70
 - песчаники 70, 71
 Сент-Бернард, палеодельта 162, 163, 167
 Сент-Питер, песчаники 36, 37
 Силингсон, месторождение 145
 Система дренажа беспорядочная 102
 - - ветвистая 101
 - - кольцевая 102
 - - крючкообразная 102
 - - прямоугольная 102
 - - радиальная 102
 - - сетчатая 101
 - - центростремительная 102
 Скалл-Крик, глины 137-139, 141
 Скелли, зона 76
 Смит, гряда 50
 Суитутотер, месторождение 113
 Таскалуса, песчаники 113, 114
 Термополис, формация 137
 Тертин-Фингер, известняки 81, 84
 Тече, палеодельта 162
 Тигер-Айленд, низкая гряда 51
 Толща непрерывного наращивания мощности (GIS) 41-45, 84, 94, 95, 100, 108, 124-133, 142, 178, 179, 182, 188
 Тонкава, палеодельта 177-180
 - песчаники 63, 177-181
 Торонто, известняки 181
 Трансгрессивное перекрытие 15, 16
 - прилегание 15, 16
 Трансгрессия, определение 15

- Уайлд-Кат, гряда 50
Уилкоккс, формация 134—137
Уэвока-Лейк, нефтяная залежь 174,
175
Уэрфано, бар 75—77
Фолл-Ривер, песчаники 63, 141
Фрио, барьерный бар 22
Фрутленд, формация 89
Хай-Айленд, гряда 51
Хантон, свод 169
Хантсмен, глины 72
Хаскелл, известняк 177—179, 181
Хибнер, глины 181
Хокинс, нефтяная залежь 172, 173
Цинциннати, свод 27, 155
Чаттануга, глины 27
Чепултепек, доломиты 37
Чероки, группа 99, 132
Честер, формация 81, 82
Шанут, залежь 53, 54
Эндикотт, палеодельта 180—183
— песчаник 180—183

УКАЗАТЕЛЬ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ НАЗВАНИЙ

- Акейдиа, округ 107
 Апер-Мад, озеро 51
 Аризона, штат 88
 Арчалета, округ 95, 96
 Бедфорд, река 71
 Бервуд 158, 160
 Бивер, округ 84—87, 177—180
 Бразилия 53
 Бразос, река 155
 Брасас, остров 66
 Бретон, пролив 167
 Вайоминг, штат 63, 109, 137
 Венесуэла 112, 115, 117
 Венесуэльский залив 53
 Венис, протока 160
 Вудворт, округ 84, 87
 Вудс-Хол 14
 Галвестон, барьерный остров 63—65
 — бухта 63, 64
 Галлия, округ 70
 Герреро-Негро, лагуна 65, 66, 68
 Гонсалес 135
 Гранд, озеро 51
 Гранд-Терре, остров 164
 Де-Чени, залив 164
 Дьюитт, округ 135
 Ист-Бей, бухта 64
 Ист-Мапири 117
 Йокем 134—136
 Калкашью, озеро 50
 Камерон 50
 Каминада, залив 164
 Канзас, штат 53, 54, 85, 86
 Кентукки, штат 27
 Колорадо, штат 72, 88, 93—96
 Комомду, река 69
 Кончас, остров 66
 Крук, округ 137
 Кэмпбелл, округ 137
 Кэтфиш, озеро 51
 Лавака, округ 134
 Ла-Лутр, старица 157
 Ла-Плата, округ 95, 96
 Линкольн, округ 113, 115
 Литл-Лейк, озеро 164
 Ловер-Мад, озеро 51
 Логан, округ 73
 Луизиана, штат 14, 49—53, 107
 Лутр, протока 158, 160
 Мад, озеро 50
 Маккензи, река 152
 Мануэла, лагуна 66
 Маскингем, округ 70
 Мейн-Пасс, протока 160
 Мейсон, залив 59
 Мексика 65—69
 Мексиканский залив 22, 33, 39, 50, 51,
 54, 55, 63, 64, 71, 106, 134, 135,
 145, 154, 164, 183
 Мерментау, река 51
 Мидл-Саунд 58—63
 Минк, старица 164
 Миссисипи, река 52, 106, 146, 148,
 150, 154—167, 183
 — штат 113—115
 Мичиган, река 145
 Морган, округ 71
 Моро, старица 164
 Мур, залив 59

- Нечес, река 50
Нил, река 152
Новый Орлеан 165
Нью-Мексико, штат 75, 88, 93–96, 189
Нью-Топ-Сейл, залив 59
Огайо, бухта 70, 155
– штат 27, 37, 38, 189
Оклахома, штат 63, 80–87, 167–171,
173, 175, 177, 179–182, 189
Олд-Топ-Сейл, залив 59
Онслоу, залив 58
Ориноко, река 53
Охо-де-Льебре 65–67
– лагуна 65–68
Пайк, округ 113–115
Пиедра, остров 66
По, река 53
Порт-Артур 50
Порт-Идс 158, 160
Раккурси, озеро 164
Рио-Ариба, округ 95, 96
Рио-Гранде, река 183
Рич, залив 59
Рона, река 53
Сабин, озеро 50
– река 50
Салвадор 53
Сан-Бенансио, река 69
Сан-Джасинто, река 64
Сан-Франсиску, река 53
Сан-Хуан, округ 95, 96
Санто-Доминго, лагуна 68, 69
– река 69
Себастьян-Вискаино, залив 66
Северная Каролина, штат 58, 60, 63
Северное море 54
Семинол, округ 167, 170, 171, 175
Сент-Клер, река 154
Скалистые горы 16
Соледад, река 69
Суринам 53
Техас, штат 39, 86, 134, 151, 155, 189
Тибр, река 155
Тимбалир, залив 164
Тринити, река 64
Уайт, озеро 51
Уэлд, округ 73
Уэст-Бей, бухта 64
Уэстон, округ 137
Уэст-Шампейн, залив 164
Фейетт, округ 135
Флатония 135
Фор-Корнерс 88, 89
Французская Гвиана 53
Фрипорт 151
Халлетсвилл 135
Харпер, округ 84–87, 181
Холли-Бич 50
Цинциннати, полуостров 155
Чаттануга 27
Шандалур, пролив 167
– острова 167
Эллис, округ 84–87
Юз, округ 173
Юта, штат 88

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Андресен (Andresen) 101, 120—122, 125
 Барбер (Barber) 145
 Баррел (Barrell) 145
 Бейтс (Bates) 146—148, 151, 154, 155
 Берн (Bume) 49, 52, 54
 Бернард (Bernard) 54, 55, 60, 64, 101
 Бернхэм (Burnham) 115, 116
 Блантон (Blanton) 58
 Буш (Bush) 81, 97, 145
 Ванек (Wanek) 95
 Ван-Лопик (Van Lopik) 155, 156, 163, 165
 Варне (Warne) 110
 Геродот (Herodotus) 152
 Гилберт (Gilbert) 55, 145, 149
 Гилчер (Guilcher) 56
 Грабау (Grabau) 12, 17, 36
 Гриффит (Griffith) 72, 74
 Гулд (Gould) 49, 51, 163
 Данбар (Dunbar) 21, 39, 45, 154
 Джонсон (Johnson) 55, 56
 Джордан (Jordan) 177
 Диллард (Dillard) 53
 Дэппле (Dapples) 12
 Зенкович (Zenkovich) 56
 Зикмунд (Zikmund) 8
 Калверт (Calvert) 37
 Капс (Caps) 182
 Кастер (Caster) 39, 40
 Кларк (Clark) 8
 Кобб (Cobb) 156
 Колб (Colb) 155, 157, 163, 165
 Крамбейн (Krumbein) 112
 Линс (Lins) 101
 Лозе (Lohse) 39
 Мак-Ки (McKee) 47, 57, 74, 118, 119
 Мак-Фарлан (McFarlan) 49
 Мартин (Martin) 13, 100, 102
 Мейджер (Major) 101
 Мейергофф (Meyerhoff) 8
 Менч (Moench) 101
 Миллер (Miller) 58—60
 Морган (Morgan) 52, 162, 163
 Нанц (Nanz) 145, 152
 Неверс (Hevers) 76
 Осмонд (Osmond) 13
 Пеппер (Pepper) 70, 71, 101, 154
 Петерсон (Peterson) 13
 Петиджон (Pettijohn) 101
 Поттер (Potter) 101
 Притчард (Pritchard) 88, 89, 91, 93, 94
 Райс (Rice) 8
 Рассел (Russell) 49, 155
 Рейнуотер (Rainwater) 145
 Роджерс (Rodgers) 21, 39, 45, 154
 Сабинс (Sabins) 75, 77
 Сивер (Siever) 101
 Скрутон (Scruton) 155—157, 166
 Слингеланд (Slingerland) 107
 Стеррет (Sterret) 57, 74
 Суонн (Swann) 145
 Томпсон (Thompson) 47
 Гроубридж (Trowbridge) 155
 Уилсон (Wilson) 101
 Уинтер (Winter) 182

- Уонлесс (Wanless) 18
Уорн (Warne) 8
Уэймер (Weimer) 145
Уэйрич (Weirich) 44
Уэллер (Weller) 18
Фиск (Fisk) 49, 54, 101, 106, 115, 116,
154-157, 159, 161, 163, 165
Флегер (Phleger) 65-68
Фон Энглен (Von Englen) 39, 40
Фридман (Friedman) 101
Хайвка (Khaiwka) 84, 177, 178, 182,
183
Халбоути (Halbouty) 145
Хау (Howie) 49
Хойт (Hoyt) 134-137
Холленсхед (Hollenshead) 88, 89, 91,
93, 94
Холли (Holle) 156
Хопкинс (Hopkins) 101
Чейвс (Chaves) 53
Шепард (Shepard) 56
Шли (Schlee) 101
Эванс (Evans) 56
Эйзенштатт (Eisenstatt) 114
Эли-де-Бомон (Elie de Beaumont) 55
Юинг (Ewing) 65-68

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Предисловие к английскому изданию	7
Г л а в а 1. Введение. <i>Перевод И.П. Лаврушко</i>	9
Ранее применявшиеся методы поисково-разведочных работ на нефть и газ	11
Источники информации по обсуждаемой проблеме	13
Основополагающие концепции о взаимосвязях между фациями	15
Г л а в а 2. Отложение терригенных осадков в пределах прибрежно-морских районов. <i>Перевод И.П. Лаврушко</i>	17
Постепенное (непрерывное) погружение	18
Циклическое (прерывистое) погружение	22
Постепенное воздымание	31
Циклическое (прерывистое) воздымание	33
Стабильное положение дна бассейна	34
Примеры фациальных взаимосвязей	36
Г л а в а 3. Основополагающие концепции, относящиеся к осадкам прибрежно-морской зоны. <i>Перевод И.П. Лаврушко</i>	39
Профили равновесия	39
Толща непрерывного наращивания мощности и генетически взаимосвязанная толща	41
Пляжевая обстановка осадконакопления	45
Г л а в а 4. Примеры современных пляжевых песков. <i>Перевод И.П. Лаврушко</i>	49
Низкие гряды	49
Бары	54
Г л а в а 5. Примеры древних пляжевых песчаников. <i>Перевод И.П. Лаврушко</i>	70
Песчаники "Секонд-Берия", Аппалачский бассейн	70
Бар Сабер, бассейн Денвер — Джулсберг, Колорадо	72
Бар Бисти, бассейн Сан-Хуан	75

Песчаники Морроу, бассейн Анадарко	80
Песчаники Месаверде, бассейн Сан-Хуан	88
Песчаники, выполняющие долины, развитые по простиранию слоев	97
Г л а в а 6. Русловые песчаники. Перевод Ю.Г. Такаева	101
Дренажные системы	101
Разрезы древних русловых песчаников	102
Внутренняя структура	118
Методы картирования палеодренажных систем	120
Примеры палеорусел	126
Г л а в а 7. Дельты. Перевод Ю.Г. Такаева	145
Введение	145
Теория струйного потока	146
Классификация дельт	151
Дельта реки Миссисипи	155
Дельтовая равнина реки Миссисипи	162
Палеodelьты	167
Прогнозирование дельт	183
Список литературы	190
Предметный указатель	207
Указатель географических названий	210
Именной указатель	212

Д.А. Буш

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ
В ПЕСЧАНИКАХ

Редактор *В. Чернышева*

Художник *А. Генкель*

Художественный редактор *В. Бисенгалиев*

Технический редактор *Е. Бурмистрова*

Подписано к печати 2/ХІІ-76 г.

Бумага офсетн. №2 60×90¹/₁₆ = 6,75 б. л.

Печ. л. 1350 Уч.-изд. л. 14,46

Изд. №5/9065 Цена 1 р. 45 коп. Зак.41.

Издательство "Мир"

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Тульская типография "Союзполиграфпрома"
при Государственном комитете Совета Ми-
нистров СССР по делам издательств, поли-
графии и книжной торговли,
г. Тула, проспект им. В.И. Ленина, 109

1р45к

2028

3