

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГАЗПРОМНЕФТЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР»

На правах рукописи

Ольнева Татьяна Владимировна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК
НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО
СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**
(по материалам Банатской зоны нефтегазонакопления
Паннонского бассейна)

Специальность: 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Санкт Петербург - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Методология исследований. Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ	13
1.1. Основные методологические подходы	13
1.2. Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ для целей изучения литологических ловушек и залежей углеводородов	14
1.2.1. Развитие сейсмофациального анализа через объектно-ориентированные подходы	22
1.2.2. Приемы объектно-ориентированной интерпретации на основе существующих инструментов в программных комплексах	26
1.2.3. Методология создания библиотеки сейсмических образов	33
2. Современные представления об эволюции Паннонского бассейна и особенностях его геологического строения	38
2.1. История геологической изученности Паннонского бассейна	38
2.2. Современные представления об эволюции Паннонского бассейна и особенностях его геологического строения	47
3. Нефтегазоносность	63
4. Сейсмостратиграфический анализ: выделение сейсмостратиграфических комплексов в сейсмогеологических условиях юго-восточной части Паннонского бассейна	73
4.1. Обзор сейсмостратиграфических исследований в юго-восточной части Паннонского бассейна	75
4.2. Принципы выделения региональных сейсмостратиграфических комплексов (ССК)	85
4.2.1. Донеогеновое основание	87
4.2.2. Синрифтовый комплекс. ССК 1. Нижний миоцен	93
4.2.3. Синрифтовый комплекс. ССК 2. Средний миоцен	100
4.2.4. Пострифтовый комплекс. ССК 3. Верхний миоцен (паннон, нижний понт)	107
4.2.5. Пострифтовый клиноформный комплекс. ССК 4. Верхний миоцен (понт)	110

4.2.6. Пострифтовый комплекс. ССК 5. Верхний миоцен (верхний понт) – плиоцен	115
5. Классификация амплитудных аномалий в толще понт-плиоценовых отложений	124
6. Объектно-ориентированная интерпретация локальных геологических событий	137
6.1. Оползневые процессы и явления	138
6.1.1 Теоретические и практические аспекты геолого - геофизического изучения подводных оползней	138
6.1.2 Морфометрические характеристики и типизация оползневых дислокаций	143
6.2. Конусы выноса	157
6.2.1 Теоретические и практические аспекты геолого - геофизического изучения конусов выноса	157
6.2.2 Морфометрические характеристики конусов выноса на основе объектно – ориентированной интерпретации	160
6.3. Шлейфы склонов	167
7. Объектно-ориентированная интерпретация палеоканалов	170
7.1. Типизация палеоканалов в толще понт-плиоценовых отложений озерно-аллювиальной равнины	170
7.2. Параметризация синусоидальности палеоканалов для фациальных реконструкций и объектного моделирования	182
7.3. Способ численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных	191
7.4. Палеоруслы как индикатор сдвиговых дислокаций	200
8. Восстановление серии унаследованных геологических событий на основе объектно-ориентированного интерпретационного подхода	205
9. Опыт применения объектно-ориентированного подхода на Приобском месторождении ЗС НГБ	214
Заключение	228
Список литературы	238

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. По заключению экспертов, в настоящее время, более 40% месторождений нефти в мире открывается в неструктурных ловушках. В России, по мнению В.В. Шиманского, в ловушках подобного типа сконцентрировано более 20% разведанных извлекаемых запасов и 70% прогнозных ресурсов углеводородного сырья. Усложняющиеся задачи поиска и разведки локальных и сложно построенных объектов определяют высокий уровень требований к информативности сейсмических исследований, поэтому запрос нефтегазовой отрасли на новые интерпретационные подходы по-прежнему остается актуальным.

Историческим примером положительного эффекта от внедрения новой парадигмы в интерпретацию сейсмических данных является продвижение в 80-е и 90-е годы принципов сейсмостратиграфии. Комплексное применение сейсмостратиграфического и секвенс стратиграфического подходов, сейсмофациального анализа позволило существенно уточнить строение разведанных залежей и привело к открытию новых месторождений в разных регионах планеты.

Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ, по мнению автора, отвечает запросу на новые интерпретационные подходы. Достигнутый в настоящее время уровень технологического развития сейсмических исследований позволяет получать в благоприятных сейсмогеологических условиях достаточно качественные сейсмические изображения и открывает возможности детального картирования локальных седиментационных событий, таких как оползни, конусы выноса, палеоруслу, бары и т.д. Последующий анализ морфометрических характеристик выявленных объектов способствует уточнению априорных концептуальных моделей, обоснованию латерального распространения литологически ограниченных резервуаров; формированию поисковых критериев; более точной оценке запасов и ресурсов. На этапе разработки месторождения объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ позволяет

оптимизировать размещение скважин в процессе мониторинга эксплуатационного бурения.

В диссертационной работе общие подходы объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа рассматриваются на примере изучения литологически ограниченных резервуаров в отложениях неогенового возраста Банатской зоны нефтегазонакопления Паннонского бассейна. Современные тенденции в направленности геологоразведочных работ в Паннонском бассейне соответствуют общемировым трендам.

Паннонский бассейн расположен в восточной части Центральной Европы в окружении Альп, Карпат, Динарид. Название бассейна дано по наименованию римской провинции Паннонии существовавшей с I века на территории современных Венгрии, восточной Австрии, юго-западной Словакии, северной Словении, северной Хорватии, северо-восточной Сербии, северной Боснии и Герцеговины. Паннонский бассейн является одной из старейших нефтегазоносных провинций мира. Информация о колодезной добыче нефти относится к 1856 году, обнаружение первого месторождения на территории современной Хорватии датируется 1885 годом.

Современные представления о геологическом строении Паннонского бассейна подробно изложены в работах В.Аксина, М.Ковача, Л.Матенко, Д.Радивоевича, Д. Поповски, Г.Тари, Ф. Хорвата и др. Несмотря на широкий научно-практический интерес к изучению Паннонского бассейна большинство публикаций за последние два десятилетия посвящены, в основном, геологическому строению территории Венгрии. Сербскому сегменту, по причине общеизвестных политических событий 1990-х годов, уделялось значительно меньше внимания. Однако, по мнению ученых, занимающихся изучением региона, именно в пределах сербской территории лежит ключ к пониманию геологических процессов формирования и развития бассейна. Диссертационная работа и статьи автора, опубликованные в сербских и российских изданиях, частично способствуют заполнению этого пробела.

В истории геологического развития Паннонского бассейна существовали разные этапы его взаимоотношений с Мировым океаном: в отдельные периоды бассейн открывался, но большую часть времени развивался практически изолированно. Этот факт представляет интерес для развития сейсмостратиграфических и секвенс стратиграфических интерпретационных подходов, поскольку вопрос о роли эвстатических колебаний и их влиянии на цикличность осадконакопления в эпиконтинентальных бассейнах остается дискуссионным (Csato, 1993; Vakarcs, 1994; Jahász et al., 1997, 1999, 2006, 2007; Uhrin and Sztanó, 2012).

Особенности геологического строения Паннонского бассейна обусловлены наличием множественных источников сноса, быстрой сменой условий осадконакопления, широким спектром фациальных обстановок. Сочетание этих факторов во многом оказало влияние на сейсмогеологические условия территории и характер сейсмического материала: отсутствие регионально выраженных опорных отражающих горизонтов; наличие мощных интервалов с фрагментарными осями синфазности; повсеместное распространение локальных амплитудных аномалий типа «яркое пятно».

В процессе работы с сейсмическими данными обозначились слабые места в стандартных интерпретационных подходах фазовой корреляции. С одной стороны, возникают вопросы к информативности обычной фазовой корреляции в подобных сейсмогеологических условиях, с другой стороны, интерпретация с допущением фазовых переходов вызывает активную полемику в профессиональной среде. Актуальность этой полемики объясняется все возрастающей потребностью в углубленной интерпретации сейсмических данных при картировании литологических и комбинированных ловушек.

Объектом исследований является юго-восточная часть Паннонского бассейна, в структурно-тектоническом отношении представляющая собой Банатский грабен, наиболее нефте - газо перспективный геологоразведочный район Сербии, Венгрии и Румынии. В нефтегазоносном отношении территория

приурочена к Банатской зоне нефтегазонакопления Паннонского нефтегазоносного бассейна (по районированию И.В. Высоцкого, 1990 г.).

Цель работы заключается в обосновании эффективности объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа для прогнозирования морфометрических характеристик литологических ловушек и разработке целостного методического подхода на примере изучения нефтегазоносных комплексов Банатской зоны нефтегазонакопления Паннонского нефтегазоносного бассейна.

Основные задачи исследований.

1. Создание методологии, тестирование и развитие приемов объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа для выявления и картирования литологических ловушек с целью поиска и параметризации залежей углеводородов.

2. Определение критериев идентификации региональных сеймостратиграфических комплексов в сейсмогеологических условиях юго-восточной части Паннонского бассейна с учетом зонального и вертикального распределения элементов углеводородных систем.

3. Выявление характерных сейсмических образов для отдельных геологических событий, характеризующих сеймостратиграфические комплексы; анализ морфометрических характеристик закартированных объектов; установление взаимосвязи распределения литологических ловушек и залежей углеводородов с локальными геологическими событиями.

5. Восстановление истории геологического развития региона на основе картирования отдельных геологических событий и оценки их морфометрических характеристик.

6. Анализ потенциала Банатской зоны нефтегазонакопления, формирование поисковых критериев и основы для стратегического планирования геологоразведочных работ.

Фактический материал. В основу работы положены результаты авторской интерпретации более 6 500 км² сейсмических материалов в модификации МОГТ 3D, полученных с 2011 года в юго-восточной части Паннонского бассейна и экспертный анализ лицензионных участков на территории Венгрии, Хорватии, Румынии общей площадью более 25 000 км².

Дополнительными материалами послужили результаты коллективной научно-исследовательской работы по масштабному региональному обобщению геолого-геофизических данных в пределах Паннонского бассейна на основе комплексной интерпретации 81582 пог. км сейсмических исследований МОГТ 2D, 15697 км² сейсмических исследований МОГТ 3D и данных по 3251 скважине, выполненной в период с 2014 по 2015 гг. в НТЦ НИС Нафтагаз (Сербия).

Научная новизна.

1. Уточнена сейсмостратиграфическая модель изучаемой территории по результатам сейсмических исследований МОГТ 3D для временного интервала, соответствующего неогеновым отложениям. Представленная модель включает пять сейсмостратиграфических комплексов. По каждому сейсмостратиграфическому комплексу определены особенности сейсмического изображения, позволяющие идентифицировать комплекс на вертикальных и погоризонтных сейсмических сечениях в условиях отсутствия скважинной информации.

2. Разработаны методические основы объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа, позволяющего развивать традиционные подходы сейсмофациального анализа в направлении более детальной геологической интерпретации локальных седиментационных объектов. На основе разработанного подхода типизированы сейсмические изображения оползневых дислокаций для условий эпиконтинентального бассейна, выполнен анализ их морфометрических характеристик.

3. Определены доминирующие типы палеоречных систем позднепонтийского и плиоценового возрастов. Построены схемы заполнения Паннонского бассейна,

уточняющие существующие научные представления об основных направлениях транспортировки материала.

4. Разработан способ численной оценки морфометрических параметров палеорусел, основанный на морфометрических зависимостях, установленных для современных русловых систем. Способ позволяет прогнозировать геометрические параметры литологических ловушек, проявленных в сейсмических материалах фрагментарно в силу ограничения разрешающей способности сейсмического метода.

Практическая значимость. Диссертация подготовлена в процессе реализации производственных и научных программ компаний ПАО «Газпром нефть» и НИС а.д. Нови Сад (Сербия).

В период с 2011 год по 2017 год компанией ПАО «Газпром нефть» в юго-восточной части Паннонского бассейна проведены масштабные площадные сейсморазведочные исследования. Задачи, поставленные перед геологоразведочными работами, продиктовали необходимость создания региональной модели бассейна; активизировали поиск и внедрение новых приемов эффективной сейсмогеологической интерпретации, направленной на снижение рисков изучения малоразмерных ловушек литологического и комбинированного типов.

Результаты проведенных исследований с использованием объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа открывают новые возможности детальной интерпретации сейсмических материалов для картирования ловушек литологического и комбинированного типов. Внедрение разработанных приемов, включая способ численной оценки морфометрических параметров палеоканалов, способствует снижению рисков и повышению эффективности геологоразведочных работ.

Построенная прогнозная схема нефтегазоносности юго-восточной части Паннонского бассейна и прилегающих территорий в настоящий момент является основой перспективного планирования геологоразведочных работ в регионе.

Материалы исследований включены в авторский тематический курс «Сейсмостратиграфический и сейсмофациальный анализ», подготовленный для специализированного обучения сотрудников ПАО «Газпром нефть» в созданном компанией Центре Профессионального Роста (ЦПР).

Реализация работы в производстве. Разработанные подходы объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа использованы в практической работе предприятий ООО «Газпромнефть НТЦ», НИС а.д. Нови Сад (Сербия) и НТЦ НИС (Сербия) по следующим проектам: «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных и разработка нефтегеологической модели на территории лицензионного участка 3D Итебей»; «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных и построение нефтегеологической модели в области исследований 3D Кикинда»; «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных и построение нефтегеологической модели в области исследований 3D Чока»; «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных и построение нефтегеологической модели в области исследований 3D Милошево»; «Оперативное сопровождение обработки и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с целью изучения сейсмогеологического строения площади Кумане»; «Комплексная интерпретация геологических и геофизических данных с целью изучения геологического строения площади Кумане 3D»; «Комплексная интерпретация геологических и сейсмических данных, полученных на лицензионном участке 3D Мартонош-Велебит, и сейсмических данных 2D, полученных на лицензионном участке Чантавир-Ада»; «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных с целью уточнения геологического строения территории в пределах сейсморазведочного участка 3D Сираково»; «Комплексная интерпретация геологических и сейсмических данных, полученных по результатам сейсмической съемки на площади Турия I»; «Оперативное сопровождение обработки сейсмических данных на площадях Турия I и Турия II и комплексной интерпретации геолого-геофизических данных на площади Турия I»; «Создание региональной геологической модели и оценка перспектив нефтегазоносности

Паннонского бассейна», «Классификация амплитудных аномалий в целях повышения успешности ГИР в осадочном комплексе М и Р1»; в процессе оперативного анализа новых активов (на территории Венгрии и Хорватии), существующих концессий на территории Венгрии и Румынии в рамках ежегодных договоров по сопровождению геологоразведочных работ.

Основные защищаемые положения.

1. Сейсмогеологическая модель неогеновых отложений Банатской зоны нефтегазонакопления включает пять сеймостратиграфических комплексов, выделенных в соответствии с характером сейсмического изображения и региональными этапами геологического развития Паннонского бассейна. Особенности сейсмического изображения в каждом комплексе формируются локальными геологическими событиями, характеризующими доминирующий тип седиментационной системы.

2. Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ обеспечивает возможность прогнозирования и оценки морфометрических характеристик локальных геологических событий на основе детальной интерпретации, осуществляемой в соответствии с концептуальной моделью седиментационной системы и способствующей получению изображения, приближенного к реальным формам палеообъекта.

3. Для палеорусел и их отдельных элементов, закартированных по сейсмическим материалам, численная оценка морфометрических характеристик позволяет прогнозировать параметры отдельных элементов меандрирующей системы не проявленных в сейсмическом изображении, но представляющих интерес для оценки объема литологической ловушки. Прогноз осуществляется на основе морфометрических зависимостей, установленных для современных речных систем.

4. По результатам комплексного сейсмогеологического анализа Банатской зоны нефтегазонакопления Паннонского НГБ определен потенциал литологически ограниченных залежей и построена прогнозная схема нефтегазоносности региона, представляющая собой основу для планирования

дальнейших геологоразведочных работ на территории Сербии, Венгрии, Румынии.

Апробация работы. Автором по тематике сейсмогеологической интерпретации опубликовано 35 работ и 1 книга (научное издание). Материалы, изложенные в диссертации, представлены и обсуждались на региональных и международных конференциях: «Конгресс геологов Сербии» (Доньи Милановац, 2014 г., Врнячка Баня, 2018 г.), «Конгресс геологов Хорватии» (Осиек, 2015 г.), «Проблемы и достижения современной нефтегазовой геологии» (Калининград, 2014 г.), «Петромодель» (Петергоф, 2015 г.), «Моделирование седиментационных систем» (Тронхейм, 2016 г.), ежегодные конференции EAGE (Вена, 2015 г., Париж, 2016 г.), «Геомодель» (Геленджик, 2016 г., 2017 г.), "Сейсмические технологии" (Москва, 2017 г.).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения с основными результатами и выводами. Объём диссертации составляет 264 страницы, содержит 128 рисунков и 13 таблиц. Список использованных источников включает 234 наименования.

Автор выражает глубокую признательность своим коллегам и руководителям в ООО «Газпромнефть НТЦ», ПАО «Газпром нефть», «НИС а.д. Нови Сад» (Сербия), НТЦ НИС Нафтагаз (Сербия).

ГЛАВА 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

1.1. Основные методологические подходы

В качестве общеметодических подходов в процессе научной работы использовались: комплексирование геолого-геофизических методов, системный анализ, метод аналогии, принцип актуализма, подходы сейсмостратиграфии, секвенс-стратиграфии, сейсмофациального анализа.

1. Комплексный подход заключался в комплексировании скважинной и сейсмической информации для идентификации отражающих горизонтов, их интерпретации, диагностике обстановок осадконакопления при использовании приемов сейсмостратиграфии, секвенс-стратиграфии, сейсмофациального анализа.

2. Системный подход осуществлялся от частного к общему: каждое геологическое событие рассматривалось в контексте целостной системы осадконакопления с учетом причинно-следственных связей.

3. Изучение отдельных геологических событий и существование их современных аналогов позволило в полной мере использовать метод «актуализма» Чарлза Лайеля, то есть проецировать на палеообъекты современную информацию о морфологии, например, оползневых тел, о закономерностях их развития во времени и в пространстве, информацию об особенностях седиментогенеза.

4. Метод аналогий способствовал трансляции геологической интерпретации с детально изученных, подтвержденных бурением объектов на слабоизученные объекты.

5. Иерархический подход обеспечивал соотнесение масштабов локальных геологических событий с историей геологического развития конкретной области и региона.

1.2. Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ для целей изучения литологических ловушек и залежей углеводородов

По заключению экспертов, в настоящее время, более 40% месторождений нефти в мире открывается в неструктурных ловушках, антиклинальные ловушки и залежи к ним приуроченные, в основном, разведаны.

Несмотря на активный поиск и развитие новых направлений для поддержания ресурсной базы, таких как исследование углеводородного потенциала континентального шельфа, сланцевая нефть, сланцевый газ, газогидраты и т.д., экспертное геолого-геофизическое сообщество считает, что именно неструктурные ловушки будут основным источником поддержания добычи в освоенных регионах в ближайшее десятилетие. В России в ловушках подобного типа сконцентрировано более 20% разведанных извлекаемых запасов и 70% прогнозных ресурсов углеводородов [139]. Информация по зарубежным бассейнам также свидетельствует о том, что запасы в литологических ловушках сопоставимы с запасами в структурных ловушках, более детальные поисковые работы приводят к возобновлению добычи на участках уже истощенных месторождений. В неокомских отложениях Западной Сибири широко распространены ловушки литологического и комбинированного типов, их вклад в поддержание уровня добычи с течением времени только возрастает [2, 9, 45].

В начале 2000-х годов геологи констатировали, что достоверность картирования литологических и комбинированных ловушек по данным сейсмических исследований МОГТ 2D не соответствует общим ожиданиям [69]. За прошедшие годы ситуация изменилась, благодаря массовому переходу к сейсмическим исследованиям МОГТ 3D. Трехмерные данные послужили основой для нового этапа в развитии методов и инструментов сейсмогеологической интерпретации неструктурных объектов. В настоящий момент, запрос на новые интерпретационные подходы, способствующие получению из сейсмических данных как можно большего объема геологической информации, по-прежнему,

остается актуальным. Предлагаемый автором диссертации объектно-ориентированный подход в полной мере отвечает этому запросу.

Через объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ автор диссертации предлагает последовательное развитие приемов и подходов, заложенных в основу сеймостратиграфического анализа, секвенс-стратиграфического анализа и сейсмофациального анализа.

Основы вышеперечисленных подходов впервые обозначены в статьях П. Вейла, Р. Митчема и их коллег по компании «Еххон». В 1975 году в рамках Конгресса Американской ассоциации геологов-нефтяников был организован Первый симпозиум по сейсмической стратиграфии. Материалы симпозиума опубликованы в 1977 году в сборнике под названием «Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration» [114]. Появлению сеймостратиграфии предшествовало длительное развитие геологической интерпретации сейсмической информации, в которой значительную роль сыграла советская, а затем российская школа геофизиков - сейморазведчиков, уделявшая пристальное внимание разделению осадочного чехла на литолого-фациальные комплексы и палеотектоническим условиям их формирования. В российской школе сейсмофациальные исследования, как и сам термин «сейсмофация» были впервые концептуально обоснованы в начале 60-х годов в работах Я.П. Маловицкого (1964) [93].

Среди авторов специальных методических разработок в области сеймостратиграфических и сейсмофациальных исследований выделяются работы А.Г. Авербуха, М.П. Антипова, Ю.А. Воложа, Ю.Б. Гладенкова, Н.А. Кунина, Е.В. Кучерука, И.Н. Керусова, Л.С. Маргулиса, С.Н. Птецова, Ф.И. Хатянова, А.Е. Шлезингера, С.С. Эльмановича и др. [93].

Расширение интерпретационных возможностей на этапе внедрения сеймостратиграфического подхода, секвенсной стратиграфии, сейсмофациального анализа заключалось в признании двух положений: значимости для интерпретации слабых нерегулярных отражений и взаимосвязи

рисунка сейсмических отражений с условиями осадконакопления изучаемых отложений.

Сейсмостратиграфический анализ, как правило, базируется на интерпретации опорных отражающих горизонтов от поверхностей несогласия и поверхностей напластования. Обычно, эти отражающие горизонты отождествляются с реперными региональными границами, разделяющими относительно крупные толщи осадков. Сейсмические реперные границы, в большинстве случаев, не являются строго палеоизохронными, но имеют определенную хроностратиграфическую значимость в масштабах геологического времени. Если эрозионная поверхность не является акустически контрастной, то ее наличие можно спрогнозировать по угловому несогласию между расположенными под ней «срезанными» вверх по восстанию отражениями и расположенными над ней «налегающими» и «прилегающими» отражениями. Анализ осей синфазности, передающих характер напластования в пределах сейсмостратиграфических комплексов, позволяет обоснованно интерпретировать не только опорные, но и «условные» отражающие горизонты. Основная задача при их прослеживании заключается в аппроксимации по фрагментам осей синфазности палеоизохронной поверхности. Точность структурных построений на основе «условных» горизонтов всегда ниже по сравнению с опорными, чего нельзя сказать об их информативности. Именно их информативность способствовала развитию и становлению секвенс-стратиграфического подхода [21, 49, 101 - 103, 111, 112, 114, 115, 141, 152].

Термин «секвенс» предложен Л. Слоссом с соавторами для обозначения осадочных образований, ограниченных поверхностями несогласий [223]. Определение было впоследствии уточнено в работах Р. Митчема [200]. В настоящее время под этим термином понимается относительно согласная последовательность генетически связанных слоев, ограниченных поверхностями несогласий или скоррелированных с ними согласными поверхностями [34].

Циклостратиграфическое направление развивалось разными научными школами. В конце 19 века европейские стратиграфы обособляли осадочные

комплексы, ограниченные поверхностями, сопоставимыми с перерывами в осадконакоплении. В это же время Э. Зюсс [Suess, 1885] привлек для объяснения трансгрессивно-регрессивных циклитов эвстатические колебания и сформулировал концепцию глобального контроля изменений уровня Мирового океана над цикличностью осадочных толщ [34, 103]. В этом же направлении работали Г. Штилле, Н.С. Шатский, В.В. Белоусов, М.В. Муратов, М.А. Усов, Н.П. Херасков и др. [34]. Современное направление секвенс-стратиграфических исследований сформировали M. Jervey, H. Posamentier, J. Baum, V. Wagoner, J.F. Sarg, G. Allen, W. Shlanger, C.R. Handford, R.G. Louks, O. Catuneanu [34]. В отечественной школе большой вклад в него внесли А.Е. Шлезингер, А.В. Дронов, Е.О. Малышева, В.А. Жемчугова, А.В. Хортов и др. [34].

Секвенс-стратиграфия является комплексным подходом позволяющим анализировать пространственно-временную эволюцию осадочного бассейна, реконструировать последовательность формирования осадочных комплексов, прогнозировать фациальный состав отложений, даже в условиях отсутствия скважинной информации. Приемы и инструменты секвенс-стратиграфического подхода активно используются в процессе обоснования критериев для поиска месторождений углеводородов, для прогноза распространения и качества коллекторов, наличия литологических ловушек и связанных с ними залежей УВ.

В отличие от метода «сейсмической стратиграфии», рассчитанного на получение стратиграфической информации из сейсмических данных, и приемов «секвенсной стратиграфии», нацеленных на изучение характера заполнения осадочного бассейна, в сейсмофациальном анализе акцент в интерпретации делается на геологическом строении целевого интервала исследований. Все обозначенные подходы взаимосвязаны. Сеймостратиграфическая интерпретация позволяет определиться с целевым интервалом исследования. Подходы секвенс-стратиграфии помогают идентифицировать изохронные палеоповерхности, что особенно важно для изучения синхронно произошедших геологических событий (одновозрастных фаций).

Как показывает практика, корреляция опорных и «условных» отражающих горизонтов, направленная на решение структурных задач, далеко не всегда является эффективной основой для проведения сейсмofациального анализа и детализации локальных объектов, так как результатом стандартной корреляции обычно является сглаженная поверхность, отображающая общий тренд в поведении отражающего горизонта. Автор полагает, что наиболее ценная информация о геологических объектах содержится в отдельных, иногда кажущихся незначительными в общем объеме сейсмического материала фрагментарных осях синфазности. То есть, в процессе корреляции, важно сделать допущение, что практически каждый элемент сейсмического изображения потенциально может нести в себе определенную геологическую информацию [86, 167, 203].

Традиционная фазовая корреляция по-прежнему является основой структурной интерпретации, но в определенных сейсмогеологических условиях для корреляции целевых горизонтов она перестает быть информативной. Например, вследствие интерференционных явлений при изменении толщин клиновидных тел в клиноформном комплексе их границы могут контролироваться как положительным, так и отрицательным отражениями [70]. Сложная волновая картина формируется также в сейсмогеологических условиях толщ, ассоциированных с условиями озерно-аллювиальной равнины, так как аллювиальные системы отличаются крайней неоднородностью строения. Развиваемый автором объектно-ориентированный подход допускает условно-фазовую корреляцию (фазовые переходы), с целью формирования целостной картины геологического объекта. В сейсмогеологических условиях Западной Сибири подобные подходы являются единственно возможными для картирования сложнопостроенных ловушек и залежей углеводородов в ачимовской толще и клиноформных шельфовых отложениях неокома. В своих работах, результаты подобной корреляции А.А. Нежданов определяет как «сейсмогеологический горизонт». Несомненно, подобная вольная интерпретация должна контролироваться скважинными данными и сейсмогеологическим

моделированием. В инструментах интерпретации сейсмических данных МОГТ 3D есть все возможности осуществления контроля качества сейсмогеологических горизонтов путем отслеживания изображения на погоризонтных слайсах.

Проявление геологического события в волновом поле во многом зависит от его акустической контрастности и сейсмогеологических условий в целом. Накопленный мировой опыт позволяет прийти к выводу, что существуют два типа объектов. Первый тип проявляется в волновом поле через аномалии, второй – нет. Тема прямых поисков углеводородов путем вовлечения в процесс интерпретации динамических характеристик волнового поля актуальна с 50-х годов прошлого века, в то время были выдвинуты первые гипотезы об изменении интенсивности отражений при переходе от водонасыщенной части коллектора к нефтегазонасыщенной. История вопроса подробно изложена в публикации Ф.Д. Хилтермана «Интерпретация амплитуд в сейсморазведке» [131]. В 1963 году В.В. Черлин и А.А. Сергеев сформулировали четыре ключевых диагностических признака прямых поисков: «яркие пятна», интерференционные эффекты на краях залежей, «плоские пятна» и поглощение («тусклые пятна»). В диссертационной работе А.А. Нежданова приводятся следующие данные: в динамических параметрах сейсмических волн в той или иной степени находит отражение не более 20% залежей углеводородов в Западной Сибири. В первую очередь это сводовые газовые залежи в сеноманских отложениях, залежи газа и газированных нефтей в нижних шельфовых неокомских пластах [70]. В процессе сейсмической интерпретации данных в пределах юго-восточной части Паннонского бассейна автором были проведены аналогичные аналитические исследования. Анализ разведанных месторождений позволил сделать заключение, что только одна треть залежей проявляется в волновом поле в виде амплитудных аномалий [15].

Для картирования первого типа объектов разработаны достаточно эффективные методы и инструменты. Для второго типа объектов необходимы углубленные сейсмогеологические подходы позволяющие обосновать наличие потенциального природного резервуара через анализ сформировавших его геологических событий и седиментационной системы в целом [62-64, 85, 101,

102]. Одним из таких подходов, по мнению автора диссертации, является объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ.

Целью объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа является всестороннее изучение локальных геологических явлений, оказывающих существенное влияние на волновое поле и создающих свой индивидуальный узнаваемый образ в сейсмическом изображении.

Анализ доступных для изучения сейсмическими методами геологических явлений позволяет сделать вывод, что их набор достаточно ограничен. В основном, речь идет о геологических объектах, создаваемых склоновыми (гравитационными) процессами, палеоруслах, рифогенных постройках, карсте [23, 24, 61, 101, 102, 109, 119, 125]. Существенным ограничением выступают сейсмогеологические условия и разрешающая способность геофизического метода. Стоит отметить, что даже в процессе интерпретации акустически контрастного конуса выноса, его дистальная часть вполне может остаться непроявленной в волновом поле по причине крайне малых толщин (менее значения вертикального сейсмического разрешения). Еще одним ограничением является неоптимальное расположение сейсмической съемки или ее недостаточная площадь покрытия для картирования геологического явления. Особенно актуален этот вопрос для изучения конусов выноса, например, в ачимовском комплексе ЗС НГБ [234]. Специалисты часто сталкиваются с ситуацией, когда в пределах площади картируется только система множественных шнурковых объектов (подводящих каналов), а целостную картину приходится достраивать путем предположений: как по отношению к ним может быть расположен склон, на каком удалении происходит разгрузка подводящих каналов, какой формы и масштаба могут быть лопасти предполагаемых конусов выноса. В этом отношении, сейсмические материалы по Паннонскому бассейну обладают явным преимуществом, так как меньший масштаб событий позволяет анализировать целостные системы.

Методика объектно-ориентированного подхода формировалась в процессе поиска решений для все более усложняющихся сейсмогеологических задач

изучения месторождений нефти и газа. В первую очередь речь идет о степени детальности интерпретации. Организация сейсмогеологического мониторинга для размещения эксплуатационных и разведочных скважин на основе концептуальных моделей, интерактивная обратная связь с данными бурения позволили убедиться в том, что даже незначительные вариации волнового поля, изначально принимаемые за помехи, могут нести геологическую информацию. Этот установленный практическим путем факт дает основание «углубляться» в сейсмический материал и добиваться получения все более четких сейсмических изображений локальных геологических явлений (объектов). Результаты интерпретации, получаемые в процессе сейсмогеологического мониторинга, демонстрируют реальные возможности детального изучения геологических явлений.

Объектно-ориентированный подход можно рассматривать как последовательное развитие сеймостратиграфического анализа, секвенс-стратиграфического анализа и сеймофациального анализа. Он позволяет декомпозировать сеймостратиграфические комплексы и клиноциклиты на локальные геологические явления (объекты), являющиеся индикаторами обстановок осадконакопления; сформировать критерии для прогноза латерального распространения тех или иных объектов; оценить масштабность прогнозируемых событий. Смещение акцентов в интерпретации на конкретное геологическое явление позволяет коллекционировать и типизировать сейсмические изображения, что дает возможность в последующем идентифицировать подобные объекты в пределах других площадей и регионов, в отличие от результатов сеймофациального анализа, уникальных для каждой площади.

Обращение к сейсмогеологическому анализу локальных геологических явлений согласуется с системным подходом к изучению геологической среды, который предусматривает ее декомпозицию с построением иерархии пространственно связанных частей, в данном случае, геологических объектов.

Схема объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа приводится на рисунке 1.1.

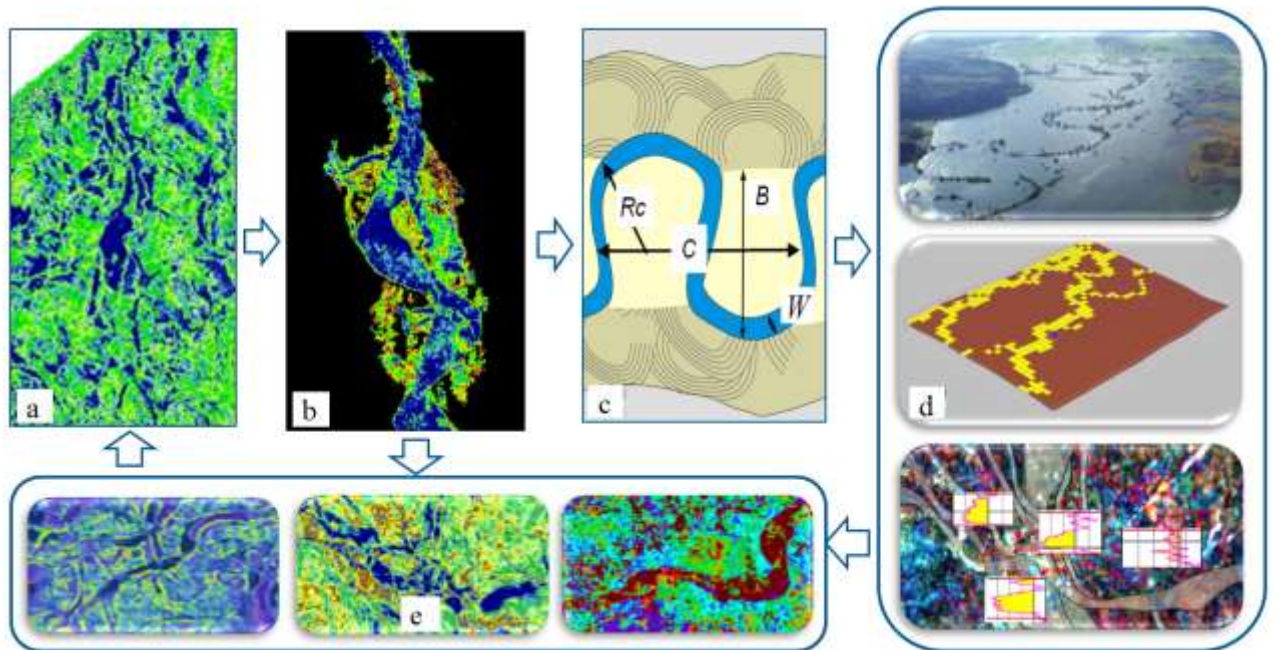


Рисунок 1.1 – Общая схема проведения объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа: а – выявление объекта в процессе стандартной интерпретации; б – интерпретация и картирование объекта с применением объектно-ориентированных подходов; с - анализ морфометрических характеристик, d – палеореконструкция среды осадконакопления, объектное геологическое моделирование, прогноз свойств резервуара; е – создание библиотеки сейсмических изображений

1.2.1. Развитие сейсмофациального анализа через объектно - ориентированные подходы

Объектно - ориентированные подходы при опосковании литологических ловушек являются эффективными, если: объект достаточно контрастен по физическим свойствам относительно вмещающих пород; временной интервал уверенно стратиграфически идентифицирован, то есть изменение волнового поля и выявленные аномалии действительно соответствуют особенностям строения изучаемого объекта; существует возможность прокоррелировать границу соотносимую с кровлей пласта, а в идеале и с его подошвой. Чем точнее интервал анализа, тем меньше влияние временного поля, отвечающего за вмещающую

среду, и тем контрастнее визуализируются карты распределения сейсмических параметров (сейсмофаций). Сейсмические образы в комплексе с анализом всей имеющейся геологической информации позволяют надежно прогнозировать границы распространения изучаемых локальных объектов, что значительно снижает риски и делает небольшие по площади объекты вполне привлекательными для разработки.

Объектно-ориентированный подход дополнительно подчеркивает главные преимущества сейсмофациального анализа как метода исследований: наглядность, визуальную привлекательность, реалистичность, возможность сопоставления результатов с современными аналогами [35, 59, 61, 204, 213].

Для сейсмофациального анализа категория «формы» объекта имеет важное значение. Например, применительно к конусам выноса, их форма в плане не только помогает идентифицировать объект, но и позволяет составить общие представления о среде осадконакопления. Радиальная веерообразная форма может свидетельствовать о формировании конуса единичным питающим каналом, предположительно, песчаном составе отложений, возможно, субконцентрическом распределении грубо- и мелкозернистых фаций, а также о существовании локального отрицательного элемента изометричной конфигурации в палеорельефе подстилающего горизонта. Радиус конусов, состоящих из многочисленных лопастей, колеблется от нескольких километров до нескольких сотен километров, мощность осадков не превышает 1000 метров [74]. Вытянутая перпендикулярно области сноса форма конуса может интерпретироваться как результат разгрузки нескольких питающих каналов. Такие формы сложены осадками преимущественно илистого состава. Подобные конусы выноса сформированы крупными реками, такими как Инд, Конго, река Святого Лаврентия и подробно описаны в литературе [74, 123]. Проградация долгоживущего конуса выноса способствует формированию определенной вертикальной последовательности во внутреннем строении конуса и вариациям фациального состава отложений. Вытянутые конусы выноса могут достигать

3000 км по удлинению (Бенгальский конус выноса), а их мощность может превышать 10 км [123].

Дельтовые конусы выноса с преобладающим влиянием на осадконакопление флювиальных процессов имеют в плане грушевидную форму, ориентированную расширением в сторону глубоководной части и совмещенную с системой ветвящихся русел. Такие мелководные конусы выноса (дельтовые) являются относительно небольшими (радиус не превышает 10 км) и маломощными (100 – 200 м), сложены преимущественно грубозернистым материалом, в эпиконтинентальных бассейнах – песчаным.

В соответствии с базовыми определениями сейсмофациальный анализ включает три основных этапа.

Первый этап начинается с визуальной оценки массива сейсмических данных с фокусом на целевой интервал исследований. Пошаговый просмотр вертикальных сечений и временных слайсов позволяет интерпретатору выявить отдельные, наиболее обращающие на себя внимание особенности сейсмического изображения. Например, такие как локализованные аномальные значения амплитуд; фрагменты хаотической записи на фоне регулярных осей синфазности или, наоборот, четко выраженные оси синфазности на фоне хаотичного изображения; комбинации фрагментов осей синфазности в оригинальные формы (холмообразные) и т.д. На этом этапе тестируются различные приемы интерпретации, как стандартные, так и авторские; формируется гипотеза о возможном наличии тех или иных геологических объектов в соответствии с общей информацией об обстановке осадконакопления. Интерпретация осуществляется как по исходному массиву сейсмических данных, так и по любым его модификациям: разнообразные атрибуты, результаты инверсионных преобразований, спектральной декомпозиции, классификации волнового поля.

В соответствии с этим, можно выделить три технологических направления, вне зависимости от конкретного программного обеспечения:

– атрибутный анализ [121, 189];

- применение алгоритмов классификации [30, 44, 55, 106, 107, 110, 181, 196];
- использование спектральной декомпозиции [10-12, 73, 208].

Второй этап предполагает картирование выявленных объектов. Для выполнения поставленной задачи необходимо получение качественного сейсмического изображения на погоризонтном срезе (слайсе), которое позволит проявить целостную систему объектов, понять их диспозицию относительно друг друга, оконтурить каждый объект, и, по возможности, детализировать его внутреннее строение. Первоначальная гипотеза о седиментационной системе уточняется или трансформируется. Основными технологиями, способствующими выделению объектов, являются атрибутивный анализ, классификации волнового поля, RGB технологии.

Третий этап сейсмофациального анализа напрямую связан с геологической интерпретацией полученных данных. Ключевыми моментами являются прогноз литофаций и реконструкция обстановки осадконакопления.

Объектно-ориентированный подход представляется эффективным на всех обозначенных этапах. Нарботанный с опытом видеоряд сейсмических образов позволит в последующем быстрее распознавать явление в сейсмическом материале и результативнее использовать наработанные приемы интерпретации.

Детальность в интерпретации сейсмических данных зависит от многих факторов, в числе которых важную роль играют сейсмогеологические условия, параметры полевой съемки, качество проведенных исследований, технологии обработки и интерпретации. Особое внимание необходимо уделять разрешающей способности метода по вертикали, пространственной разрешающей способности, явлению интерференции отражений от близкорасположенных границ, подавлению помех и т.д. [114].

Несмотря на массовое внедрение за последнее десятилетие сейсморазведки в модификации МОГТ 3D, непрерывном возрастании ее детальности (повышение кратности, расширение азимутальности), качества исходных данных, активным развитием технологий обработки и интерпретации физические ограничения

метода продолжают оставаться актуальными и их необходимо учитывать в повседневной работе [87].

1.2.2. Приемы объектно-ориентированной интерпретации на основе существующих инструментов в программных комплексах

Различие в подходах интерпретации обусловлено поисковыми объектами. Для структурных и комбинированных ловушек с латерально выдержанными пластами, характеризующимися некоторыми вариациями по фациальному составу или толщинам, фазовая корреляция отражающего горизонта, обоснованного стратиграфической привязкой, в большинстве случаев позволяет получать необходимую основу для сейсмогеологического (сейсмофациального) анализа. Наилучший вариант - автоматическое прослеживание экстремума, соотносимого по привязке с кровлей пласта, с контролем изменения амплитуд по ближайшим погоризонтным (седиментационным) слайсам.

Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ, как целостный методологический подход, рассматривается для изучения геологических обстановок осадконакопления, в которых формируются локальные явления, нарушающие условно плоскопараллельный характер среды. Особенностью обозначенного подхода является фокус интерпретации на отдельно взятом объекте. Основой такого подхода служит базовая концептуальная модель, позволяющая специалисту направлять интерпретацию «в нужное русло» для поиска и детализации сейсмического изображения от определенных седиментационных объектов.

Например, если речь идет о клиноформном комплексе, то в процессе экспресс-интерпретации необходимо определиться с латеральным расположением бровки шельфа, предположить направление сноса и спрогнозировать ареал возможной локализации оползней и конусов выноса. В дальнейшем подобная базовая информация позволяет выбрать оптимальные вертикальные сечения для

визуализации целевого интервала и определиться с наличием в целевом интервале откликов от локальных геологических событий (явлений, объектов).

В клиноформном комплексе поддаются объектно-ориентированному сейсмогеологическому анализу оползни, подводящие каналы и лопасти конусов выноса. Лопастные конусы выноса и оползни являются аккумулятивными образованиями, как правило, создающими увеличенные мощности, поэтому зачастую они проявляются на вертикальных сечениях через появление дополнительного отражения. Еще одной важной характеристикой аккумулятивного объекта является его отличие в вещественном составе от вмещающих отложений. При акустической контрастности сред создаются предпосылки выделения откликов от границ объекта в волновом поле. Оползни, как правило, имеют в разрезе специфический и узнаваемый рисунок, характеризуемый серией субрегулярных фрагментов осей синфазности.

Объектно-ориентированный подход допускает условно-фазовую корреляцию (фазовые переходы). В этом случае, отображение объекта на погоризонтном слайсе может рассматриваться как элемент контроля качества выполняемой корреляции: геологическое явление, как будто само направляет руку интерпретатора. В первую очередь это касается латерально протяженных объектов, таких как палеоканалы.

Объектно-ориентированный подход реализуется на этапе, когда общие контуры предполагаемых седиментационных объектов уже намечены, создана концептуальная модель и требуется максимальная детализация объекта и/или его элементов.

Основой объектно-ориентированного подхода является детальная корреляция. Допущение, что каждый фрагмент сейсмического изображения несет в себе определенную геологическую информацию, предполагает:

- корреляцию максимально возможных вариантов палеоизохронных поверхностей в пределах целевого интервала исследований;
- корреляцию отдельных локальных событий; объемное выделение объекта из массива сейсмических данных.

В соответствии с этим, приемы объектно-ориентированой интерпретации можно разделить на два направления, но могут оказаться результативными оба варианта.

Первое направление включает приемы работы, направленные на выявление и локализацию объекта(ов) через идентификацию палеоизохронных поверхностей. Второе направление предполагает детальную интерпретацию уже установленного объекта, аномально проявленного в сейсмическом изображении. В первом случае ключевая задача заключается в определении палеоизохронных поверхностей с последующей локализацией объекта. Во втором случае, палеоизохронную поверхность восстанавливают экстраполяцией от объекта, для того, чтобы, по возможности, понять общую картину среды осадконакопления. И в том, и в другом случае задача сводится к корректному определению условно одномоментных событий.

Идентификация палеоизохронных поверхностей в целевом интервале выполняется от поверхностей, построенных на основе интерпретации опорных отражающих горизонтов или от опорных горизонтов, прослеженных в режиме автокорреляции по всей площади исследований. Рассмотрим следующие варианты.

Первый вариант. Объект маломощный, но проявляет себя в опорном горизонте или в интервале вблизи опорного горизонта через изменение амплитуды (значения атрибута). В этом случае сглаженный вариант структурной интерпретации необходимо «подсадить» на четкий «максимум» или «минимум» фазы, в зависимости от стратиграфической привязки, с последующим снятием по горизонту или в ближнем интервале значений сейсмического атрибута. Этот же прием рекомендуется использовать в некотором интервале вблизи опорного отражающего горизонта. Если позволяет качество сейсмического материала, то пошаговой «подсадкой» на экстремумы каждой фазы с последующим анализом параметра, можно просканировать значительный интервал. Наличие опорного горизонта позволяет создавать в целевом интервале погоризонтные слайсы. Наиболее информативные из них трансформируются в поверхность. Если есть

возможность улучшить изображение, то отождествляются с ближайшим экстремумом.

Второй вариант. Объект заключен в интервале между двумя опорными горизонтами. С учетом геологического строения интервала и общего характера осадочных напластований, можно использовать прием создания слайсов между горизонтами (пропорциональные слайсы). Особенно актуально это для клиноформного комплекса. Из искусственно созданных слайсов в пределах клиноформы можно подобрать поверхности, максимально приближенные к условным отражающим горизонтам. Далее, как и в предыдущем случае, необходимо преобразовать слайс в поверхность и подсадить на ближайшие экстремумы.

Каждое преобразование осуществляется с применением процедур контроля качества. Включение в работу кубов-атрибутов и других трансформаций исходного волнового поля влечет за собой обязательное уточнение корреляции.

Для описания трехмерного объекта и использования дополнительных инструментов, таких как классификация по форме трассы, из вспомогательных поверхностей выбираются те, которые наилучшим образом заключают в себе целевой интервал. От величины и корректности выбора этого интервала напрямую зависит контрастное и четкое проявление объекта в атрибутах и результатах классификации. Эффект достигается за счет локализации информации от конкретно взятого объекта, его литологических границ и наполнения.

На рисунке 1.2 приведены несколько вариантов корреляции отражающего горизонта АС 10-1-3 (Приобское месторождение, Западная Сибирь) в соответствии с возможной неопределенностью в привязке и карты сейсмофаций, им соответствующие. Карта сейсмических фаций, построенная на основе исходной корреляции, позволяет выявить объект и наметить общую концептуальную модель. Карта сейсмофаций на основе второго варианта интерпретации позволяет оконтурить лопасть конуса выноса и проследить подводный канал. [93, 94].

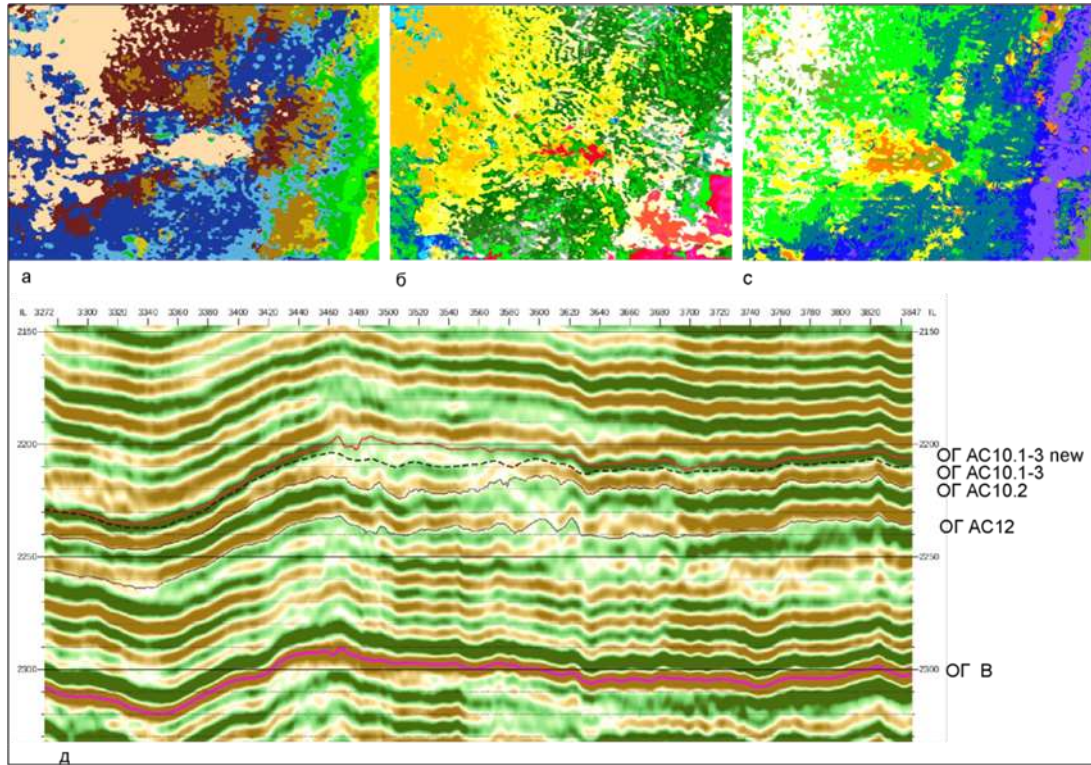


Рисунок 1.2 - Варианты корреляции ОГ АС 10-1-3 (Приобское месторождение, Западная Сибирь) в соответствии с возможной неопределенностью в привязке (д) и карты сейсмofаций, им соответствующие (а,б,с) [94]

Детальная интерпретация объекта. Отсутствие опорных отражающих горизонтов вследствие значительной латеральной и вертикальной изменчивости разреза приводит к большой неопределенности в корреляции и сложности в отождествлении палеоизохронных событий. В этом случае, объектно-ориентированную интерпретацию и выстраивание палеоизохронной поверхности можно выполнять от объекта. Вариант подобной интерпретации продемонстрирован на рисунке 1.3.

Проявление объекта в аномалии сейсмической записи или других ее особенностях способствует процессу интерпретации. В этом случае наиболее эффективным инструментом является автоматическая корреляция, вне зависимости от особенностей алгоритма.

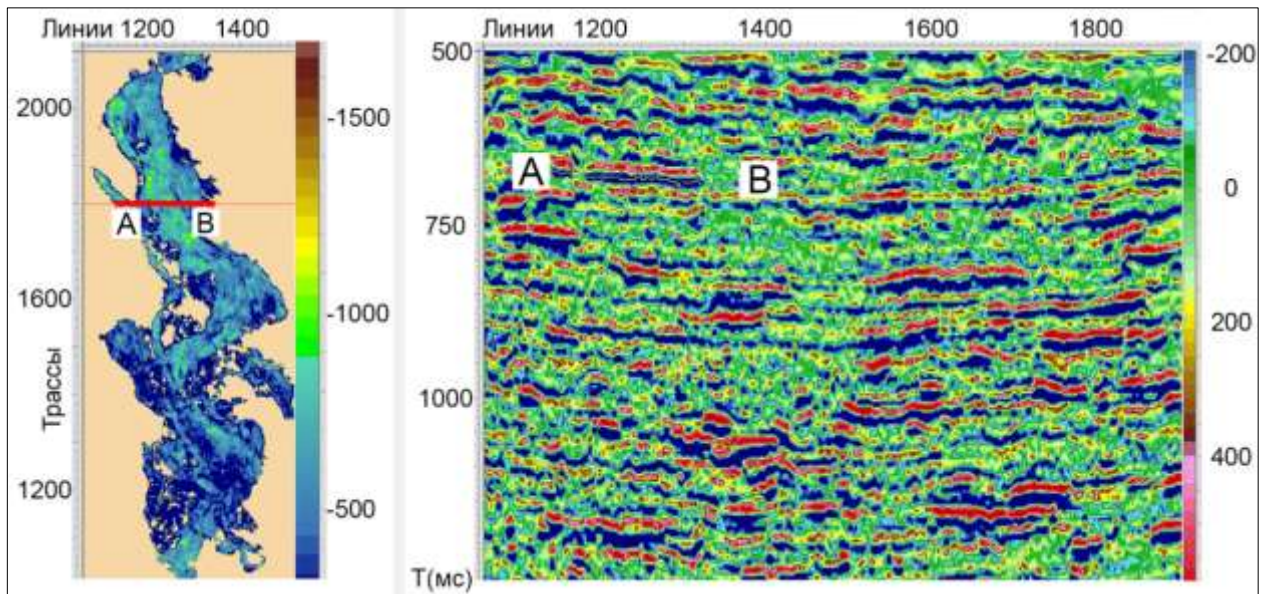


Рисунок 1.3 - Картирование палеорула приемами объектно-ориентированной интерпретации (Паннонский бассейн)

Условные обозначения: цветовые шкалы соответствует относительной интенсивности амплитуд; нумерация линий и трасс на слайсе произведена через 20 м

Не только аномалия, но и обращающие на себя внимание особенности сейсмического изображения, могут способствовать корреляции от объекта во вне, в то время как другие обобщенные подходы интерпретации только сnivelируют полезную информацию.

Выделение из массива сейсмических данных фрагмента, ассоциированного с целостным геологическим объектом. Существующие инструменты интерпретации включают итеративную работу с «режимом прозрачности», который позволяет отфильтровывать необходимые значения амплитуд (атрибута) для эффективного выявления геологического события. Примеры приводятся на рисунке 1.4 и рисунке 1.5.

Выделение подобным путем наиболее амплитудных объектов позволяет определиться с их формой, диспозицией по отношению к соседним объектам, приуроченностью к конкретной обстановке осадконакопления, чтобы на следующем этапе оперативно подключить скважинную информацию для более детального седиментационного анализа.

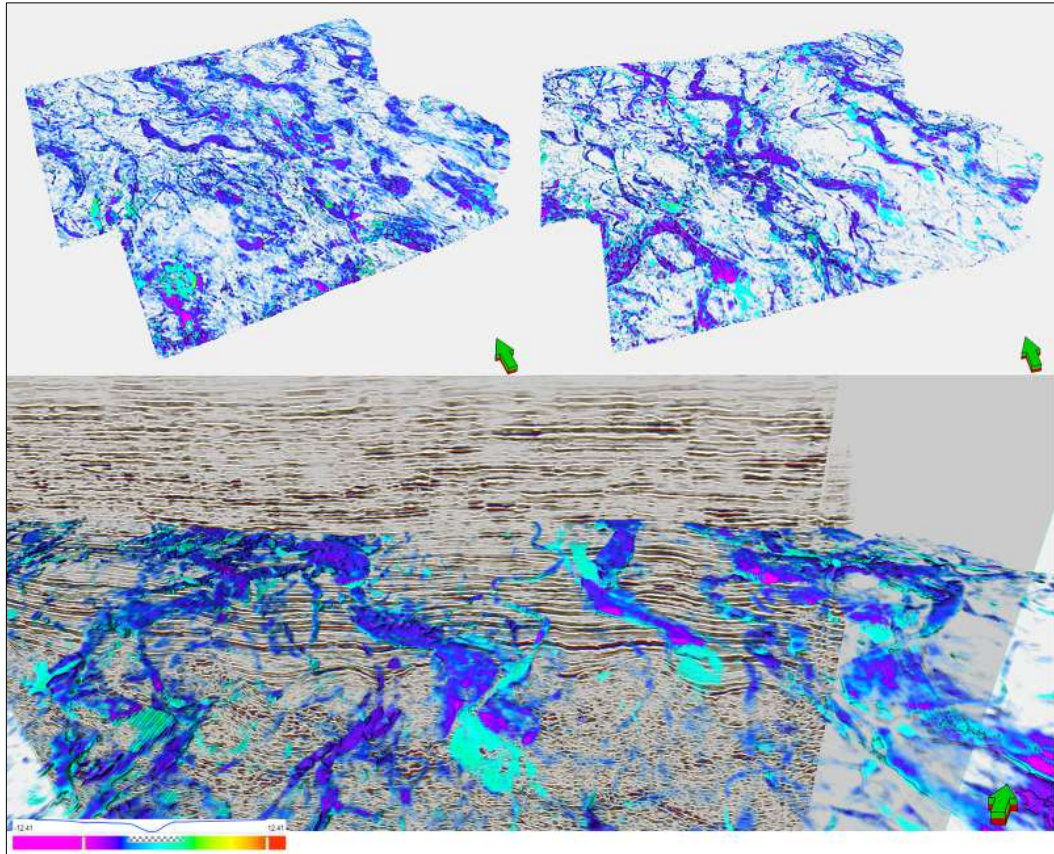


Рисунок 1.4 - Выявление палеорусел на погоризонтном слайсе в режиме прозрачности (Паннонский бассейн)

Условные обозначения: цветовая шкала соответствует относительной интенсивности амплитуд; нумерация линий и трасс на слайсе произведена через 20 м

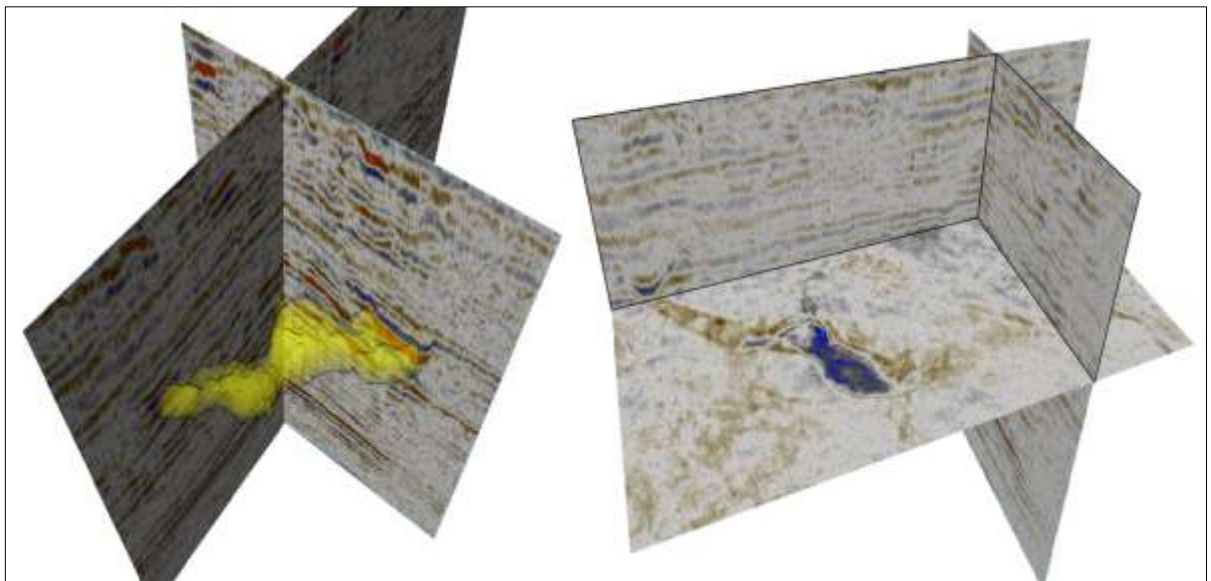


Рисунок 1.5 - Выявление палеоруслa как «geobody» (Западная Сибирь) [93]

Объектно-ориентированный подход предполагает концентрацию внимания на конкретном объекте, извлечении из сейсмических данных максимально возможной информации о нем с целью последующего прогноза условий среды осадконакопления и выполнения палеореконструкций. Интерпретация основывается на базовой концептуальной модели. Наилучший эффект достигается на этапе сейсмогеологического мониторинга эксплуатационного бурения [75-79].

В рамках объектно-ориентированной интерпретации используется как исходный массив данных, так и любые его модификации: разнообразные атрибуты, результаты инверсионных преобразований, спектральной декомпозиции, классификации волнового поля. Различные трансформации исходных сейсмических данных, как правило, не создают принципиально новой информации, но подсвечивают какие-либо особенности сейсмического изображения и помогают интерпретатору выявить геологическое событие как в разрезе, так и на карте. Сводный обзор приемов интерпретации для объектно-ориентированного подхода приводится в таблице 1.

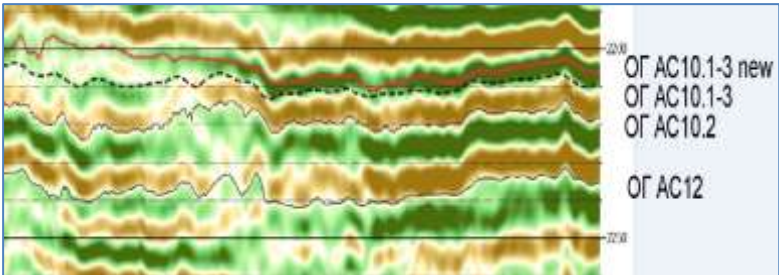
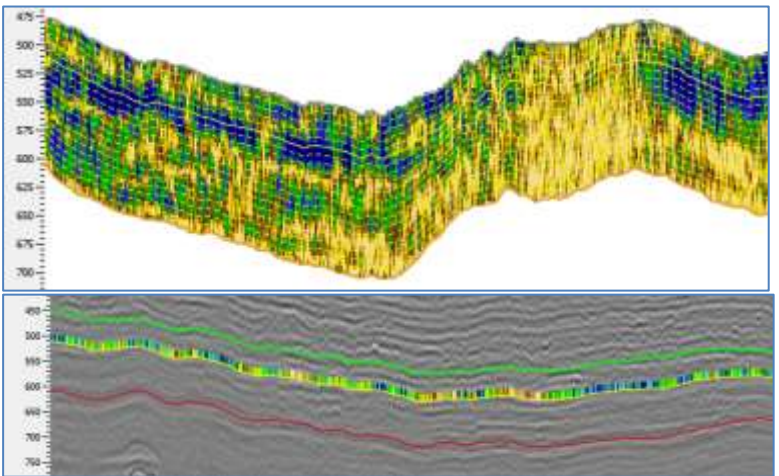
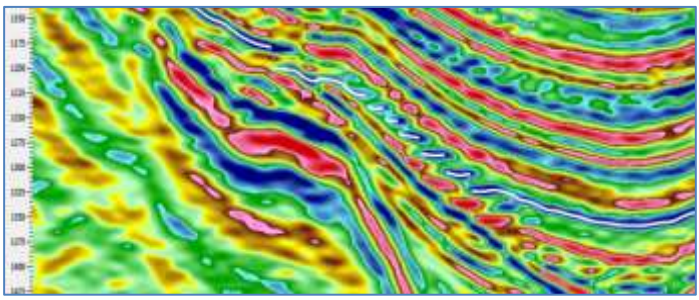
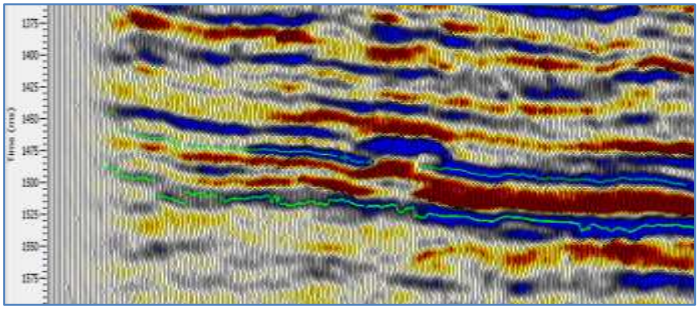
1.2.3. Методология создания библиотеки сейсмических образов

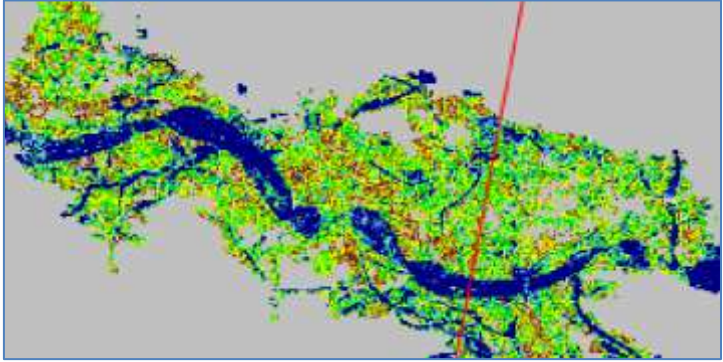
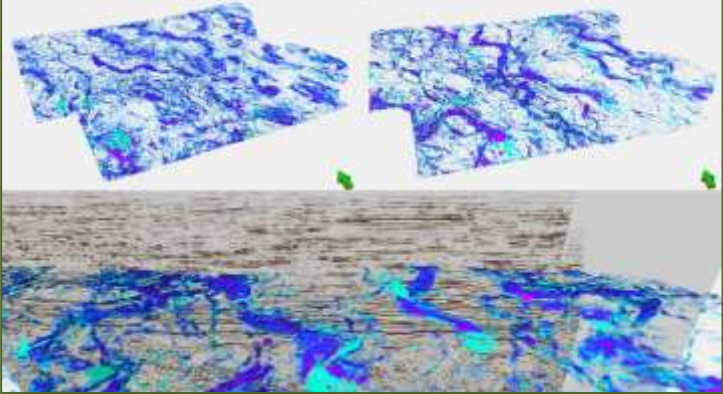
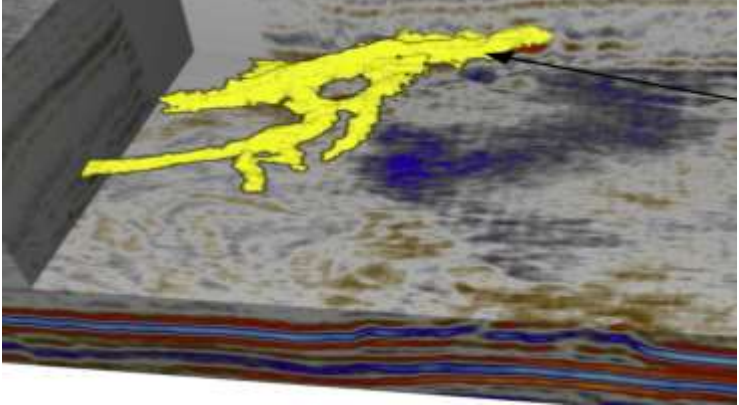
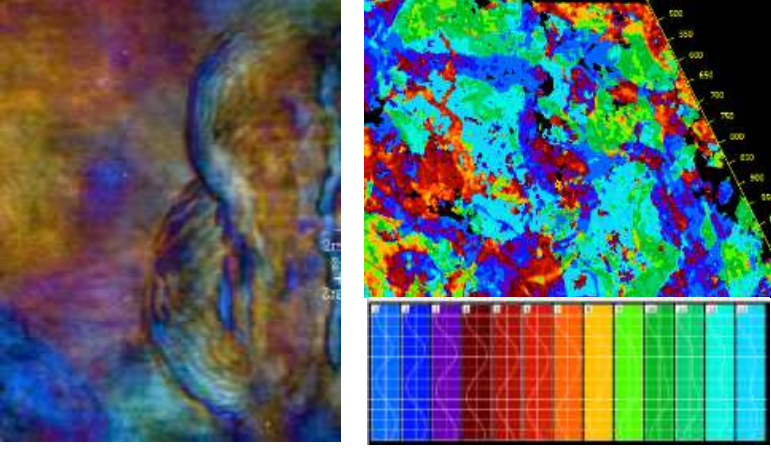
Объектно-ориентированный подход позволяет создать библиотеку сейсмических образов. Под сейсмическим образом в данном контексте следует понимать сейсмическое изображение на вертикальном или горизонтальном (погоризонтном) сечении, характерное для конкретного геологического события.

Создание каталогов, альбомов с типовыми сейсмическими разрезами или визуализацией геологических событий для отдельных территорий на протяжении длительного времени считается актуальной задачей. Первым из этой серии выпущен альбом «Методические рекомендации по применению сейсморазведки ОГТ» («ВНИИГеофизика», М., 1975 г.). В альбоме выполнено обобщение методики применения сейсморазведки методом ОГТ 2D на тот период. Вторым масштабным альбомом является публикация ЦГЭ – «Геологические явления в

Таблица 1

Объектно-ориентированные подходы. Приемы интерпретации

№	Описание	Иллюстрации
1	2	3
1	Выявление и локализация объекта(ов) через идентификацию палеоизохронных поверхностей	
2	Создание погоризонтных слайсов с целью поиска палеоизохронных поверхностей	
3	Детальная фазовая корреляция	
4	Условно фазовая корреляция	

5	Автоматическая корреляция от объекта во вне в поисках палеоизохронной поверхности	
6	Работа с инструментами «прозрачности»	
7	Экстрагирование объекта по значениям амплитуд или атрибута	
8	Применение технологии спектральной декомпозиции, атрибутного анализа, классификаций массива сейсмических данных	

сейсмических волновых полях и прогноз неантиклинальных ловушек» (ЦГЭ, М., 1991 г.) [19].

В альбоме представлены геологические результаты применения МОВ ОГТ в различных районах, на основе геологической интерпретации. В настоящее время существуют многочисленные специализированные международные сайты, где можно найти подобную информацию.

Существует мнение, что для сейсмофациального анализа эталонов не существует, и связь рисунка сейсмической записи с фациальным составом отложений является оригинальной для каждой площади [126]. С этим сложно не согласиться, как и с тем обоснованием, что на волновое поле влияет множество факторов. В одной из первых отечественных работ по сеймостратиграфии А.Е. Шлезингер отметил, что «близкие рисунки сейсмической записи в разных регионах могут характеризовать отличные фациальные обстановки и вещественный состав и, наоборот, несхожие сейсмические записи могут отвечать близким фациальным обстановкам и вещественному составу отложений. Следует вырабатывать свои региональные и локальные тесты, которые можно использовать лишь на относительно ограниченных территориях» [141].

Автор диссертации в разработанном подходе предлагает сместить акценты от латерального прогноза фациального состава в процессе сейсмофациального анализа к геологическому событию (например, оползневым явлениям, палеоканалам, конусам выноса). В этом случае событие становится весьма узнаваемым не только на разных площадях, но и в разных регионах, в отличие от оригинальных для каждой площади взаимосвязей между фациальным составом отложений и особенностями волнового поля.

Выявление и анализ отдельных фрагментов в сейсмическом изображении согласуется с особенностями работы человеческого мозга, для которого мыслительный процесс через системы образов является наиболее эффективным. Накопление информации обеспечивает узнавание объектов на сейсмическом разрезе, что в значительной степени способствует активизации осмысления сейсмического материала и его геологической интерпретации. Таким образом,

формирование системы региональных сейсмических образов, отражающих характерные геологические процессы и явления, позволяет сделать процесс интерпретации более интерактивным на каждой последующей площади.

Обращение к особенностям мыслительного процесса при обработке (осмыслении) больших массивов данных рассматривается автором как актуальное направление для последующих исследований по наращиванию эффективности сейсмогеологической интерпретации.

Объектно-ориентированный подход можно охарактеризовать следующими положениями:

- актуальность в связи с насущными вопросами изучения литологических и комбинированных ловушек;
- информативность – извлечение дополнительной информации из сейсмических данных путем интерпретации;
- доступность – использование для более углубленной интерпретации стандартных инструментов;
- тиражируемость – создание библиотеки сейсмических образов для всестороннего использования.
- эффективность – экономический эффект на всех этапах как геологоразведочного процесса, так и в процессе мониторинга разбуриваемых месторождений.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ПАННОНСКОГО БАССЕЙНА И ОСОБЕННОСТЯХ ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

2.1. История геологической изученности Паннонского бассейна

Изучение Паннонского бассейна и его нефтегазоносности продолжается более 150 лет. Современные представления о его эволюции подробно изложены в работах В. Аксина, М. Ковача, Л. Матенко, Д. Радивоевича, Д. Поповски, Г. Тари, Ф. Хорвата и др. [143, 169-174, 184, 191, 212].

К первым геологоразведочным работам можно отнести исследования мест выхода нефти на дневную поверхность во второй половине 19 века: Лендава (Словения), Пакленица (Хорватия, 1856), Пожарница (Босния и Герцеговина), Ян Медлен (Словакия, 1913). В качестве методов геологоразведочных работ до второй мировой войны использовалось ударное, а потом и ротационное бурение.

Во время второй мировой войны немецко-фашистские оккупанты провели первые гравиметрические исследования. По результатам этих работ в юго-восточной части Паннонского бассейна была подготовлена к бурению структура Велика Грета, в пределах которой, позднее, в 1949 году, пробурена скважина и открыто одноименное месторождение – первое экономически-рентабельное месторождение газа в регионе [143].

Этап современных исследований начался после Второй мировой войны. Применяемые технологии и методики разведки в основном опирались на советский опыт. В этот период подготовлены и изданы геологические карты территории Югославии, Венгрии, Румынии.

Первая геомагнитная съемка на территории бывшей Югославии проведена в 1958-1960 годы плотностью наблюдений 0.1 пункт/км². По результатам исследований составлены карты в масштабах 1:100 000, 1:200 000 и 1:500 000.

В конце 50-х годов выполнены площадные гравиметрические исследования, преимущественно регионального характера, средней плотностью наблюдений

порядка 2 пункта/км². На основе построенных гравиметрических карт (1:500 000) выделены наиболее крупные перспективные структуры: Кикинда, Кикинда-Варош, Мокрин (в последствие открытые одноименные месторождения). В 1979 году на всю территорию бывшей Югославии составлена карта аномалий Буге.

В этот же период внедряется сейсморазведка МОВ с аналоговой записью. Эффективность исследований иллюстрирует статистика, по данным которой, наибольшее число запасов выявлено в 1958-1968 гг. В таблице 2 приводится обзор открытых месторождений с указанием основного геофизического метода исследований, выборка данных сделана для юго-восточной части бассейна (Банатской депрессии) по материалам В. Аксина [143].

Таблица 2

Список ключевых открытий в период 1949 – 1964 гг.

№	Месторождение	Год	Метод открытия	Флюид	Возраст коллектора
1	2	3	4	5	6
1	Велика Греда	1949	Гравиразведка	Газ	Миоцен, PZ
2	Йерменовцы	1952	Гравиразведка	Нефть	Миоцен, PZ
3	Локве	1953	Гравиразведка	Нефть	Миоцен, PZ
4	Бока	1955	Сейсморазведка	Нефть	Миоцен
5	Меленции	1958	Гравиразведка, сейсморазведка	Газ	Понт, MZ
6	Элемир	1959	Сейсморазведка	Нефть	Миоцен, PZ
7	Мокрин	1961	Сейсморазведка	Газ, нефть	Понт, PZ
8	Кумане	1962	Сейсморазведка	Нефть	MZ
9	Кикинда- Варош	1963	Сейсморазведка	Нефть, газ	Понт, миоцен, PZ
10	Бегейцы	1963	Сейсморазведка	Газ	Понт
11	Сербобран	1963	Сейсморазведка	Газ	PZ
12	Палич	1963	Сейсморазведка	Газ	MZ
13	Велебит	1964	Сейсморазведка	Нефть	Миоцен, MZ

Цифровая сейсмическая запись внедряется с 1973 г. На основе проведенного контроля качества архивных материалов экспертами «Газпромнефть НТЦ» сделано заключение, что для переобработки и переинтерпретации можно использовать записи начиная с 1988 года. Плотность 2D профилей неравномерная, на перспективных площадях достигает 4 км/км^2 . По региону, например, в пределах Воеводины, основной нефтегазоносной провинции Сербии, плотность профилей составляет $0,78 \text{ км/км}^2$.

Сейсмические исследования в модификации МОГТ 3D на территории Сербии внедрялись с 1982 года. В 80-е годы выполнено 972 км^2 на месторождениях с самыми крупными запасами нефти и газа (Кикинда-Варош, Мокрин, Русанда, Банатски Двор (в настоящий момент ПХГ), Кикинда, Турия, Велебит). В целях доразведки в пределах месторождений Майдан и Острово отработано два малых куба (менее 50 км^2).

Среди крупномасштабных научных работ стоит отметить франко-русскую Программу «Тетис», посвященную изучению палеогеодинамики Альпийского пояса и сопряженной с ним системы морей. От предыдущих проектов «Тетис» отличался значительно большей территорией исследования – от Гибралтара до Памира и привлечением материалов из независимых источников, основные группы которых представляли собой кинематические, палеомагнитные и геологические данные [38]. По итогам этой Программы в 1984 г. издана серия из 10 палеогеодинамических схем реконструкций Тетиса от «Атлантики до Памира», выполненных для мезозоя и кайнозоя под редакцией Ж. Деркура и Л.П. Зоненшайна и опубликована серия фундаментальных статей в журнале «Tectonophysics» [157]. В продолжение научных обобщающих работ по изучению Альпийского пояса в 2009 году издана монография С.В. Попова с соавторами «Палеогеография и биогеография бассейнов Паратетиса. Часть I. Поздний эоцен - ранний миоцен» [100].

В 90-е годы геологоразведочные работы на большей части территории Югославии, Венгрии, Румынии были свернуты и возобновились с началом концессионной деятельности, с приходом западных и российских компаний.

Текущий этап предоставляет возможность всестороннего изучения территории сейсморазведкой в модификации МОГТ 3D. В 2016 году площадь покрытия составляла более 6 500 кв. км и компания ПАО «Газпром нефть» продолжает наращивать объемы сейсморазведочных исследований.

До начала 90-х годов геологоразведочные работы были направлены на открытие структурных и структурно-тектонических ловушек в неогеновом комплексе. Сейсмические исследования имели низкую разрешенность для детальной структурной интерпретации и качество, не позволяющее выполнять динамическую интерпретацию. Поэтому задачи по направленному изучению литологических и комбинированных ловушек не ставились. В настоящий момент, по результатам интерпретации сейсмических материалов МОГТ 3D, среди выявленных и подготовленных к опосредованному поиску объектов преобладают неантиклинальные ловушки.

На рисунке 2.1 показано расположение сейсмических съемок МОГТ 3D и лицензионных участков, материалы которых проанализированы автором при подготовке диссертации.

Параметры полевых исследований приняты на основе сложившейся практики первых 3D съемок, в геометрии каждой последующей съемки соблюдается преемственность. В качестве источника сейсмического сигнала применяется группа из трех 30-ти тонных вибраторов, расположение в группе – линейное, общая длина группы – 25 м. В пределах населенных пунктов работает 1 вибратор. Для регистрации сейсмических данных в настоящий момент используются единичные геофоны. Тип геометрии сейсмической расстановки – ортогональный, расстояние между линиями приема и линиями возбуждения составляет 200 (280) м, расстояние между пунктами приема и пунктами возбуждения - 40 м, размер бина 20 x 20 м. Длина записи – 5 с, шаг дискретизации – 2 мс. Максимальное удаление составляет от 3000 до 4500 м.

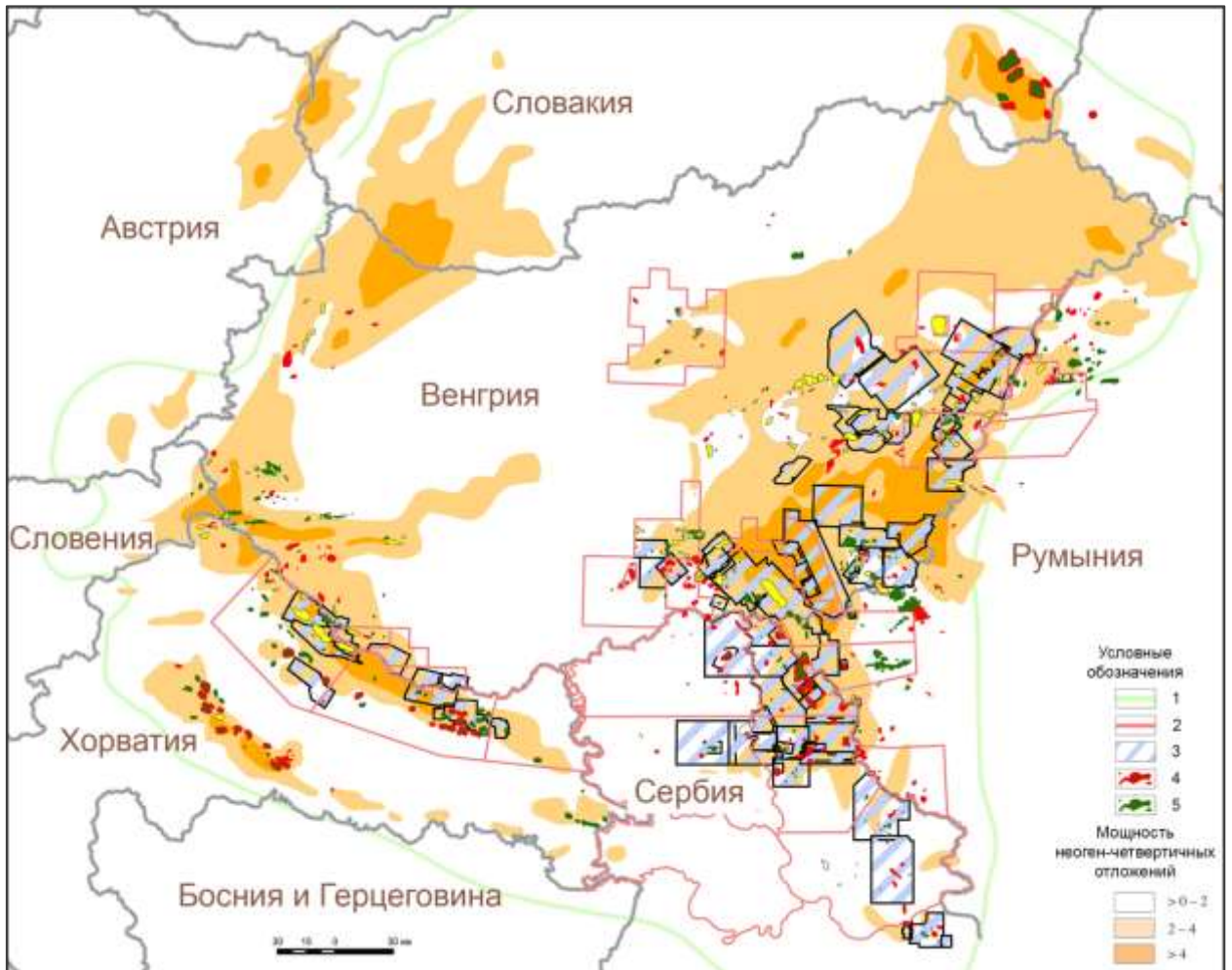


Рисунок 2.1 – Схема изученности региона сейсмическими исследованиями МОГТ 3D

Условные обозначения: 1 - граница бассейна; 2 - границы лицензионных участков; 3 - сейсмические съемки МОГТ 3D; 4 – месторождения газа; 5 – месторождения нефти

Особенностью проведения полевых работ на территории Сербии является высокая плотность населения и большое количество хозяйствующих субъектов. Этот фактор не позволяет достигать равномерной кратности. Средняя кратность варьируется от 100 до 120, области пониженной кратности (порядка 30), приурочены к населенным пунктам.

Традиционный, базовый граф обработки сейсмических данных 2D/3D, принятый в НТЦ НИС при выполнении проектов ГРП на лицензионных участках компании НИС приведен в таблице 3. Обработка осуществляется в программном комплексе Echos (Paradigm). Граф обработки постоянно модернизируется.

Таблица 3

Базовый граф обработки

ПРЕПРОЦЕССИНГ	
	<ul style="list-style-type: none"> 1.1 Ввод сейсмических данных. 1.2 Ввод SPS файлов, формирование базы данных проекта. 1.3 Проверка геометрии, бинирование. 1.4 Присвоение геометрии съемки в заголовки сейсмических трасс. 1.5 Интерактивный контроль геометрии и исправление ошибок. 1.6 Построение карт основных геометрических атрибутов съемки. 1.7 Просмотр и редактирование сейсмических трасс. 1.8 Автоматическое устранение амплитудных выбросов и редакции шумящих каналов. 1.9 Расчет статических поправок по преломленной волне. 1.10 Предварительная коррекция амплитуд за сферическое расхождение 1.11 Ввод статических поправок 1.12 Предварительный скоростной анализ 1.13 Ввод кинематических поправок, получение предварительного суммарного разреза
АНАЛИЗ СКОРОСТЕЙ СУММИРОВАНИЯ И КОРРЕКЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВOK	
	<ul style="list-style-type: none"> 2.1 Внешний мьютинг, 2.2 Автоматическая регулировка амплитуд (AGC) 2.3 Одноканальная деконволюция 2.4 Ослабление регулярных волн-помех 2.5 Полосовая фильтрация, параметры фильтра определяются в ходе обработки 2.6 Не менее двух итераций скоростного анализа и автоматической коррекции статических поправок 2.7 Ввод статических и кинематических поправок, контрольное суммирование по ОГТ
ОСНОВНОЙ ЭТАП ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С СОХРАНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
	<ul style="list-style-type: none"> 3.1 Ввод рассчитанных статических поправок 3.2 Ослабление регулярных волн-помех в области ОТВ 3.3 Приведение данных от виброисточника к минимально-фазовому виду 3.4 Первая итерация поверхностно-согласованной регулировки амплитуд

	<p>3.5 Поверхностно-согласованная минимально-фазовая деконволюция</p> <p>3.6 Вторая итерация поверхностно-согласованной регулировки амплитуд</p> <p>3.7 Подавление регулярных и не регулярных волн-помех в различных сортировках</p> <p>3.8 Третья итерация поверхностно-согласованной регулировки амплитуд</p> <p>3.9 Финальный детальный анализ скоростей ОГТ</p> <p>3.10 Ввод кинематических поправок с окончательным скоростным законом, мьютинг</p> <p>3.11 Коррекция остаточных фазовых сдвигов</p> <p>3.12 1-ый этап подавления кратных волн по сейсмограммам ОГТ по алгоритму Радона</p>
	ПОЛУЧЕНИЕ МИГРИРОВАННЫХ РАЗРЕЗОВ
	<p>4.1 Временная миграция после суммирования</p> <p>4.1.1 Временная миграция 3D после суммирования</p> <p>4.1.2 Удаление влияния системы наблюдения (подавление фут-принтов)</p> <p>4.1.3 Ослабление нерегулярных и случайных помех</p> <p>4.1.4 Нуль-фазовая деконволюции (балансировка спектра)</p>
	<p>4.2 Временная миграция 3D до суммирования по алгоритму Кирхгофа</p> <p>4.2.1 Регуляризация данных (5D-реконструкция волнового поля)</p> <p>4.2.2. Временная миграция 3D до суммирования по алгоритму Кирхгофа с учетом весовых амплитудных коэффициентов</p> <p>4.2.3 2-ой этап подавления кратных волн по сейсмограммам ОГТ по алгоритму Радона</p> <p>4.2.4 Коррекция скоростной модели (учет остаточных кинематических поправок)</p> <p>4.2.5 Окончательное накопление по ОСТ (суммирование)</p>
	ОБРАБОТКА МИГРИРОВАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
	<p>5.1 Удаление влияния системы наблюдения (подавление фут-принтов)</p> <p>5.2 Ослабление нерегулярных и случайных помех</p> <p>5.3 Нуль-фазовая деконволюции (балансировка спектра)</p>
	AVO-АНАЛИЗ
	<p>6.1 Расчет AVO-атрибутов</p> <p>6.2 Расчет частичных угловых сумм</p>

В 2014 г. протестирован и внедрен алгоритм расчета статических поправок по преломленным волнам. Полученные результаты работ подтвердили предположение, что сейсмические разрезы и кубы, полученные с использованием этой информации намного более информативны, чем разрезы полученные с полевой статикой (по результатам точечного и нерегулярного МПВ).

В 2014-2015 гг. организованы и выполнены научно-исследовательские проекты по изучению возможностей применения технологии миграционных преобразований до суммирования во временной и в глубинной областях. В настоящий момент технология временной миграции Кирхгофа до суммирования является стандартом и выполняется во всех сейсморазведочных проектах компании НИС а.д. Нови Сад.

В 2016 г. специалисты компании НТЦ НИС и «Газпромнефть НТЦ» выполнили комплексную научно-исследовательскую работу по изучению трещиноватости на сербском месторождении Турия. При обработке сейсмических данных тестировалась широко-азимутальная анизотропная глубинная миграция до суммирования Earth Study 360 [7, 39, 43, 71, 82, 84 104, 113, 138, 164, 165, 182, 183].

Структурная и динамическая интерпретация сейсмических данных осуществляется с использованием стандартных методик, сформированных в югославской геофизической школе. В процессе передачи опыта российской школы экспертами «Газпромнефть НТЦ» в технологический цикл внедрены объемные интерпретационные подходы, инверсионные преобразования, приемы сейсмогеологического анализа. Изученность территории бурением, более 10 000 поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, позволяет осуществлять комплексирование геолого-геофизических данных.

В период с 2014 по 2015 гг. в НТЦ НИС выполнен проект по созданию региональной модели Паннонского бассейна, инициированный ведущими экспертами компании ПАО «Газпром нефть».

Структурный каркас для региональной бассейновой модели создавался на основе комплексной интерпретации сейсмических и скважинных данных,

проиллюстрирован на рисунке 2.2 [33]. Фактическим материалом для регионального обобщения послужили данные по 3 251 скважинам (554 взяты за опорные); 81 582 пог.км сейсмических исследований МОГТ 2D и 15 697 км² сейсмических исследований МОГТ 3D. Площадь регионального обобщения охватывает 92 290 км², территории пяти государств (Сербия, Венгрия, Румыния, Хорватия, Босния и Герцеговина). Работа выполнялась командой специалистов НИС НТЦ с привлечением экспертов из «Газпромнефть НТЦ», включая автора диссертации, а также специалистов из Венгрии и Румынии.

В рамках проекта сформирована геолого-геофизическая база данных, выполнена единая стратиграфическая идентификация одновозрастных толщ по региону, построена серия структурных и литофациальных карт масштаба 1:200 000 – 1:500 000, осуществлено 1D, 2D, 3D моделирование углеводородных систем. На основании моделирования произведена оценка потенциала той части бассейна, которая вошла в проект. Полученные результаты в оценке перспектив региона представляют большое значение для определения дальнейшей стратегии компании в проведении геологоразведочных работ.

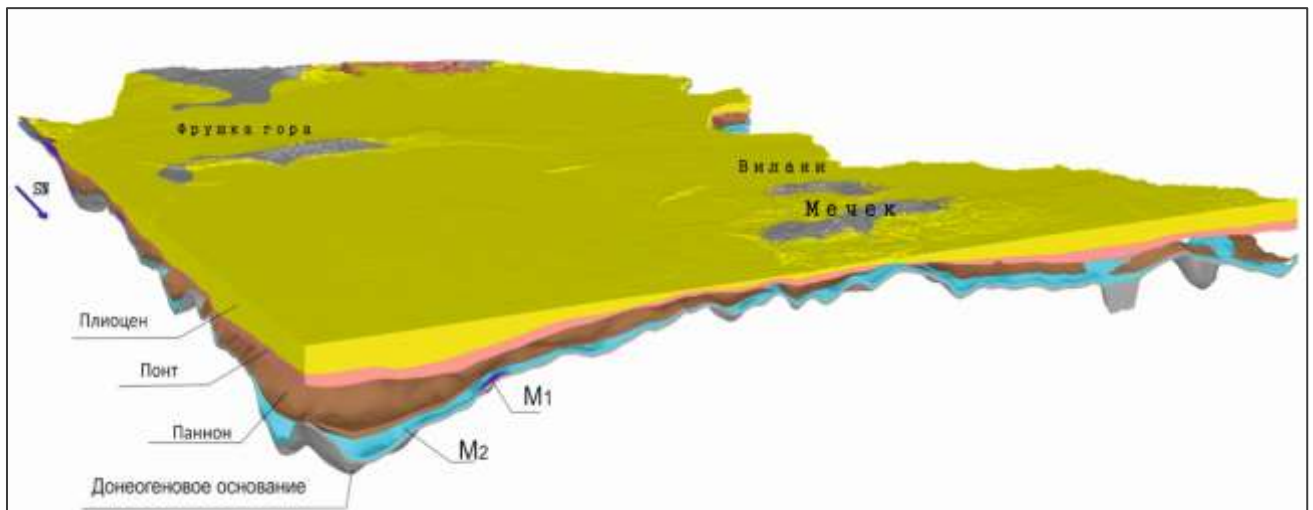


Рисунок 2.2 – Структурный каркас региональной модели Паннонского бассейна, построенный на основе интерпретации сейсмических данных [33]

2.2. Современные представления об эволюции Паннонского бассейна и особенностях его геологического строения

Паннонский бассейн (ПБ) расположен в восточной части Центральной Европы. Название бассейна дано по наименованию римской провинции Паннонии, существовавшей с I века на территории современных Венгрии, восточной Австрии, юго-западной Словакии, северной Словении, северной Хорватии, северо-восточной Сербии, северной Боснии и Герцеговины. Один из вариантов интерпретации названия происходит из языка иллироязычных племен, использующих протоиндоевропейский корень «*rep*» – влага, вода, сырость. ПБ имеет правильную овальную, почти изометричную форму. Его размеры ориентировочно составляют 450 x 520 км в малом варианте, и 600 x 500 км, если включать в периметр Венский и Трансильванский сегменты.

ПБ находится в окружении Альп, Карпат, Динарид. Карпаты имеют форму дуги, обращенной выпуклой частью к Восточно-Европейской платформе и делятся на три сегмента: Западные Карпаты, Восточные и Южные. Обзорная карта представлена на рисунке 2.3. Для Карпатской дуги характерна еще и поперечная зональность. В направлении от Восточно-Европейской платформы выделяются: зона передовых прогибов; флишевый пояс Внешних Карпат; зоны развития миоценового вулканизма; внутренний пояс Альп, Карпат и Динарид [18, 145, 163, 166].

Зона передовых прогибов (Предкарпатский прогиб) и Внешние Карпаты образуют непрерывную дугу. Предкарпатский прогиб выполнен толщей неогеновых отложений мощностью от 2.0 до 8-10 км. Фациальный состав отложений носит изменчивый характер: во внутренних частях прогиба развиты конгломераты, которые по направлению к платформе замещаются более тонко и мелкозернистыми отложениями. Структура Внешних Карпат представляет собой сочетание складок и покровов, пояс достигает в длину до 1200 км, в ширину до 100 км.

Внутренние Карпаты состоят из отдельных блоков, характер взаимосвязи между которыми остается дискуссионным (например, горы Апусени и Южные Карпаты) [71]. Приподнятый блок Апусени отделяет Трансильванский суббассейн от Паннонского бассейна.

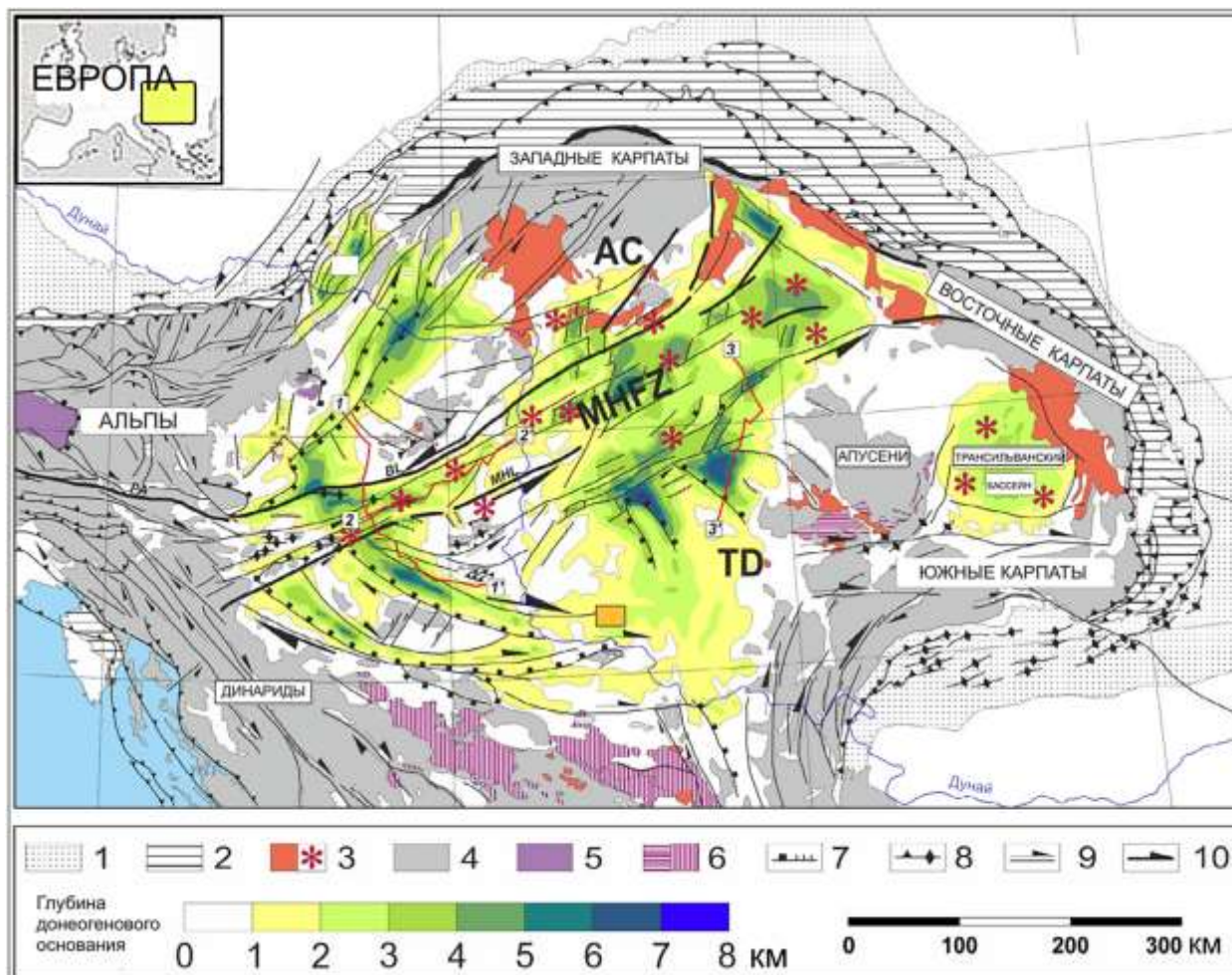


Рисунок 2.3 – Обзорная карта Паннонского бассейна (Horváth et al. 2015, модифицированная Horváth et al. 2006) [170]

Условные обозначения: AC – микроплита ALKAPA, MHFZ – Средне-Венгерская региональная зона разломов; TD – микроплиты Тиссия-Дакия; 1 - зона передовых прогибов; 2 - флишевый пояс; 3 - зоны развития миоценового вулканизма и примерное расположение центров извержения; 4 - внутренний пояс Альп, Карпат и Динарид; 5 – зона покровов в Альпах; 6 – офиолитовый пояс; 7 - взбросы и сбросы; 8 - надвиги; 9 - сдвиги; 10 – региональные разломы

Внутреннее строение Паннонского бассейна частично отображается в современном рельефе: расположение низменностей в пределах дневной

поверхности коррелируется с наиболее погруженными блоками основания и увеличенными мощностями толщи неогеновых отложений.

Расположение Паннонского бассейна между Карпатской и Динаридской ветвями альпийского пояса, характер залегания неогеновых отложений позволили австрийскому геологу Л.Коберу обосновать идею наличия «жесткой глыбы» в основании Паннонской впадины и ввести понятие «Паннонский срединный массив». Специалисты придерживались этой концепции до начала 70-х годов [72].

Современные представления о формировании Паннонского бассейна и окружающих его горных массивов базируются на концепции тектоники плит [46, 50, 160, 170, 175, 176, 180, 224]. В рамках этой концепции геологическая история региона связана с коллизией Афро-Апулийско-Аравийского континента с Евразией. Предполагается, что в пределах южной окраины Евразийского континента в раннем палеогене существовали окраинные моря океана Тетис: Альпийско-Карпатское и Кавказско-Копетдагское. В конце эоцена в результате коллизии образовался сплошной массив суши, отделивший их от бассейнов древнего Средиземноморья, Месопотамии, Индийского океана.

К началу олигоцена Альпийско-Карпатский и Кавказско-Копетдагский бассейны превратились в систему внутриконтинентальных водоемов, получившей название Паратетис (Laskarev, 1924), с непостоянным режимом солености и кислородного обмена. В начальном цикле развития этой системы (ранний олигоцен – начало позднего олигоцена) существовала достаточно устойчивая связь с океаном. В конце раннего олигоцена произошла первая кратковременная изоляция, сопровождающаяся значительным опреснением. С течением времени сообщение между Паратетисом и океаном становилось все более затрудненным, и, предположительно, происходило по сложной системе узких проливов [140]. С формированием изоляции началось своеобразное развитие региона, которое отразилось в особенностях осадконакопления и в значительном обеднении фауны.

Подробно палеогеография и биогеография бассейнов Паратетиса в период с позднего эоцена до раннего миоцена включительно изложена в работе С.В. Попова, М.А. Ахметьева и др. [100]. На рисунке 2.4 представлена палинспастическая палеогеографическая карта Западной Евразии в приабоне (составлена С.В.Поповым и И.Г.Щерба) [100].

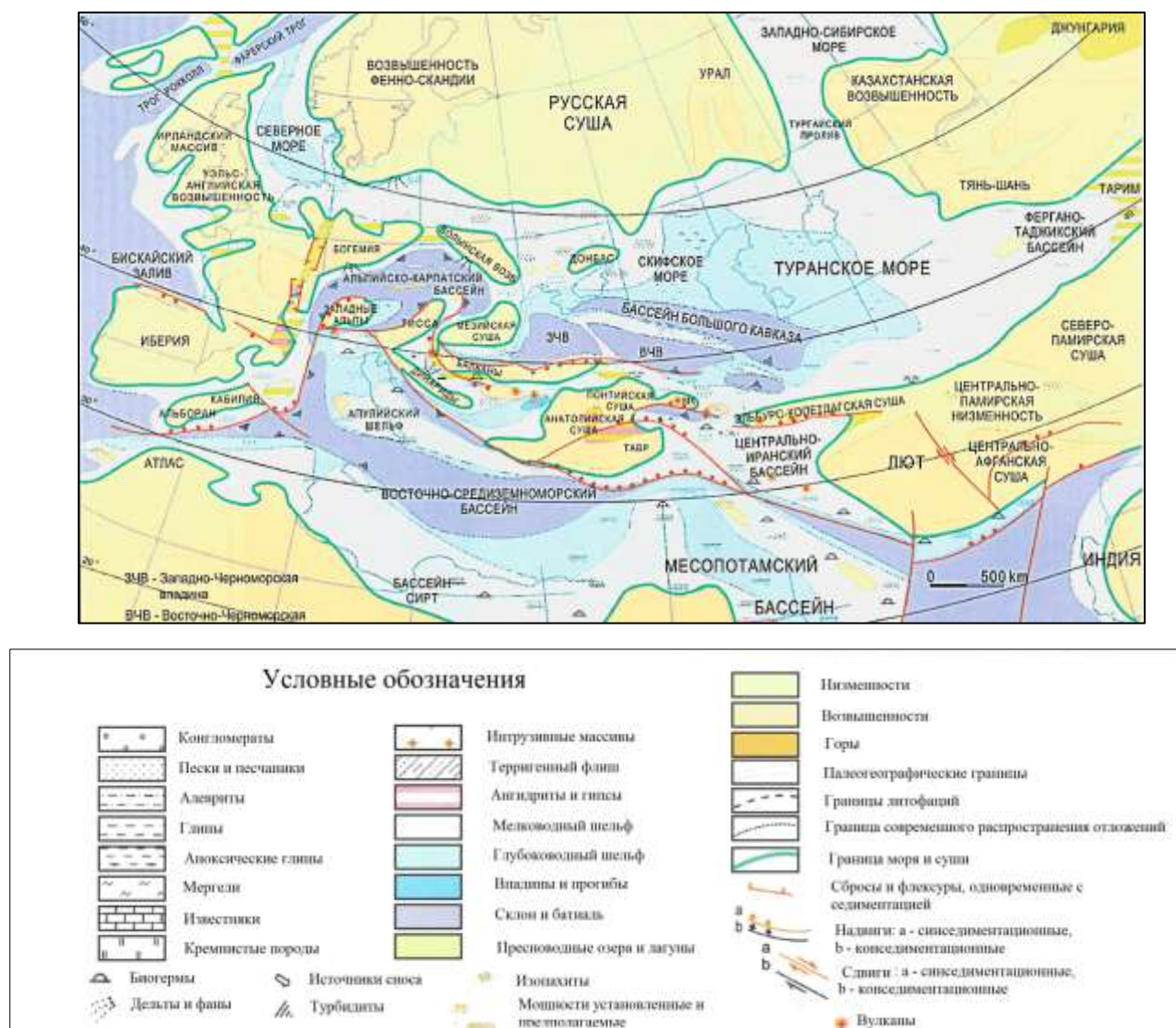


Рисунок 2.4 - Палинспастическая палеогеографическая карта Западной Евразии в приабоне (составлена С.В.Поповым и И.Г.Щерба) [100]

К началу миоцена Паратетис разделился на Западную и Восточную части. Восточная часть, именуемая Эвксино-Каспийской, более чем в два раза превосходила Западную, Паннонскую часть. Существует мнение, что

дифференциация Паратетиса на Западный и Восточный была не явно выраженной до среднего миоцена [68].

Паннонская часть представляла собой узкий пролив, простиравшийся от Венского до Штирийского бассейнов в Закарпатье, с расширением в Трансильвании и ответвлением в Предкарпатский залив. Молдавский пролив связывал Западный Паратетис с Восточным. Сложная история взаимоотношений отдельных частей Паратетиса, их периодическая изоляция с последующим восстановлением сообщения между собой предопределили условия осадконакопления и сложности в стратификации одновозрастных толщ [129, 130].

На рисунке 2.5 представлена палинспастическая палеогеографическая карта Западной Евразии в раннем миоцене (составлена С.В.Поповым и И.Г.Щерба) [100].

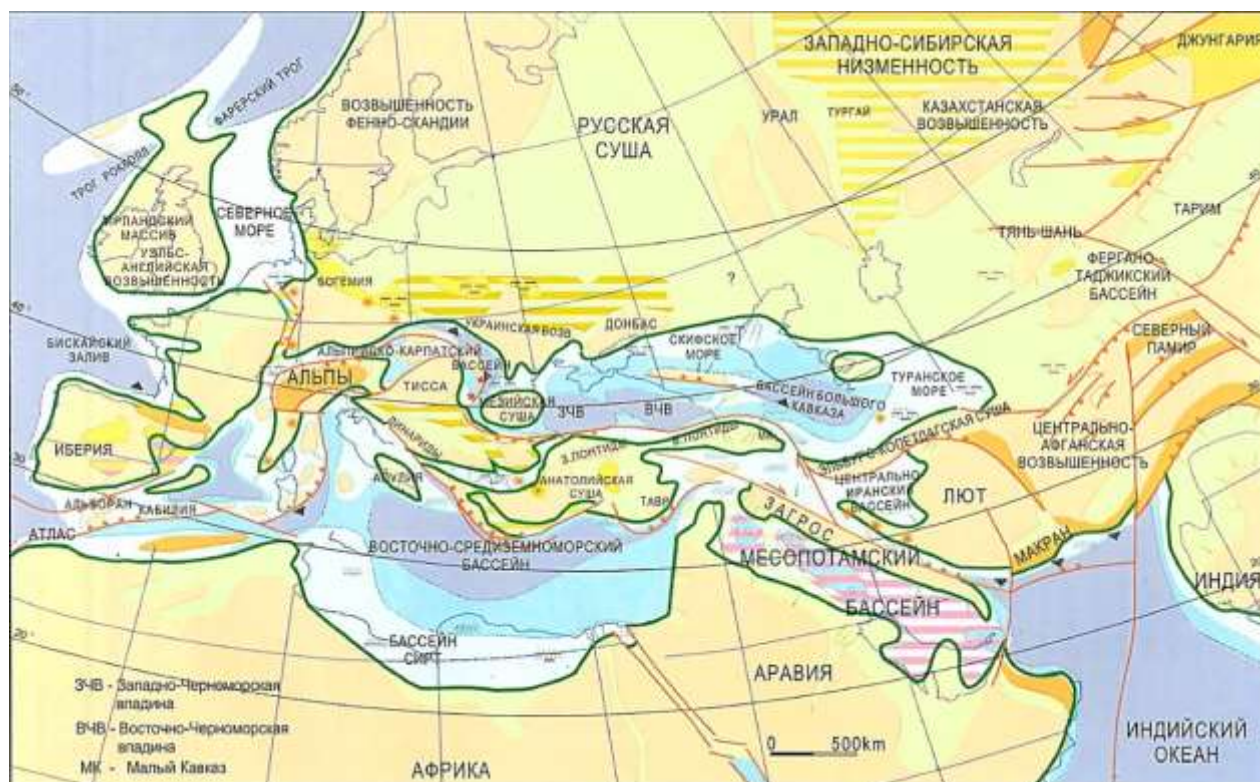


Рисунок 2.5 - Палинспастическая палеогеографическая карта Западной Евразии в раннем миоцене (составлена С.В.Поповым и И.Г.Щерба) [100]

Условные обозначения к рисунку 2.4

Полная изоляция Паннонского бассейна датируется концом сарматского времени [68]. Образовавшееся Паннонское море-озеро, глубиной около 1000 м, опреснялось впадающими в него реками, которые приносили огромное количество терригенного материала. В этих условиях формировались клиноформные толщи бокового наращивания. В конце понта - начале плиоцена в регионе отмечаются активные тектонические подвижки. Прогрессивно сокращавшееся в размерах Паннонское озеро окончательно перестало существовать на рубеже плейстоцена и голоцена. Схема процесса отображена на рисунке 2.6.

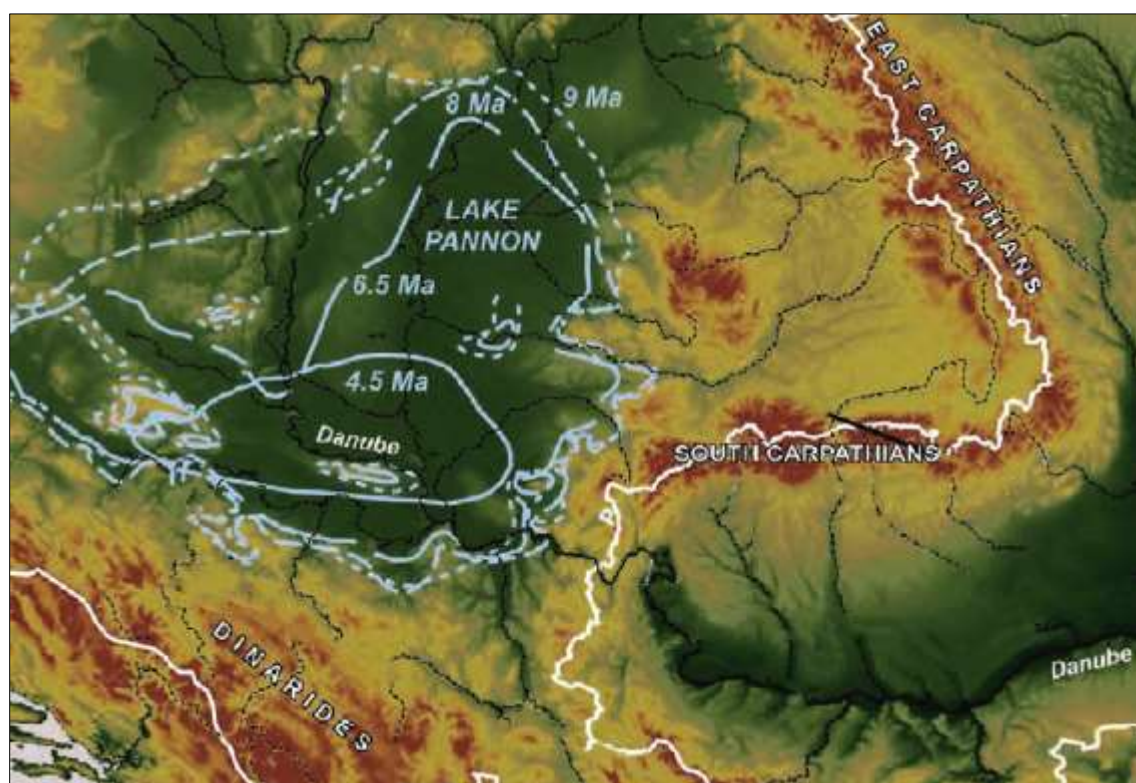


Рисунок 2.6 - Схема трансформации границ Паннонского озера [175]

Корреляция неогеновых отложений в пределах отдельных частей Паратетиса всегда представляла для исследователей актуальную задачу. Наибольший интерес вызывают события позднемиоценового – раннеплиоценового времени, отождествляемые с мессинским кризисом солёности. Это событие специалисты связывают с глобальными изменениями

климата и палеогеографических обстановок на обширных территориях, в первую очередь Средиземноморья.

По современным представлениям о структурно-тектоническом строении региона в основании Паннонского бассейна находится сложный набор блоков, сгруппированных в три микроплиты: ALCAPA – на севере, Тисса-Дакийская - в центральной части и на востоке, Ядранская - на юге (Balla, 1984, Csontos et al, 1992). Существует значительная неопределенность в том, что касается геометрии блоков, последовательности событий в их перемещении, характере этого перемещения и т.д. [46].

По данным современных палеомагнитных исследований микроплиты в процессе самоорганизации испытывали ротационные движения. Микроплита ALCAPA в течении отнангского времени повернулась на 40-50 градусов против часовой стрелки, в начале бадена еще на 30-40 градусов. Плита Тиссия-Дакия повернулась суммарно на 70 градусов по часовой стрелке [46].

Плиты разделены Средневенгерской разломной зоной, предположительно сформированной в верхнеолигоценное-раннемиоценовое время (Schmid et al., 2008).

Паннонский бассейн на начальном этапе своего формирования представлял собой бассейн задугового типа (Dolton, 2006) [5, 60]. В истории его развития специалисты выделяют две фазы: синрифтовую и пострифтовую. Исследователи сходятся во мнении, что рифтогенез протекал по асимметричной схеме Б.Вернике, с образованием полуграбенов, ограниченных листрическими сбросами. Основной срыв достигал границы верхней и нижней коры, местами границы Мохо [8, 28, 29, 57, 122]. Рифтовая стадия продлилась до среднего миоцена включительно. Существует предположение, что завершение рифтовой стадии не имеет единой временной границы, так как по последним сейсмическим исследованиям, в восточной части бассейна процессы рифтогенеза продолжались вплоть до позднего миоцена [170].

На границе сарматского и паннонского времени (средний - верхний миоцен) в пределах Паннонского бассейна произошла резкая смена известково-

щелочного магматизма на щелочно-базальтовый [65, 72]. Результаты исследований петрохимических типов вулканизма приводятся как доказательство того, что начиная с рубежа 11.0 - 10.5 млн лет превалировали условия растяжения литосферы. Существует предположение с позиций плюмтектоники, что в этот момент началось движение к поверхности мантийного диапира, диапазон перемещения которого оценивается с глубины 90-120 км до глубин 55 – 65 км [72]. Моделью мантийного диапира объясняются уникальные особенности бассейна: активный тектонический режим, утонение земной коры до 23-26 км, аномальные значения теплового потока [51, 132, 135]. На рисунке 2.7 приводится схема толщин литосферы, на рисунке 2.8 – карта теплового потока.

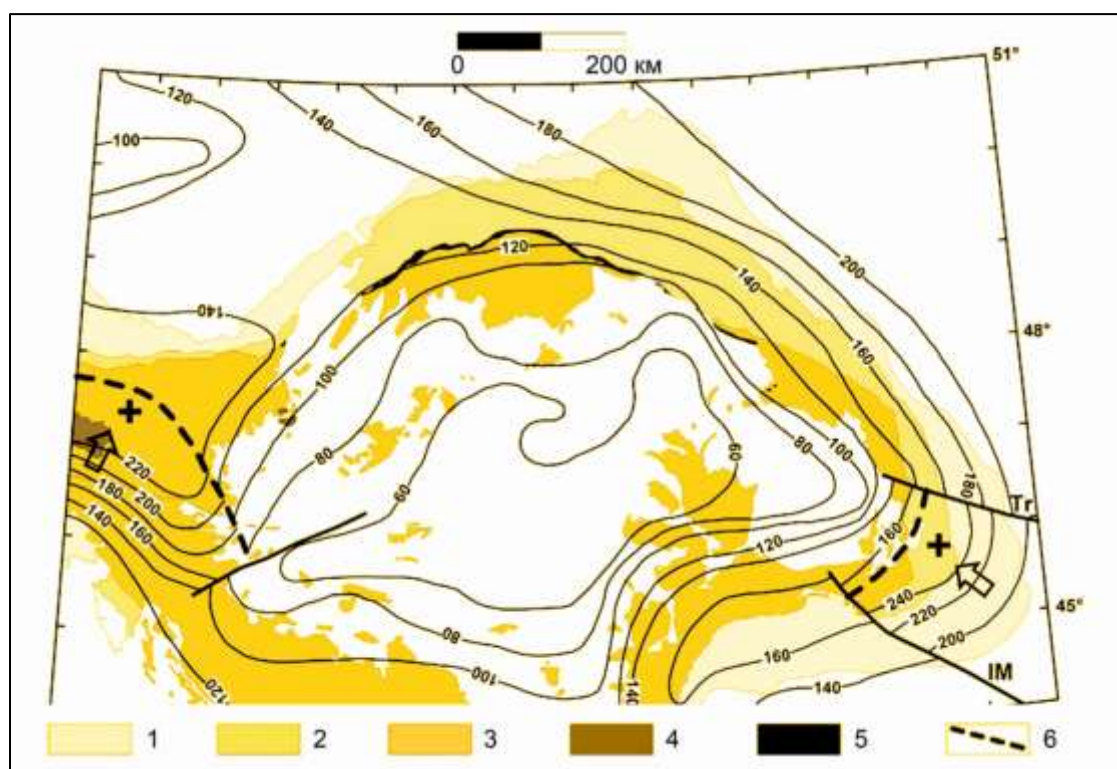


Рисунок 2.7 - Схема толщин литосферы в Паннонском бассейне

Условные обозначения: 1 - зона передовых прогибов; 2 - флишевый пояс; 3 - выходы на поверхность донеогенового основания; 4 – Пеннинские покровы; 5 – Пеннинские покровы; 6 – линии резкого изменения толщин Modified after Horvarth (1993) and Ardarm & Wesztergom (2001)

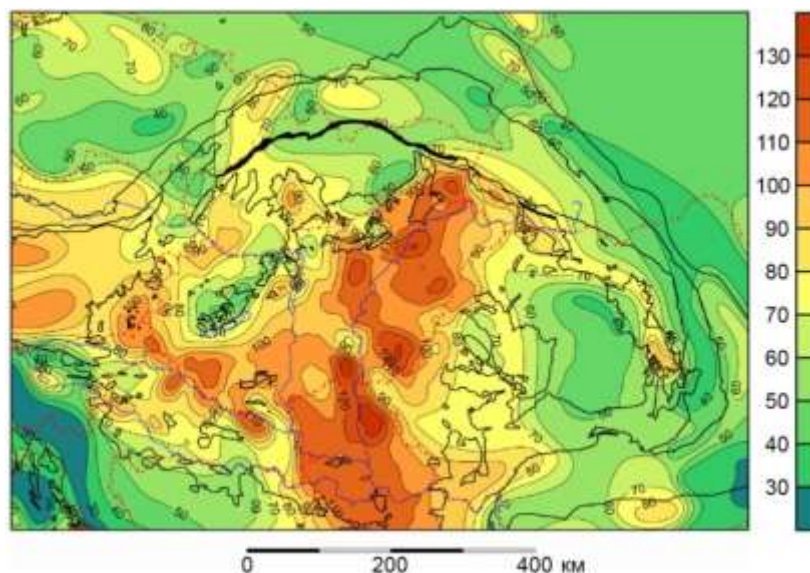


Рисунок 2.8 - Карта теплового потока Паннонского бассейна и прилегающих районов (значения теплового потока в MWt/m^2) [187]

По данным Л.Ленкеи температуры в Паннонской впадине достигают 200 градусов на глубине 5 км, среднее значение теплового потока составляет 101 ± 6 MWt/m^2 , локальные максимумы достигают 130 – 140 MWt/m^2 [187]. Зона аномально повышенного теплового потока имеет северо-восточное простирание и протягивается в Закарпатскую впадину.

Паннонский бассейн характеризуется относительно пониженной сейсмичностью. Предполагается, что разогретая литосфера имеет повышенную вязкость и это обуславливает релаксацию в ней упругих напряжений [187].

В работе М.Д.Хуторского и Б.Г.Поляк приводятся результаты 2D моделирования глубинных температур и теплового потока по редкой сети сейсмических профилей [135]. Трехмерная модель, построенная на основе интерполяции 2D данных, позволила определить зону утонения литосферы под Паннонским бассейном. По данным моделирования прогнозируемый выступ субсолидусных температур простирается в северо-восточном направлении. Ф.Хорват в своих работах называет Паннонский бассейн «горячим пятном Европы» [132]. Термальная активизация на относительно спокойном фоне Центральной Европы проявляется не только в высоком тепловом потоке, но и в большом количестве термальных источников.

На современном этапе в пределах Паннонского бассейна земная поверхность испытывает слабо дифференцированное опускание [120]. Максимальные скорости зафиксированы на границе Венгрии и Сербии. Наиболее дифференцированные движения характерны для зоны горстов и грабенов в пределах Сербии.

В структурно-тектоническом строении Паннонского бассейна существует доминирующее северо-восточное, так называемое «Балатонское направление». Две основные микроплиты, выделяемые в его основании, ALCAPA и Тисса-Дакийская микроплита, имеют формы вытянутые в северо-восточном направлении, с приблизительным соотношением длины к ширине: 2 к 1. Соответственно, этого же направления придерживается Средневенгерская разломная зона, возникшая на границах микроплит. Северо-восточное простирание имеет зона аномально повышенного теплового потока, протягиваясь в Закарпатскую впадину. С тепловым потоком коррелируются параметры глубин залегания поверхности Мохо, проиллюстрированные на рисунке 2.9 и наиболее активные неотектонические зоны.

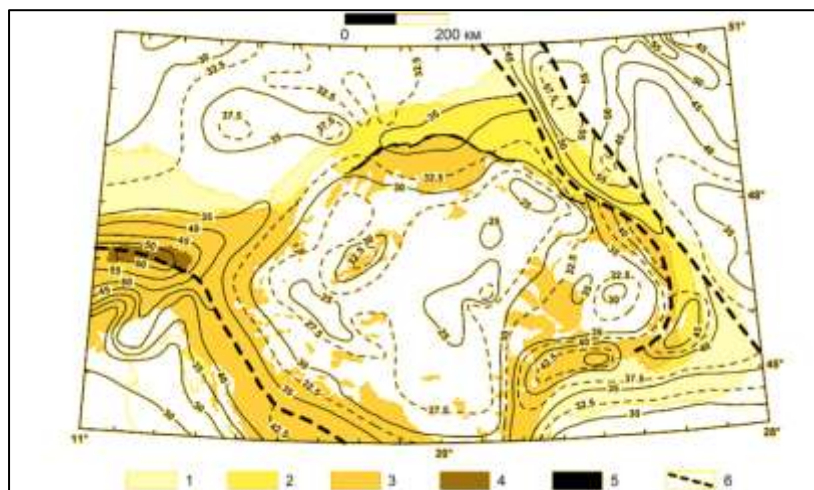


Рисунок 2.9 – Схема глубин поверхности Мохо в Паннонском бассейне

Условные обозначения: 1 - зона передовых прогибов; 2 - флишевый пояс; 3 - выходы на поверхность донеогенового основания; 4 – Пеннинские покровы; 5 – Пеннинские покровы; 6 – линии резкого изменения толщин Modified after Horvarth (1993), Lenkey (1999), Cassinis & Scarascia (2003), and Szafian & Horvarth (2006)

По данным открытых источников геолого-геофизической информации (<http://gis-lab.info/qa/geology-geophysics-open-data-sources.html>) на планетарном уровне основные напряжения в Европейской части имеют северо-восточное направление. Проведение многолетних замеров методами космической геодезии позволило выявить наличие устойчивых тенденций перемещения пунктов опорной сети, порядка нескольких миллиметров в год. Вне зависимости, от базовых концепций интерпретации подобных фактов, необходимо признать, что определенные закономерности в современном движении отдельных участков земной коры существуют.

Результаты анализа напряженного состояния на глобальном и региональном уровне хорошо коррелируются друг с другом. На рисунке 2.10 приводится карта направлений стрессов по Средиземноморью и Центральной Европе. Источником этой карты является ресурс <http://www.world-stress-map.org/data/>, на котором формируется «Мировая карта напряжений» (The World Stress Map (WSM)) на базе информации по точечным источникам, включая скважинные измерения.

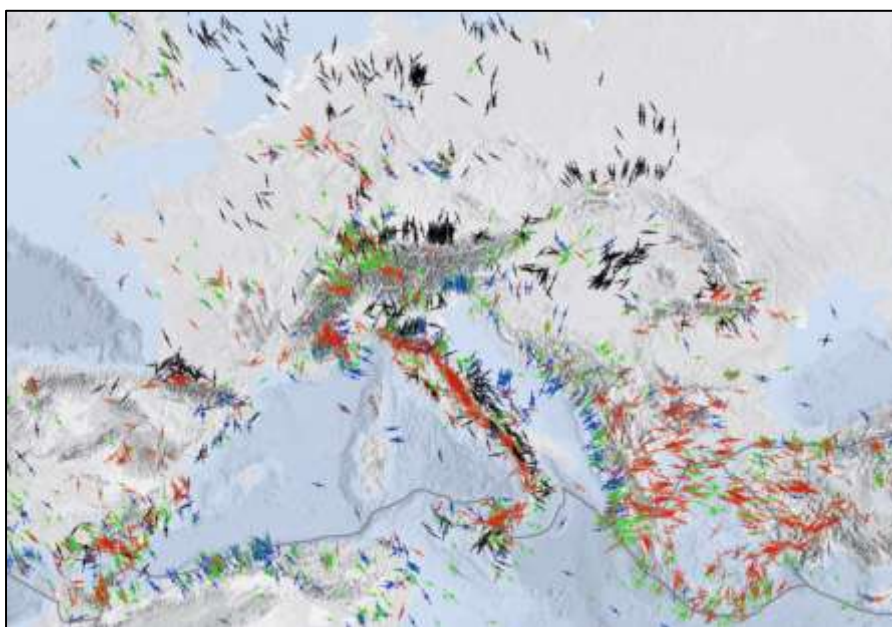


Рисунок 2.10 - Карта направлений стрессов по Средиземноморью и Центральной Европе

Условные обозначения: штрихи красного цвета – вертикальные разломы, зеленого – сдвиговые зоны, синего – надвиги, черного – не определен характер напряжений

[Источник: <http://www.world-stress-map.org/>]

В пределах Паннонского бассейна диагностируется современный стресс северо-восточного направления. Несмотря на то, что черный цвет указывает на неопределенный характер напряжения, большинство исследователей считают, что доминируют сдвиговые дислокации (Gerner et al., 1999, Bada et al., 2007) [146].

На северо-восточное направление современного горизонтального сжатия в южной части Паннонского бассейна указывали в своих работах Grenerczy et al., 2005, Bennett et al., 2008; в его центральной части - Bada et al., 1999; в северо-восточном сегменте Карпат - Jarosinski, 2005, Jarosinski et al., 2006.

В 2008 – 2013 гг. международным коллективом ученых были выполнены исследования методом ГСЗ вдоль профиля PANCAKE, пересекающего Паннонский бассейн (восточный мыс микроплиты ALKAPA, Средневенгерскую шовную зону), Украинские Карпаты (УК), Трансевропейскую шовную зону, прилегающую часть Восточно-Европейского кратона [20]. В результате интерпретации материалов тектонофизических наблюдений структурно-парагенетическим и кинематическим методами были получены стереограммы палеонапряжений. Распределение палеонапряжений в пределах основных структурных этажей производилось посредством изучения взаимоотношения разломов и отдельных минералого-петрографических признаков. Из 142 определений ориентации главных осей нормальных напряжений 19 определены как взбросовые, 16 – сбросовые, остальные – сдвиговые (в том числе взбросово и сбросово-сдвиговые).

Авторы исследования пришли к следующим выводам.

– Формирование украинского сектора Внешних Карпат определяется силовым воздействием микроплит ALKAPA и Тиссия-Дакия, движимых на северо-восток Адриатической плитой, а также юго-восточной – северо-западной ориентацией основных систем разломов глубокого заложения и элементов рельефа докембрийского основания. Этими факторами определяется и юго-западная – северо-восточная ориентация главных осей напряжений растяжения при формировании локальных бассейнов и сжатия при надвигообразовании.

– Тектонофизическими методами установлено существование напряженно-деформированного состояние юго-западно - северо-восточного сжатия-растяжения с верхнего мела.

– Деформация отложений альпийского структурного этажа УК начиналась с образования планетарной трещиноватости под воздействием эндокинетических и ротационных сил. Одновременно формировалась трещиноватость, отражающая остаточные силы растяжения при образовании осадочного бассейна, как правило, ориентированные в направлении юго-запад - северо-восток. Сдвиговые деформации в Карпатах, происходили по уже заложенным региональным зонам юго-западного - северо-восточного направления, создавая режим сжатия.

Изученные в районе профиля поля напряжений отражают деформации горных пород, сформировавшихся в позднем мелу – раннем неогене (от 100 до 10 млн лет тому назад). Стабильная ориентация субгоризонтальных осей в юго-западном – северо-восточном и меридиональном и широтном направлениях свидетельствует о том, что в этот период вплоть до настоящего времени, формирование альпийского структурного этажа в Карпатах происходило при поступательном перемещении покровов в одном направлении с юго-запада на северо-восток.

Анализ линеаментов в пределах Европы подтверждает общие представления о существовании планетарной регматической решетки с едиными для всех континентов Земли тектоническими направлениями: субширотным, субмеридиональным, СВ – диагональным и СЗ – диагональным. Тем не менее, по полученным диаграммам можно отметить преимущественное развитие субмеридионального и диагональных направлений [25, 26, 42, 56, 142].

Еще одним источником, демонстрирующим особенности напряженного состояния региона, является работа, посвященная неотектоническим движениям. Фрагмент региональной карты неотектонических дислокаций приводится на рисунке 2.11. Для реконструкции современного стресса и тектонических режимов были использованы геоморфологические, геологические,

геофизические, геодезические данные, данные о сейсмической активности в регионе.

Основное внимание в диссертации сфокусировано на юго-восточной части бассейна, которая представляет собой зону повышенных толщин неогеновых отложений. В региональном структурно-тектоническом отношении она соответствует Банатскому грабену. В пределах Сербии территория, включенная в эту обширную региональную систему грабенообразных прогибов, оценивается в 6500 км², с венгерским и румынским сегментами – 15 000 км² [46].

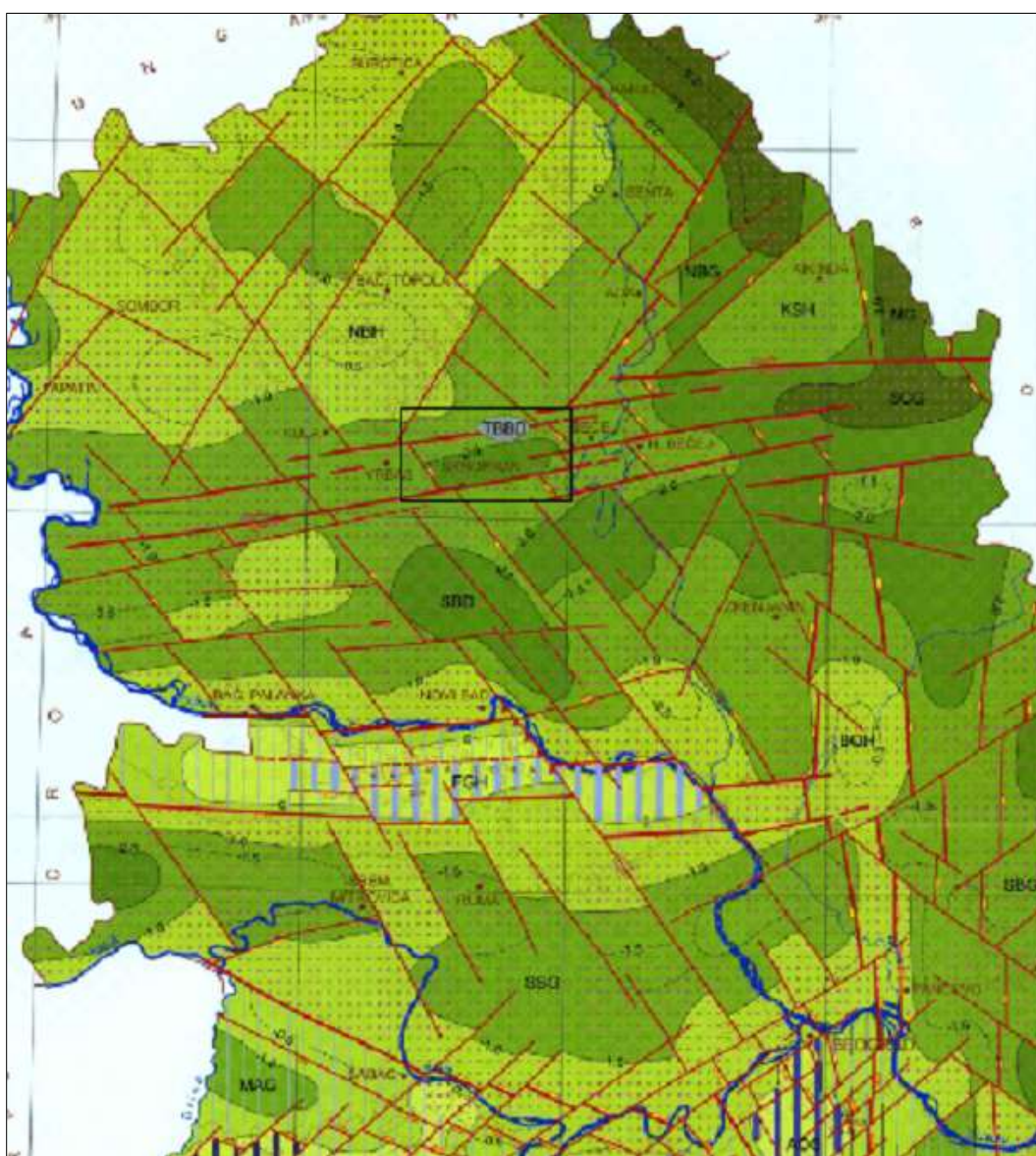


Рисунок 2.11 - Фрагмент региональной карты неотектонических дислокаций масштаба 1: 500 000 [195]

По результатам последнего регионального обобщения, выполненного в 2015 г., в пределах Банатского грабена выделено 11 депрессий. Расположение закартированных депрессий демонстрируется на рисунке 2.12. Каждая из локальных депрессий представляет собой отдельную углеводородную систему. Аналитически установлена прямая зависимость между глубиной депрессии, её размерами и объёмом запасов. Например, в бортовой части самой глубокой депрессии – Мако Трог (более 7 км неогеновых отложений) находится месторождение Algyö, которое в совокупности с месторождениями Nagylengyel (Венгрия) и Suplacu de Barcau (Румыния) вмещает более четверти запасов нефти по бассейну.

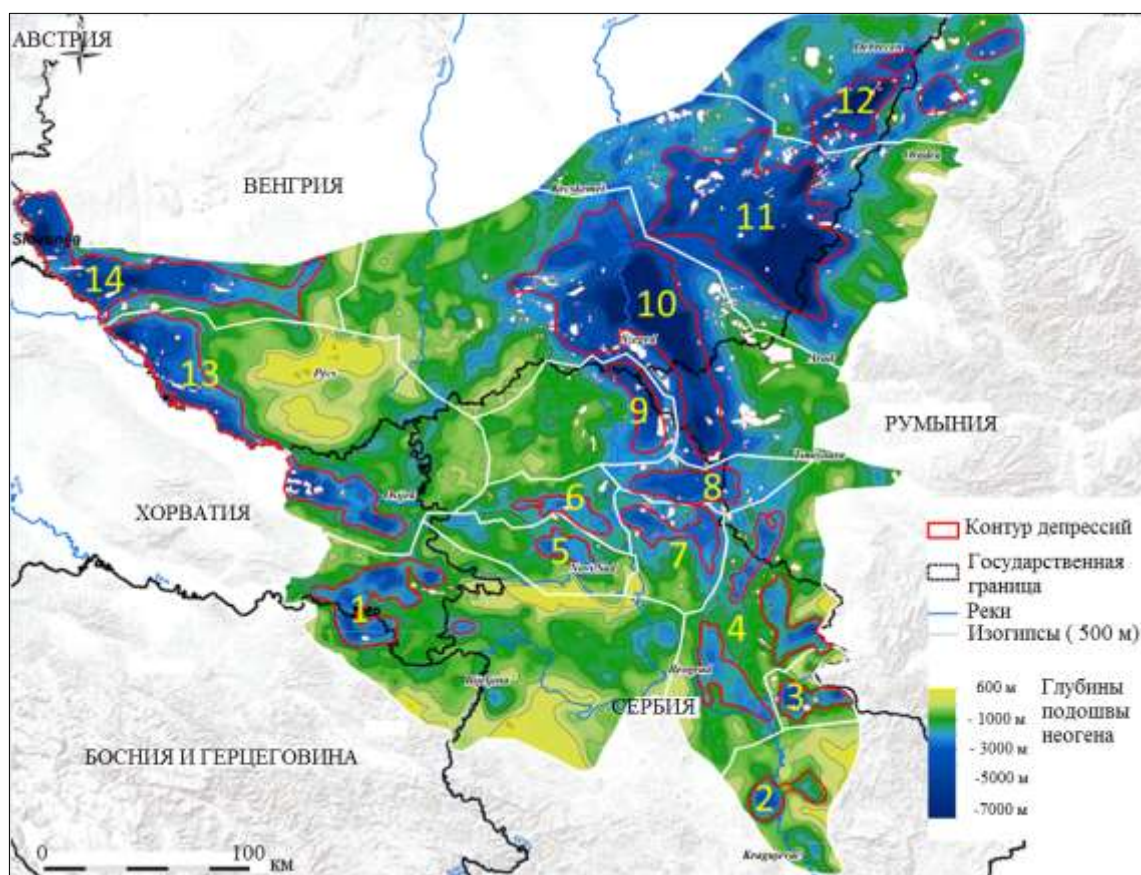


Рисунок 2.12 - Депрессии, закартированные в пределах Банатского грабена

Условные обозначения: 2 – Марковачка, 3 – Дремлянска, 4 - Южнобанатская депрессия (Панчевачка, Загайичка, Смедеревка), 5 – Кисачка; 6 – Сербобранска, 7 -Меленачка; 8 – Среднебанатская; 9 – Сегединская, 10 – Мако, 11 – Бекеш, 12 – Деречка (по материалам производственного отчета). За пределами: 1 – Славонско-Посавинска-Сремска депрессия, 13 – Дравска депрессия, 14 – Зала – Сомочи депрессия. Источник: производственный отчет НТЦ НИС

В таблице 4, в подтверждении выявленных закономерностей, приводятся мощность неогеновых отложений по каждой из депрессий и количество открытых месторождений.

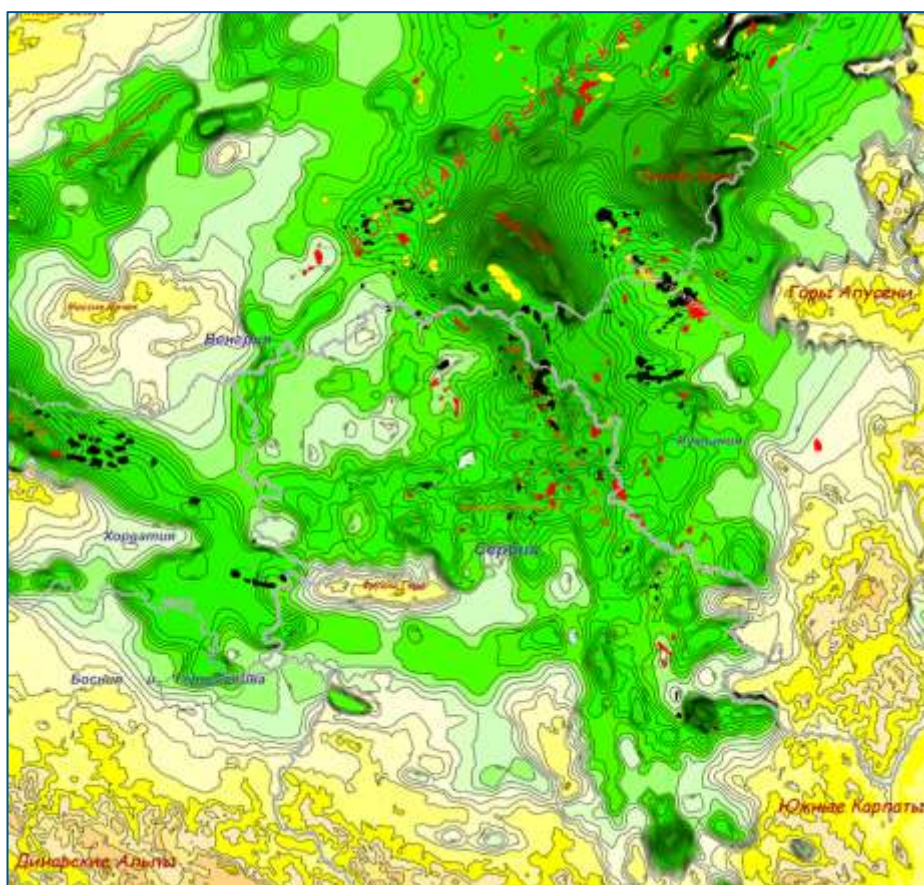
Таблица 4

Депрессии Банатского грабена

№	Наименование	Мощность неогеновых отложений (в метрах)	Количество открытых месторождений нефти и газа
1	2	3	4
1	Марковачка	До 3200	Открытий нет
2	Дремлянска	До 3500	7
3	Южнобанатская депрессия (Панчевачка, Загайичка, Смедеревка)	До 3100	21
4	Кисачка	До 2 850	3
5	Србобранска	До 2500	3
6	Меленачка	До 3050	16
7	Среднебанатская	До 3250	14
8	Сегединская	Около 5000	25
9	Мако	Около 7000	127
10	Бекеш	Около 6800	129
11	Деречка	Около 6700	86

ГЛАВА 3. НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ

В нефтегазоносном отношении территория исследований приурочена к Банатской зоне нефтегазонакопления Паннонского НГБ (по районированию И.В. Высоцкого, 1990 г.); согласно районированию USGS (U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000) – к южной части НГБ, Большой Венгерской равнине [16, 207]. Площадное распространение месторождений УВ показано на рисунке 3.1.



Условные обозначения:

— 7800 — изогипсы по кровле мезозойско-палеозойского консолидированного складчатого фундамента (подложке неогеновых отложений)

— государственные границы

Месторождения углеводородов:

- газовые
- газоконденсатные
- нефтегазовые
- нефтяные

Рисунок 3.1 – Площадное распространение месторождений УВ

Первый исторический обзор изучения нефтегазоносности ПБ, как и первые систематизированные сведения об его эволюции подробно изложены в монографии русского ученого, профессора В. Аксина, работавшего долгие годы в Белградском университете [143]. Региональные углеводородные системы детально описаны в докторской диссертации профессора А. Костица (2000), в аналитической работе компании USGS (2006), и многочисленных статьях авторов, занимающихся изучением этого вопроса [46, 207].

Банатская депрессия является самым перспективным геологоразведочным районом Сербии, Венгрии и Румынии. В ее сербском сегменте находятся наиболее значимые месторождения нефти: Велебит, Кикинда, Кикинда-Варош, Мокрин, Элемир, Турия-север. Первые три месторождения обеспечивают одну треть годовой добычи нефти Сербии, 14% приходится на месторождение Турия-север. По газу, треть годового производства обеспечивает месторождение Мокрин, большой вклад вносят месторождения Српска Црня, Итебей и Србобран [177].

В венгерском сегменте, в бортовой части самой глубокой депрессии ПБ - Мако Трог находится месторождение Algyő, которое в совокупности с месторождениями Nagylengyel (Венгрия) и Suplacu de Barcau (Румыния) вмещает более четверти запасов нефти по бассейну. Приблизительно одна треть запасов газа сконцентрирована в двух месторождениях, одно из которых Algyő.

Каждая из локальных депрессий представляет собой отдельную углеводородную систему.

Основными нефтематеринскими породами являются отложения баденского и сарматского ярусов среднего миоцена и паннонского яруса верхнего миоцена. На рисунке 3.2 приводится обобщенная характеристика УВ системы. Нефтематеринские толщи (НМТ) представлены глинами и мергелями, содержат преимущественно кероген III типа, местами II типа. Обогащенные органическим веществом отложения плиоценового возраста относятся к второстепенным НМТ, распространены локально, и генерируют биогенный газ в незначительных количествах. Подтверждено наличие нефтематеринских пород в палеогене

(регионы южный и средний Банат). Условно материнские породы выделяют в меловом периоде (регионы средний Банат и южная Бачка). В основании Карпато-Балканид, Динарид, Сербии, Боснии и Герцеговины доказано существование нефтематеринских пород триасового и юрского возрастов. В 2017 году в НТЦ НИС стартовал научно-исследовательский проект, основная идея которого, заключается в оценке нефтематеринского потенциала пород палеозойского и мезозойского возрастов с учетом влияния региональных геодинамических событий на генерацию и миграцию углеводородов.

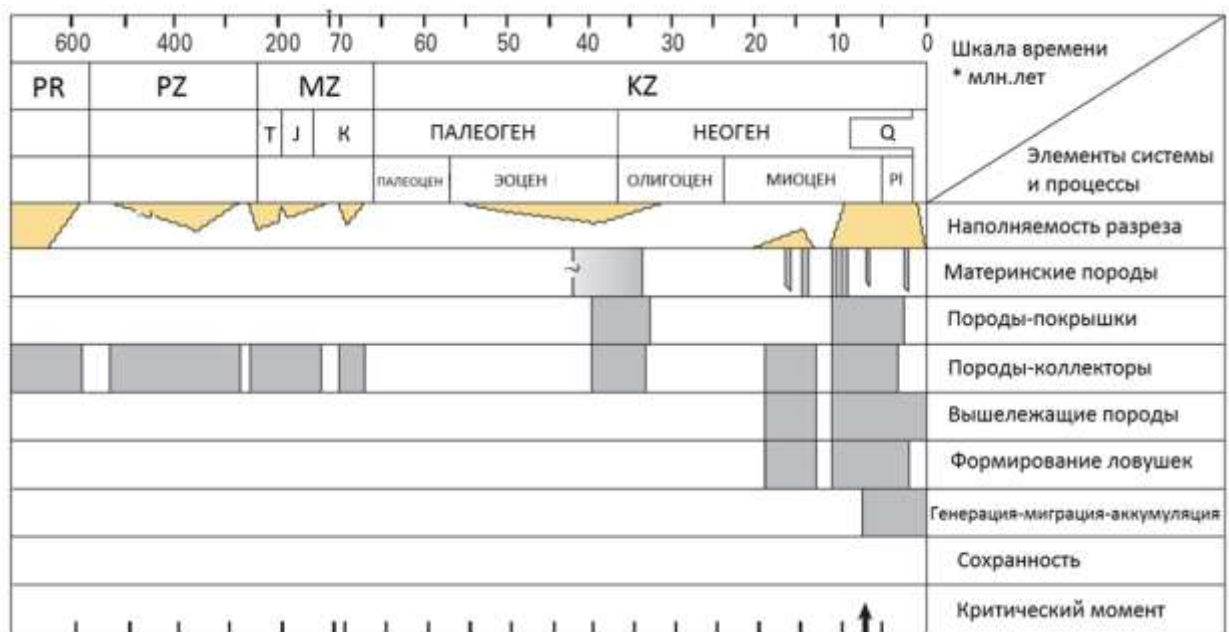


Рисунок 3.2 - Характеристика UV системы [207]

По результатам моделирования, генерация углеводородов в отложениях среднего миоцена началась около 6 - 7 млн. лет назад и продолжается по настоящее время [46, 170]. НМТ вступают в фазу нефтяного окна при достижении глубины погружения 4-5 км, в фазу газового окна - более 5 км. Миграционный путь оценивается от 10 до 20 км и контролируется особенностями структурно-тектонического строения каждой из депрессий.

Коллектора и покрышки присутствуют по всему разрезу, этот фактор не является критичным при поисках новых месторождений.

Перспективы геологоразведочных работ связываются с поиском стратиграфических, тектонических экранированных и литологических залежей по всему разрезу осадочного чехла и в донеогеновом основании. Структурные и структурно-тектонические ловушки наиболее характерны для донеогенового основания, отложений нижнего и среднего миоцена. В основном, подавляющее их большинство выделено и разведано по материалам сейсморазведочных исследований МОГТ 2D. Литологические ловушки распределены по всем стратиграфическим комплексам, но наиболее характерны для толщ понта и плиоцена. Анализ результатов интерпретации по новым сейсмическим съемкам позволяет сделать вывод, что доля прогнозируемых литологических залежей составляет 65-75 %. Однако их подтверждаемость намного меньше, чем у структурно-тектонических объектов. Характерные примеры описаны в главе 5 и разделе 6.2.2. В соответствии с распределением в разрезе нефтегазовых месторождений, литологические ловушки в толще верхнего миоцена и плиоцена имеют преимущественно газовое наполнение.

Исследования начала 2000-х позволили авторам сделать заключение, что рациональная и целенаправленная разведка может привести к открытию еще 20% от начальных запасов углеводородов в Сербии [46]. В работе по региональному обобщению специалисты НТЦ НИС определили остаточные ресурсы на основе моделирования углеводородных систем по каждой депрессии. В северной части Банатского грабена (депрессии Бекеш, Мако, Деречка) остаточные ресурсы оцениваются в 14 – 35%, в среднем Банате – 11 - 39%, в южном Банате – около 67%.

Анализ месторождений нефти юго-восточной части Паннонского бассейна, выполненный автором диссертационной работы, позволяет сделать следующие выводы.

а) Распределение залежей по возрастам вмещающих толщ демонстрирует их приуроченность преимущественно к основанию палеозойско-мезозойского возраста и синрифтовому комплексу (нижний миоцен, баден, сармат). Диаграмма представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Диаграмма стратиграфической приуроченности залежей нефти

б) Корреляции размера залежи с возрастом вмещающей толщи не наблюдается, 94% залежей по площади соответствуют диапазону значений от 0.058 до 2.50 км².

г) Количество залежей нефти, соответствующее определенному диапазону запасов продемонстрировано на рисунке 3.4. 50% запасов обеспечивают несколько ключевых месторождений с наиболее крупными по площади залежами в диапазоне от 5.0 до 16.0 км².

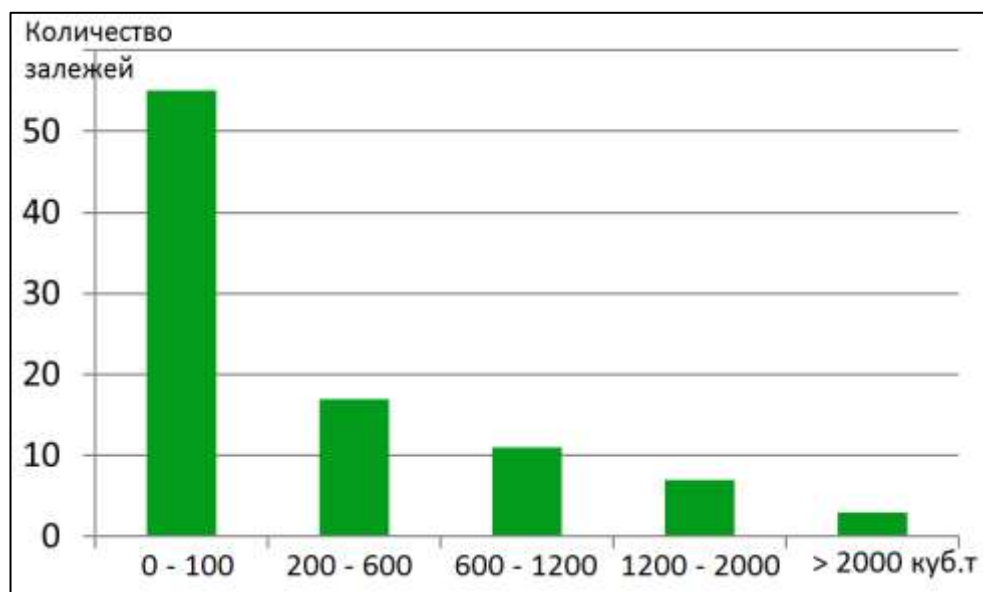


Рисунок 3.4 – Распределение залежей нефти по запасам

д) Распределение месторождений газа по стратиграфическим единицам демонстрирует их приоритетную приуроченность к толще отложений нижнего понта. В совокупности, 60% месторождений газа сосредоточено в верхнем миоцене. Диаграмма представлена на рисунке 3.5

е) Количество месторождений газа, соответствующее определенному диапазону запасов продемонстрировано на рисунке 3.6.

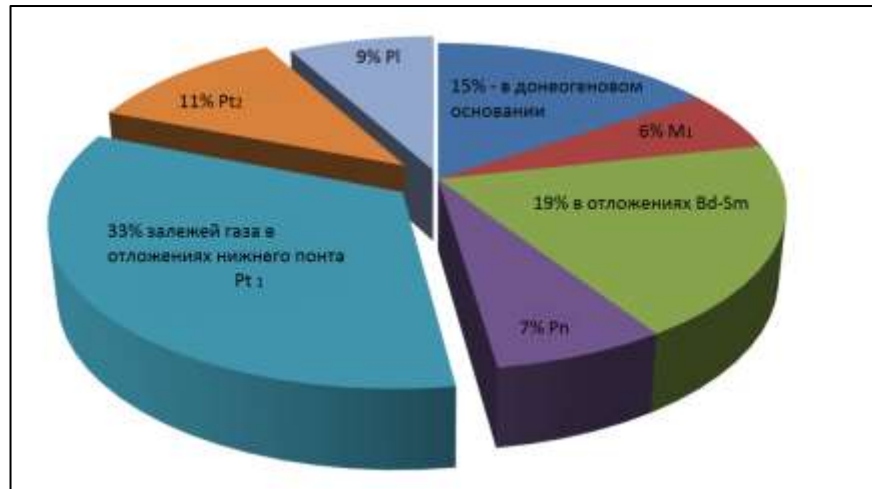


Рисунок 3.5 – Диаграмма стратиграфической приуроченности месторождений газа

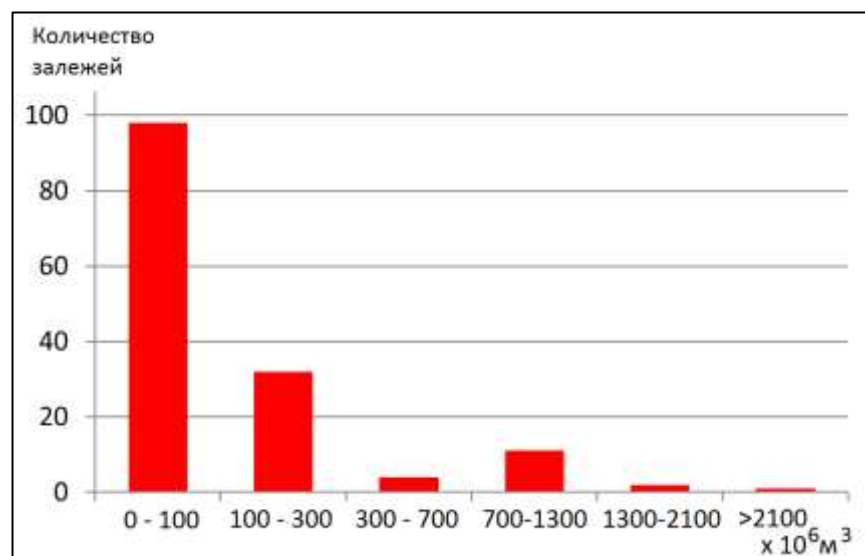


Рисунок 3.6 - Распределение газовых залежей по запасам

В целом по бассейну существует общая оценка, выполненная компанией USGS. На рисунке 3.7 приводится авторский анализ исходных статистических данных. На основе диаграмм USGS, можно спрогнозировать, что наиболее вероятный размер открытий нефтяных месторождений составляет менее 140-270 тыс. тонн.

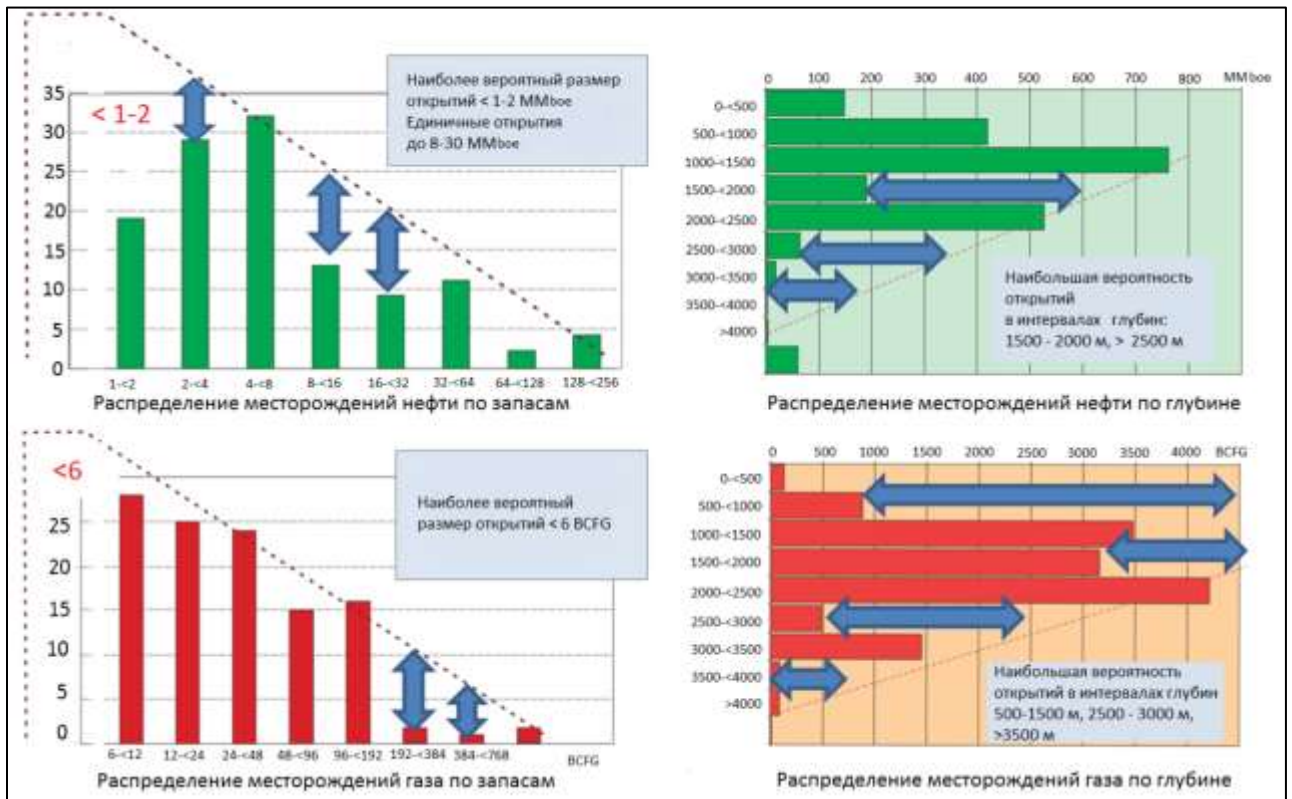


Рисунок 3.7 – Авторский анализ статистических данных компании USGS

Наибольшая вероятность открытий предполагается на глубинах 1500 – 2000 м и глубже 2500 м. По газовым месторождениям разброс по глубинам достаточно большой. Наиболее вероятный размер открытий менее $200 \times 10^6 \text{ м}^3$. Выводы относительно распределения запасов по стратиграфическим единицам и размерам залежей коррелируются с проведенным анализом данных по его юго-восточной части.

К настоящему моменту в пределах бассейна открыто более 500 залежей, с общими запасами свыше 1 400 млн тонн условной нефти. Несмотря на малую размерность подавляющего большинства месторождений, они рентабельны и

дальнейшие геологоразведочные работы представляют большой практический интерес.

На рисунке 3.8 приводятся исторические данные по добыче углеводородов в регионе.

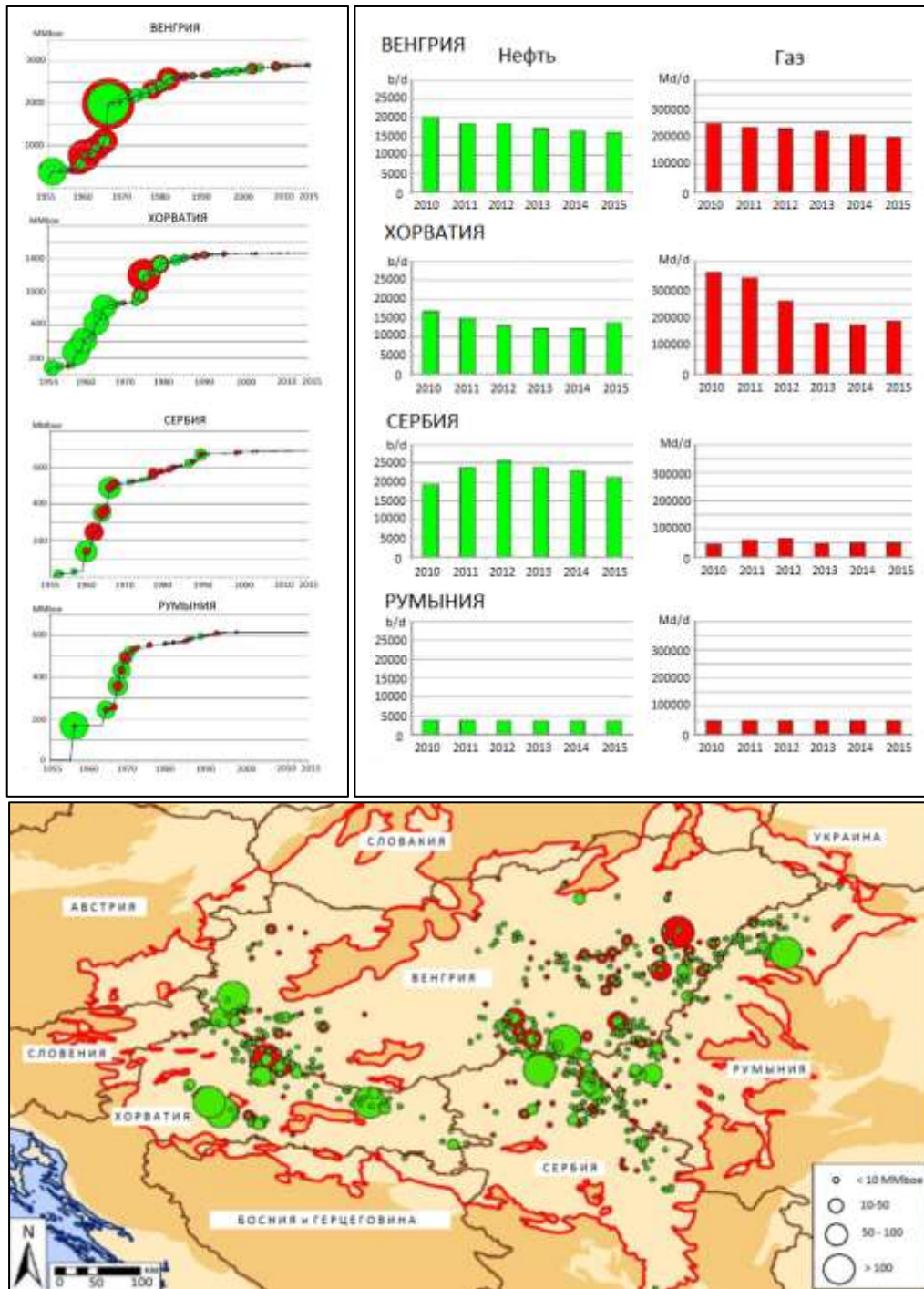


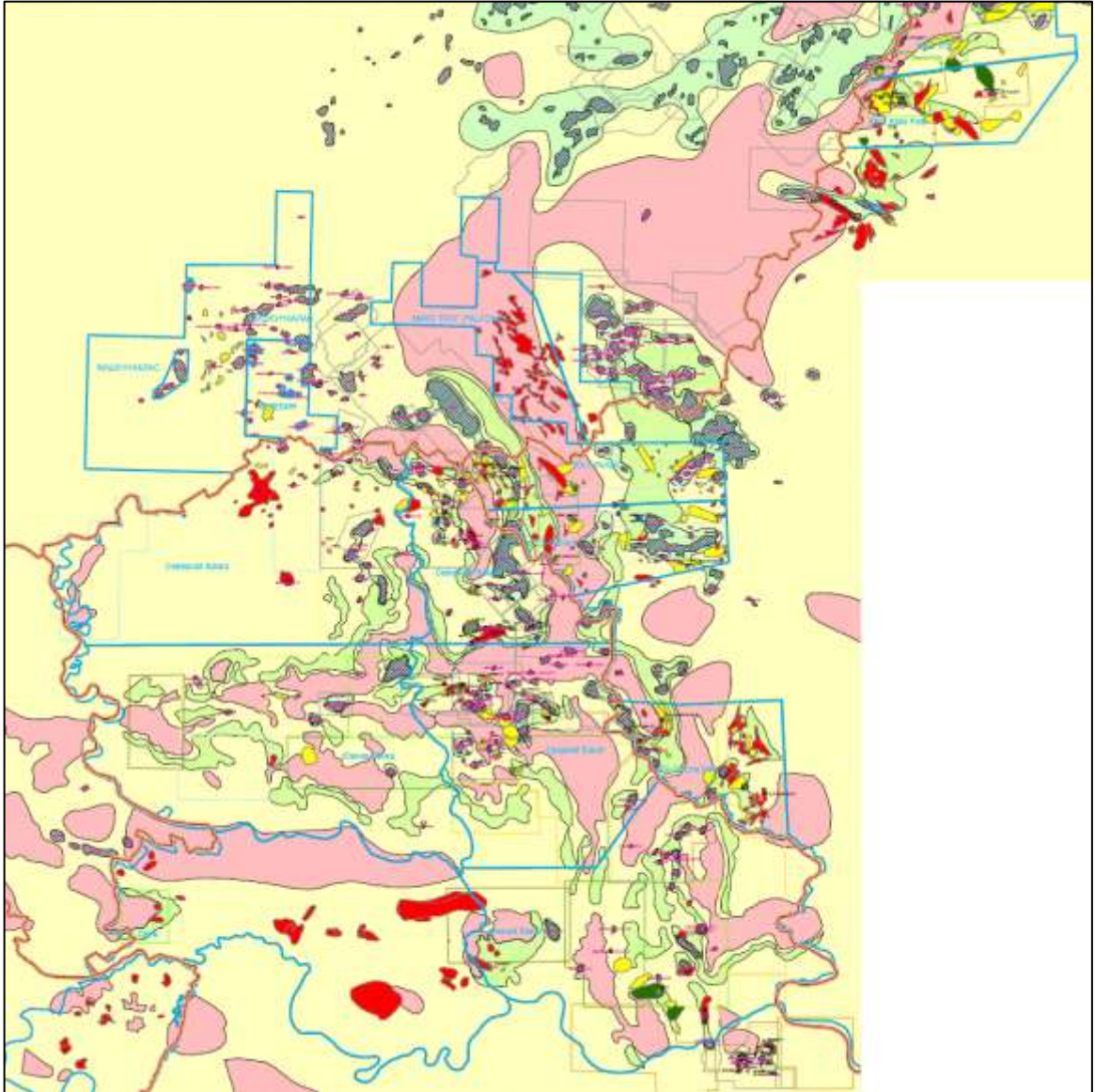
Рисунок 3.8 – Исторические данные по добыче углеводородов в регионе
(Источник – данные IHS)

По результатам интерпретации сейсморазведочных данных МОГТ 3D под руководством автора диссертационной работы была составлена прогнозная схема нефтегазоносности региона. Ранжирование территории проводилось на основе существующей концепции о генерации углеводородов в погруженных частях депрессий и их миграции по разломам, преимущественно вдоль бортов в сформированные структурные, структурно-тектонические, литологические и комбинированные ловушки. Прогнозная схема приводится на рисунке 3.9.

Зоны с уже доказанной продуктивностью и приуроченные к положительным структурным элементам рассматривались как потенциально высокоперспективные для открытия новых месторождений. На схеме они окрашены в зеленый цвет. Красный цвет соответствует наиболее погруженным участкам депрессий, которые оцениваются как малоперспективные. Бортовые зоны, затонированные желтым цветом, считаются условно перспективными.

При составлении схемы учитывалось распределение как действующих месторождений, так и вероятность геологического успеха (gCoS), рассчитанная для каждого потенциального объекта по методике, принятой в ПАО «Газпром нефть». В компании утверждена 5 факторная модель оценки gCoS. В качестве ключевых факторов рассматриваются: наличие нефтематеринской породы (P_{нп}), наличие коллектора (P_к), ловушки (P_л), путей миграции в ловушку (P_м) и ее сохранность (P_с). Каждый признак декомпозирован на отдельные составляющие, каждой из которых соответствует численный коэффициент. Для конкретного объекта анализируется геологическая обстановка, в соответствии с которой выбираются коэффициенты и подсчитывается итоговое значение параметра «геологического успеха», независимые признаки перемножаются. Подавляющее большинство предполагаемых литологических залежей относится к потенциально рискованным объектам для дальнейших геологоразведочных работ. В процессе их оценки критичным является близость к кухне и наличие канала миграции. Повышает оценку наличие нефтегазовых проявлений в нижних комплексах, приуроченных, как правило, к ловушкам структурно-тектонического типа.

В настоящий момент разработанная схема нефтегазоносности региона является основой для планирования текущих геолого-разведочных работ и общей стратегии компании на ближайшие годы.



Условные обозначения

Контурные перспективных структур с цветовой ранжировкой по вероятности геологического успеха CoSg

- 0.010 - 0.15
- 0.16 - 0.30
- > 0.30

Вероятностная схема нефтегазоносности

- низкая степень вероятности
- высокая степень вероятности
- потенциально высокоперспективные зоны
- средняя степень вероятности

Рисунок 3.9 - Прогнозная схема нефтегазоносности (Банатский грабен)

ГЛАВА 4. СЕЙМОСТРАТИГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ: ВЫДЕЛЕНИЕ СЕЙМОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В СЕЙМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАННОНСКОГО БАССЕЙНА

Исследование выполнено в процессе внедрения сеймостратиграфического анализа и сеймофациального анализа в производственную цепочку интерпретации сейсмических данных на площадях компании ПАО «Газпром нефть» в юго-восточной части Паннонского бассейна.

Внедрение обозначенных подходов, позволило:

- установить специфические региональные особенности сейсмических данных;
- разработать новые приемы интерпретации и адаптировать уже существующие технологические подходы;
- выполнить региональные палеореконструкции через картирование отдельных геологических событий;
- составить библиотеку сейсмических образов;
- разработать поисковые критерии для обнаружения литологических ловушек и залежей УВ в целевых интервалах.

Предметом исследований являются неогеновые отложения, заполняющие Паннонский бассейн, их мощность в одной из наиболее глубоких депрессий достигает 7 км. Донеогеновое основание имеет сложное строение: под покров осадочного чехла выходят отложения палеозойского, мезозойского и палеогенового возрастов.

Сеймостратиграфические подходы, разработанные изначально Питером Вейлом и его коллегами по Exxon Production Research Co. основаны на принципиальном допущении, что сейсмические отражения аппроксимируют изохронные геологические поверхности изначально увязываемые с эвстатическими колебаниями [114]. Одной из особенностей Паннонского

бассейна является тот факт, что в его истории присутствовали разные этапы взаимоотношений с Мировым океаном: в отдельные периоды бассейн открывался, но большую часть времени развивался практически изолированно. Каждый из суббассейнов, составляющих Паннонский бассейн, несет в себе черты, как общей истории геологического развития региона, так и имеет индивидуальные особенности. Это вызывает затруднения в идентификации разновозрастных толщ, особенно в погруженных частях депрессий. Однако, характерный рисунок сейсмической записи и идентификация определенных геологических событий, установленных для конкретных возрастных интервалов, позволяют условно их стратифицировать, даже при отсутствии скважинной информации.

К особенностям заполнения бассейна можно отнести существование множественных источников сноса, быструю смену условий осадконакопления, широкий спектр фациальных обстановок. Эти факторы во многом повлияли на сейсмогеологические условия и характер сейсмического изображения: большинство интервалов на сейсмических разрезах представлено прерывистыми осями синфазности, существуют проблемы с корреляцией отражающих горизонтов и идентификацией палеоизохронных событий.

В процессе интерпретации обозначились слабые места в стандартных подходах фазовой корреляции, основанных на прослеживании четко выраженных в осях синфазности отражающих горизонтов, как правило, стратиграфически привязанных к региональным реперным поверхностям.

Поэтому для углубленной сейсмогеологической интерпретации были разработаны и внедрены авторские объектно-ориентированные подходы, позволяющие учитывать все особенности сейсмического изображения, информативность условных отражающих горизонтов, характерных комбинаций из фрагментарных осей синфазности и т.д. [86].

4.1. Обзор сейсмостратиграфических исследований в юго-восточной части Паннонского бассейна

Региональная сейсмостратиграфическая модель изначально создавалась по материалам сейсмических исследований МОГТ 2D. Основные этапы развития бассейна зафиксированы в региональных поверхностях несогласного залегания основных геологических комплексов. Положение региональных эрозионных границ на временном разрезе представлено на рисунке 4.1 [220].

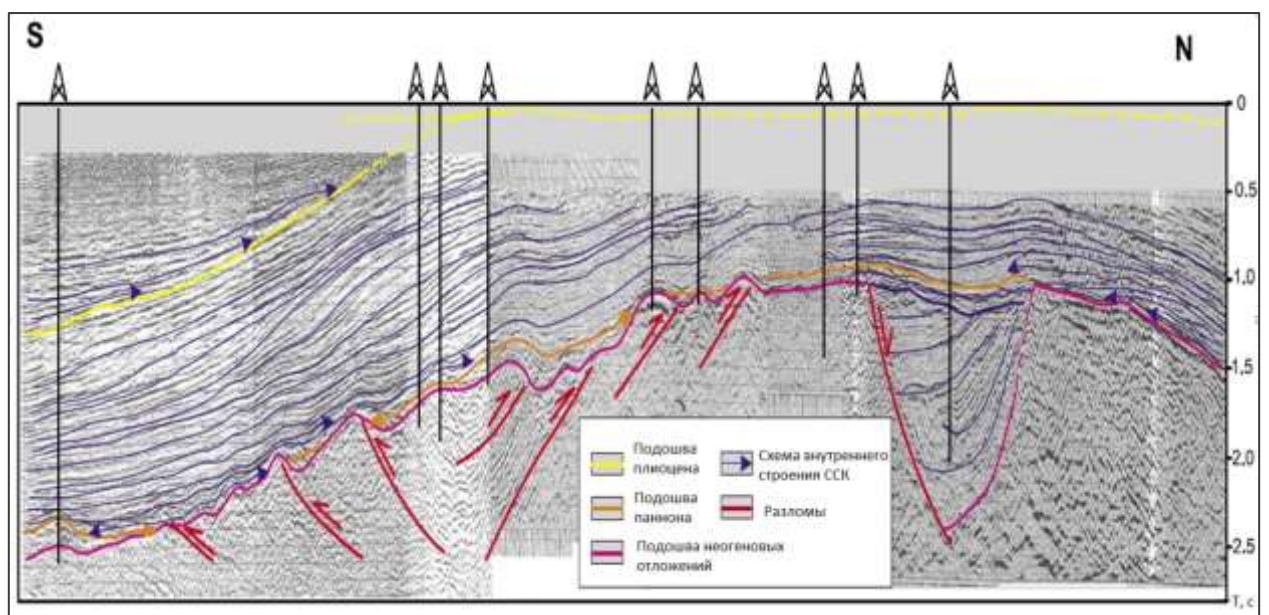


Рисунок 4.1 - Региональные эрозионные границы [202]

Маккоритмы в формировании неогеновой толщи установлены геологическими исследованиями в конце 60-х годов. В работах Velić (2002) они получили статус мегациклов второго порядка, их длительность определена в 6.8, 5.9 и 5.6 млн лет. Выделение мегациклов обосновано структурно-тектонической эволюцией бассейна, их границы соответствуют крупным региональным несогласиям.

Первой эрозионной границей (региональным несогласием) является подошва неогенового комплекса. Породы донеогенового основания перекрываются отложениями раннего, среднего и позднего миоцена. На сейсмических разрезах эрозионной границе соответствует изображение, отождествляемое с подошвенным прилеганием, характерное для синрифтового комплекса [172].

Отражающие горизонты, формирующие подошвенное прилегание, также представляют собой эрозионные поверхности и не являются палеоизохронными.

Вторым региональным несогласием является граница синрифтового и пострифтового комплекса [209, 216, 217].

Третье несогласие носит название паннонской эрозионной границы. На рубеже среднего и верхнего миоцена бассейн был вовлечен в инверсионные движения, происходил общий подъем территории с последующей эрозией толщ среднемиоценового возраста. Эрозионную поверхность перекрывают отложения паннонского возраста, сформированные в трансгрессивном цикле. На сейсмических разрезах эрозионный характер этой поверхности проявляется всегда достаточно отчетливо. Отражающий горизонт, ассоциированный с ней, «срезает» наклонные оси синфазности, идентифицированные с кровлей интервала среднемиоценового возраста. Существование паннонского регионального несогласия полностью согласуется с данными скважинных исследований [172].

Четвертое региональное несогласие интерпретируется в подошве плиоценовых отложений и, по мнению ученых, ассоциируется с компрессионным режимом, как и предыдущая эрозионная граница. Отдельные блоки, формирующие основание бассейна, испытывали подъем с последующим размывом отложений, некоторые – опускание. Наибольшая мощность комплекса сохранилась в пределах последних.

Первый мегацикл, ограничен подошвой неогенового комплекса и поверхностью, ассоциированной с завершением синрифтовой фазы. В течение этого периода формировались депрессии, осадконакопление в них происходило изолированно, отмечается сильное влияние тектонических процессов на характер седиментации [168, 172, 209]. На территории Хорватии, в оттангское время формировались грубообломочные отложения в пресноводных условиях, что подтверждается скважинными данными в Драва депрессии, западной части Сава депрессии, Дремлянкой депрессии (Сербия); в карпатское время - морские отложения (восточная часть Драва депрессии, в обнажениях практически всех массивов Северной Хорватии).

На границе ранний миоцен/баден произошла трансгрессия и обширная территория была затоплена морской водой нормальной солености.

Отложения второго мегацикла сформированы в условиях Паннонского моря-озера [172, 217]. После инверсионной фазы первого мегацикла второй мегацикл ознаменовался погружением и «озерной трансгрессией» с последующим заполнением котловины моря-озера привносимым реками терригенным материалом. Мощность клиноформных толщ составляет от 2000 м (Западная часть Сава депрессии) до 4 000-5 000 м (юго-западная часть Драва депрессии).

Отложения третьего мегацикла встречаются между приподнятыми блоками, результирующими наиболее молодые инверсионные движения. Их мощность может достигать от 200-300 метров до 1000 метров. В этот период Паннонское озеро значительно уменьшилось в размерах и сохранилось лишь в южной части ПБ.

Наибольший интерес у специалистов по секвенс-стратиграфии вызывает клиноформный комплекс второго мегацикла. Активные споры в научной среде развернулись на предмет факторов, влияющих на его формирование [151, 155, 190, 210].

Csató (1993) пришел к выводам, что в связи с изоляцией моря-озера, его заполнение осадками не может быть напрямую связано с колебаниями уровня Мирового океана.

Vakarcs et al. (1994) прокоррелировал основные эрозионные границы в пределах комплекса и увязал их с эвстатической кривой (Nag et al., 1987).

Juhász et al. (1997, 1999) на основе скважиной информации доказал, что седиментационные циклы не контролировались эвстатическими колебаниями.

Позднее, в большинстве публикаций был найден консенсус, на предмет того, что эвстатические колебания напрямую не играли роли в формировании клиноциклитов. Определяющие значение имели тектонический и климатический факторы Juhász et al. (2006, 2007), Uhrin and Sztanó (2012).

В работе O. Catuneanu et al. (2015) приводятся результаты моделирования заполнения восточной части бассейна в пределах депрессий Мако Трог, Деречка,

Бекеш и Язаг (территория Венгрии) [153]. Для определения зоны аккомодации потребовалось детальная геологически обоснованная интерпретация эрозионной границы в подошве клиноформного комплекса по отдельным региональным профилям МОГТ 2D. Автор, как и упомянутые выше исследователи, подчеркивает, что фундаментальный вклад в цикличность постпаннонского времени вносил тектонический фактор.

Секвенс-стратиграфическая модель, по мнению О. Catuneanu, включает два секвенса второго порядка (по классификации Вейла, 1991 г.), продолжительностью по 4 – 6 млн лет. Первый выделяется в паннонско-понтских отложениях и соответствует тракту высокого уровня моря - озера (HST). Второй - в понт-плиоценовых отложениях, соответствует тракту низкого стояния уровня моря-озера (FST - LST). Комплексы включают большое количество мелкомасштабных секвенсов проградационного и аградационного типов. На сейсмическом разрезе, отражающие горизонты, фиксирующие отдельные клинотемы, имеют четко выраженную сигмовидную форму. На основе интерпретации сейсмических разрезов в депрессиях Деречка и Бекеш выделены клиноциклиты третьего и четвертого порядков. Модель приводится на рисунке 4.2. Относительно условий их формирования сделано предположение, что циклы третьего порядка контролируются тектоникой, а циклы четвертого порядка – масштабными климатическими изменениями [153].

Важным является тот факт, что заполнение бассейна в региональном масштабе происходило одновременно с нескольких направлений. Картирование склонов по материалам региональных сейсмических профилей позволило обозначить и обосновать основные системы транспортировки осадочного материала, представленные на рисунке 4.3 [192].

1. Палео-Дунай привносил осадочный материал с северо-запада. Система наиболее мощная и долгоживущая. По времени эта система заполняла бассейн от 10 млн лет до 4 млн лет. Скорость продвижения бровки шельфа - 67 км за 1 млн лет (около 400 км за 6 млн лет).

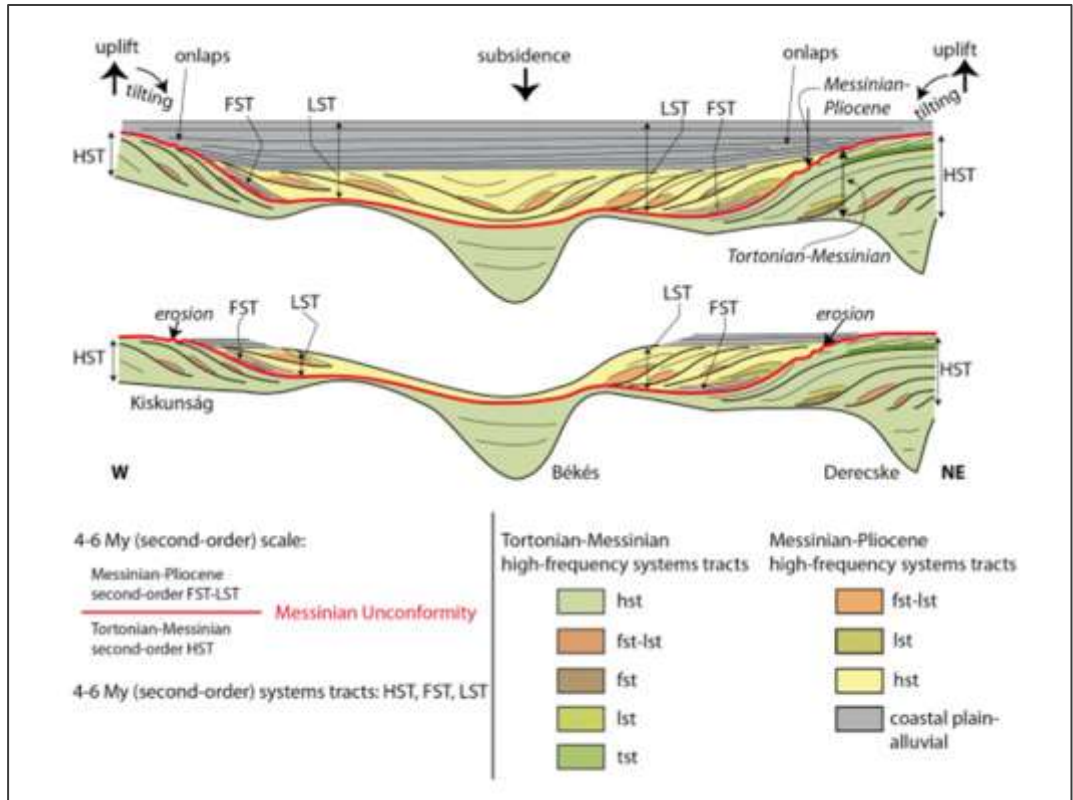


Рисунок 4.2 – Секвенс-стратиграфическая модель комплекса верхнемиоценового возраста [153]

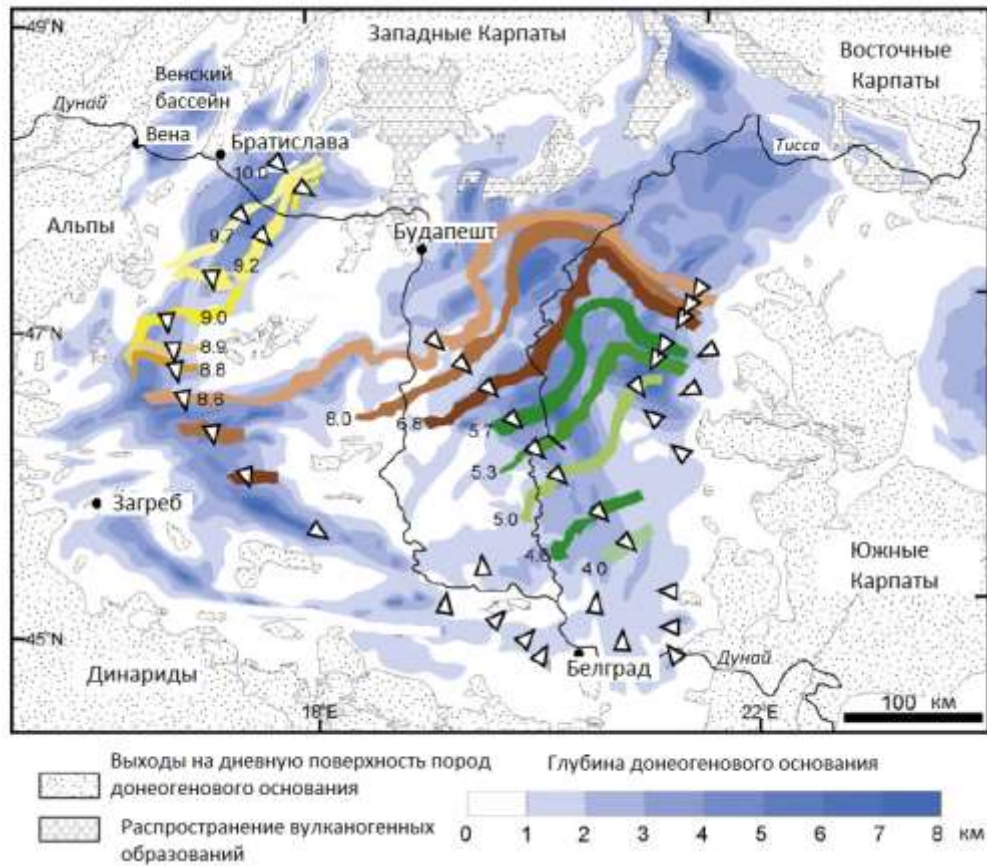


Рисунок 4.3 - Модель заполнения бассейна - основные направления транспортировки осадочного материала [192]

2. Палео-Тисса, вторая по значимости система, заполняла бассейн с северо-востока. Клиноформы, сформированные этой системой, датируются от 8.5 до 5.0 млн лет, более древние комплексы предполагаются, но нет данных. Отложения Палео-Дуная и Палео-Тиссы отличаются по минералогическому составу. Отложения Палео-Тиссы содержат вулканогенные минералы, характерные для внутренней дуги Карпат. Отложения Палео-Дуная включают минералы, характерные для метаморфических пород Альп и Западных Карпат.

3. Палео-Марос, система закартированная на юго-востоке, возраст 5 млн лет. Заполняла центральную и восточную части бассейна.

4. Палео-Сава заполняла бассейн с юго-запада. Детально не изучена.

Существующая модель охватывая весь бассейн, создает целостное представление об истории геологического развития региона, но представляет собой общую схему, которая требует дальнейшей детализации, так как в каждой депрессии создавались локальные пространства для аккомодации, которые также заполнялись с множественных направлений.

На рисунке 4.4 продемонстрирован композитный профиль, через депрессии Мако, Бекеш, Деречка, демонстрирующий региональное геологическое строение. Вдоль профиля по кровле клиноформного комплекса указаны предполагаемые возраста отдельных клиноциклитов. Значения коррелируются с возрастными проградационными сериями, указанными на модели заполнения бассейна на рисунке 4.3.

Наиболее детально разработана секвенс-стратиграфическая модель для депрессии Мако [147, 153, 225, 227]. Авторы модели поставили перед собой задачу - установить закономерности в распределении коллекторов с улучшенными ФЕС на основе реконструкции процессов заполнения бассейна. Сейсмические данные МОГТ 3D высокого качества комплексировались с данными по 7 глубоким поисково-разведочным скважинам, детально исследовалось около 220 м керна.

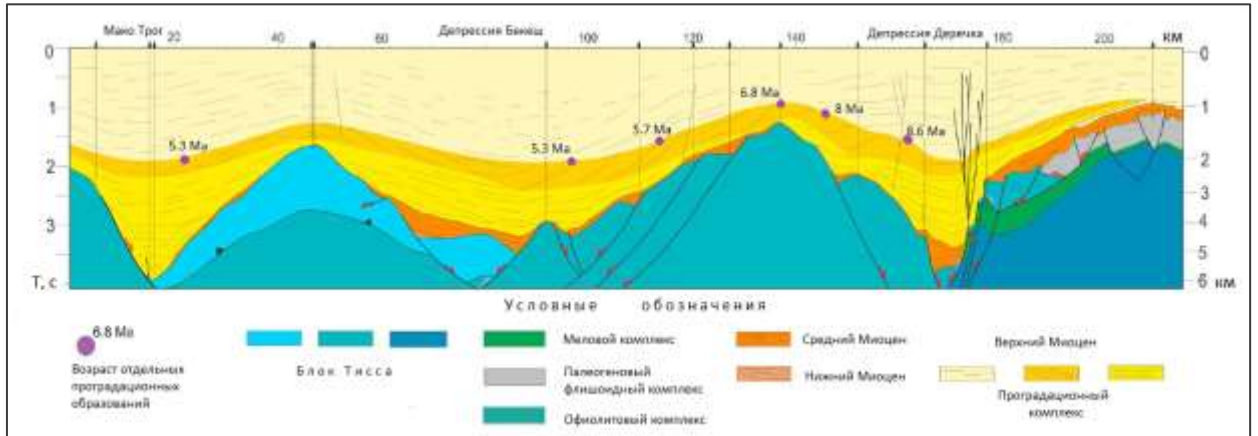


Рисунок 4.4 – Композитный профиль через депрессии Мако, Бекеш, Деречка, демонстрирующий региональное геологическое строение и возраст отдельных проградационных образований [148]

Сечение сейсмических данных вдоль направления поступления осадочного материала на рисунке 4.5 освещает участок длиной в 45-60 км. В ходе интерпретации закартировано 18 пар клинотем и соответствующие им границы склонов (бровки шельфа). По оценке исследователей, заполнение этого участка происходило в интервале 6.0 - 5.0 млн лет назад, глубина бассейна составляла 400-500 м. Клинотемы интерпретировались на основе отражающих горизонтов в клиноформном комплексе. Отражающие горизонты, фиксирующие клинотемы аградационного типа, прослеживаются в пределах шельфа, склона и донной части бассейна. В течение каждого цикла аккумулировалось около 50-90 м осадков, средняя скорость продвижения бровки шельфа составляла 1,2 км.

Проградационные клинотемы значительно отличаются от аградационных по форме и по литологическому содержанию. Отражающий горизонт, не прослеживается в пределах интервала, сопоставляемого с условной зоной шельфа.

В течение проградационных циклов, заполнение бассейна происходило более интенсивно, продвижение бровки шельфа в среднем составляло 6 км в каждом цикле. Тем не менее, объем проградационной клинотемы значительно меньше и

составляет $2/3$ от аградационной клинотемы. Протяженность склона оценивается в 5-10 км (в других работах 5-15), угол наклона – $1.5-3^\circ$.

Для сравнения, углы наклона континентального склона современных океанов составляют в среднем около 4° , нередко $15-20^\circ$.

Схема продвижения бровки шельфа представлена на рисунке 4.6.

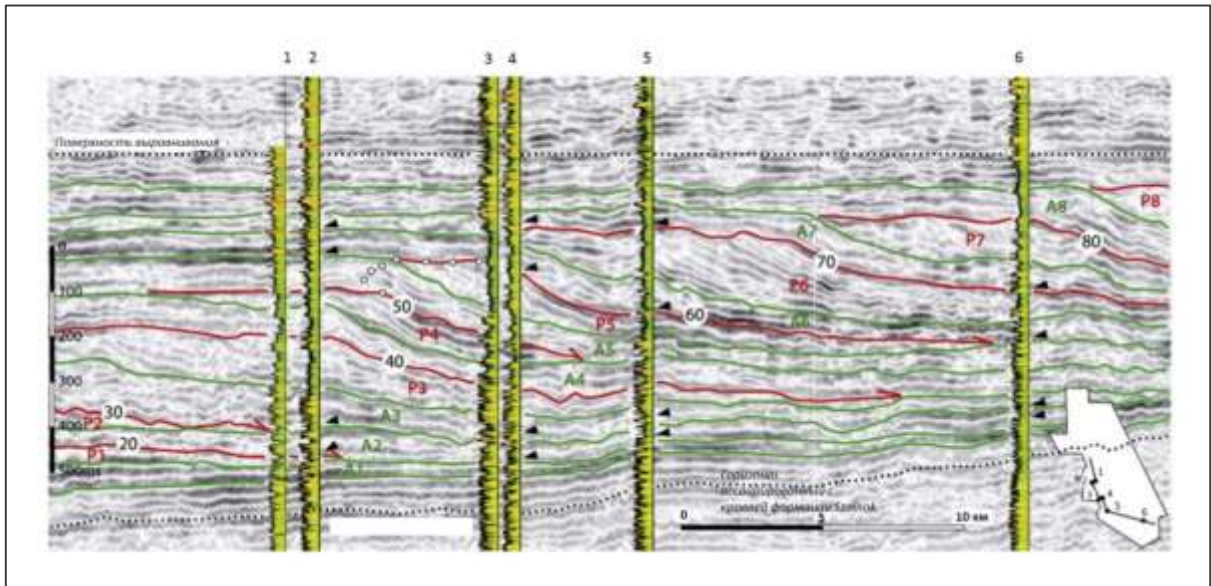


Рисунок 4.5 – Секвенс-стратиграфическая интерпретация клиноформного комплекса [225]

Углубленная интерпретация, атрибутный и AVO анализы позволили изучить геологические объекты, формирующие клинотемы. Идентифицированные по слайсам, представленным на рисунке 4.7, лопасти конусов выноса сложены предположительно песчаником, расположены на некотором удалении от склона, имеют вытянутую форму, средние размеры составляют 5-10 км в длину и 4-10 км в ширину. Большинство подводящих и распределительных каналов, формирующих турбидитовый комплекс, находятся за пределами разрешающей способности сейсмического метода. По результатам интерпретации наиболее крупные из них имеют ширину – 200-300 м и глубину до 60 м.

Интерпретация проградационных клинотем демонстрирует, что тела, сформированные крупнозернистым материалом, формировались вблизи подножия склона, не далее 10 км. По форме они более разнообразны, размеры от

5-10 км в длину и 1-2 км в ширину. По скважинным данным мощность составляет 10-20 м.

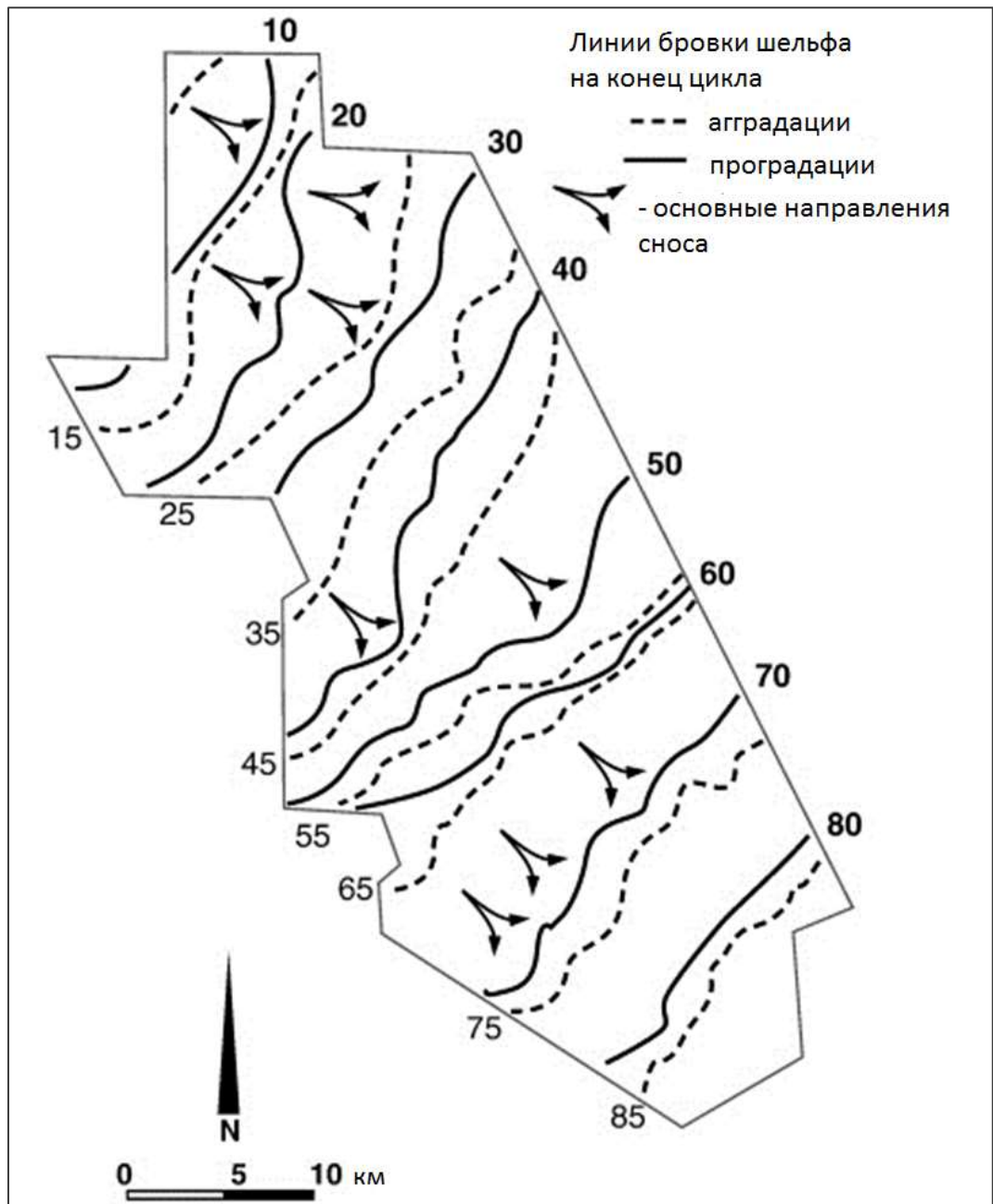


Рисунок 4.6 – Схема продвижения бровки шельфа [225]

Авторы секвенс-стратиграфической модели делают выводы, что климатический фактор является определяющим в формировании клиноформного комплекса [225].

По отдельным участкам на территории Венгрии созданы подобные детальные секвенс-стратиграфические модели, но увязать эти модели между собой не

представляется возможным по причине локальных особенностей формирования клиноформного комплекса в каждой отдельно взятой депрессии.

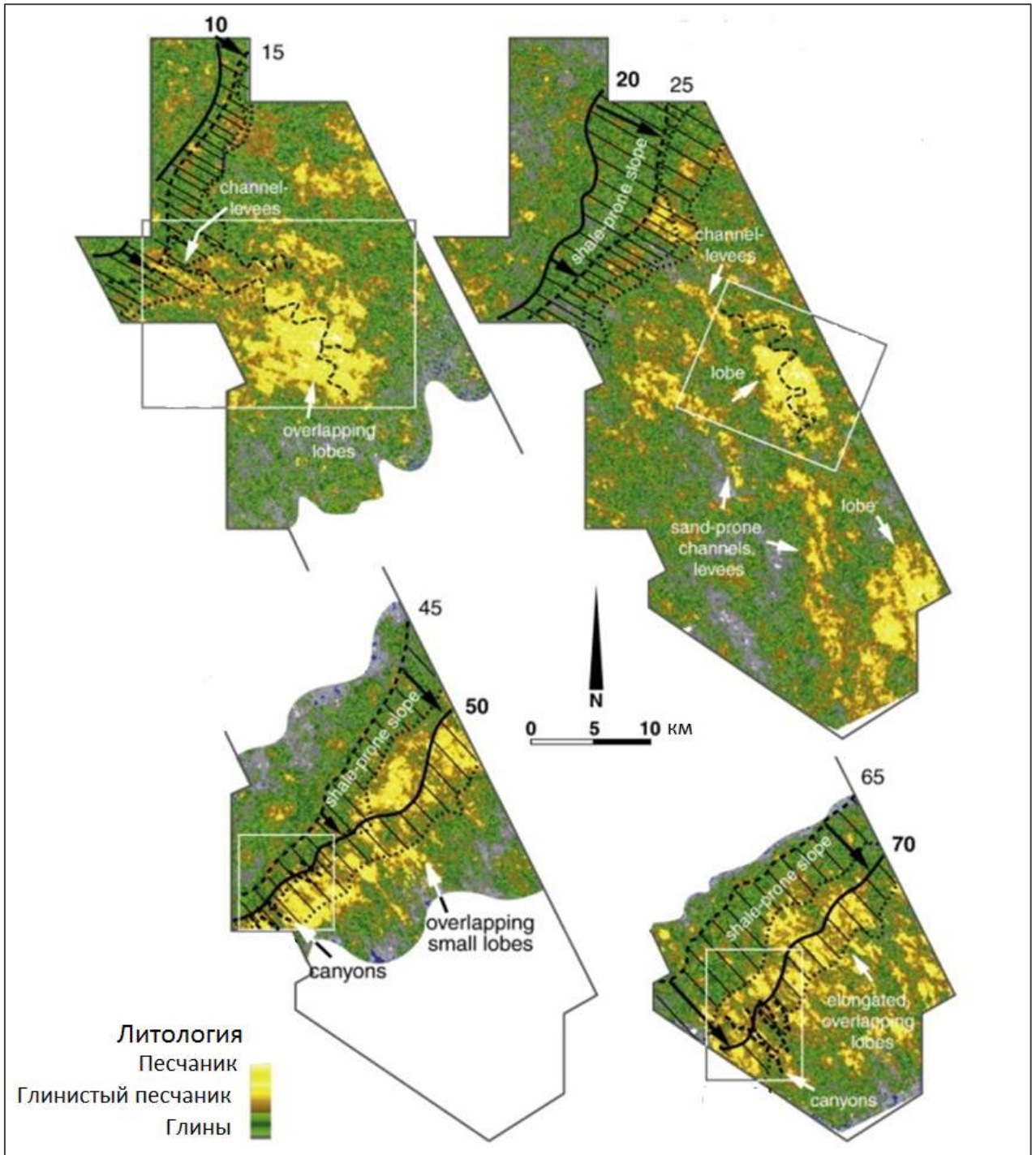


Рисунок 4.7 – Информативность седиментационных слайсов [225]

4.2. Принципы выделения региональных сейсмостратиграфических комплексов

В диссертации впервые выделены по материалам сейсморазведки МОГТ 3D на большой площади покрытия (более 6500 км²) и обоснованы региональные сейсмостратиграфические комплексы (ССК) с трехмерным представлением геологических объектов, характерных для каждого ССК. В основу выделения сейсмостратиграфических комплексов положены особенности сейсмического изображения и этапы геологического развития региона. На рисунке 4.8 представлен временной сейсмический разрез с характерным изображением для региона в целом.

В зависимости от полноты геологического разреза в той или иной части бассейна количество сейсмических комплексов может изменяться. В диссертации приводится системное описание 5 сейсмостратиграфических комплексов (ССК):

ССК 1 – соответствует интервалу, сопоставляемому с отложениями нижнего миоцена;

ССК 2 – соответствует интервалу, сопоставляемому с интервалом среднемиоценовых отложений;

ССК 3 – соответствует интервалу, сопоставляемому с отложениями паннона - нижнего понта;

ССК 4 – клиноформный комплекс;

ССК 5 – комплекс, соответствующий интервалу, сопоставляемому с отложениями верхнего понта – плиоцена.

Для каждого комплекса проанализированы особенности сейсмического изображения, в том числе отображение в сейсмическом материале локальных событий, соответствующих конкретному периоду геологической истории.

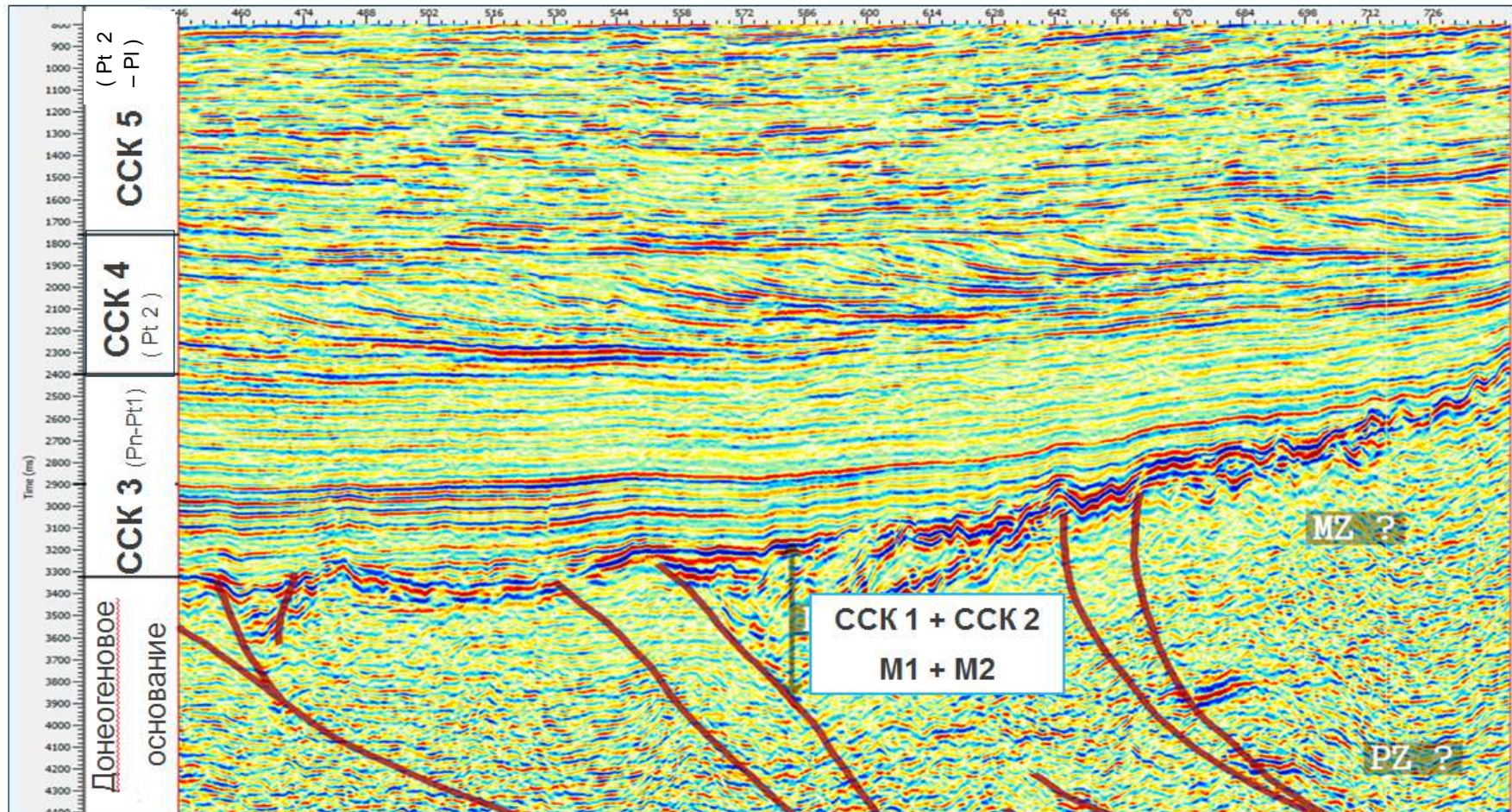


Рисунок 4.8 – Временной разрез вдоль осевой части депрессии Мако Трог

4.2.1. Донеогеновое основание

В основании Паннонского бассейна находится гетерогенный и сложнопостроенный фундамент, состоящий из двух комплексов: докембрийского и палеозойско-палеогенового. С фундаментом в регионе связываются большие перспективы. В настоящий момент констатируется недостаточная изученность структурно-тектонического строения донеогенового основания и его углеводородного потенциала.

Толща неогеновых отложений перекрывает породы палеозойского, мезозойского и палеогенового возрастов.

Верхнепалеозойские отложения мощностью свыше 4,5 км представлены каменноугольными сланцами и известняками, пермскими красноцветными песчаниками, конгломератами, аргиллитами и известняками с включением эффузивов.

Триасовые отложения мощностью свыше 3,5 км образованы преимущественно карбонатными породами с прослоями красноцветных терригенных пород и включением диабазовых и порфиритовых тел.

Породы юрского возраста характеризуются ограниченным распространением, включают в подошве угленосные терригенные породы переходящие вверх в карбонатную толщу. Мощность юрских отложений от 350 до 4000 метров.

На рисунке 4.9 показаны отдельные характерные образцы керна.

Образования мелового возраста сложены карбонатно-терригенными породами мощностью до 2100 м.

В пределах юго-восточной части бассейна локально присутствуют отложения палеогена, представленные континентальными терригенными образованиями. На сейсмических разрезах, они могут быть выделены в отдельный локальный ССК.

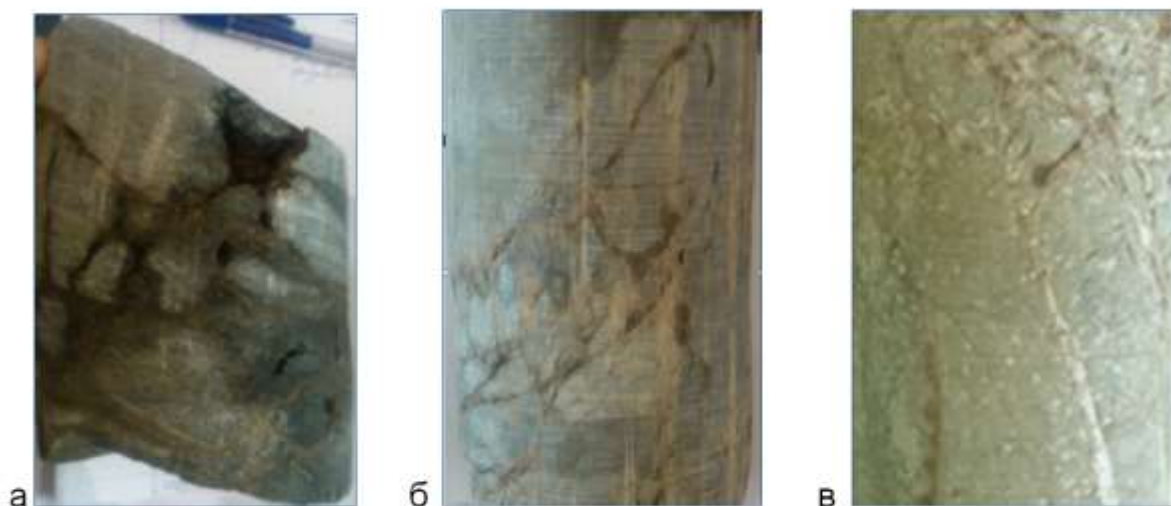


Рисунок 4.9 – Образцы керна: а – палеозойский трещиноватый известняк (коллектор); б – триасовый трещиноватый известняк (коллектор); с – юрский измененный долеритовый порфирит с нефтенасыщением по трещинам

Для месторождений углеводородов, открытых в донеогеновом основании, характерны несколько типов залежей:

- залежи, сформированные в приповерхностной части фундамента (месторождение Турия, сейсмический разрез представлен на рисунке 4.10);
- залежи в ловушках внутри фундамента (месторождение Русанда, сейсмический разрез представлен на рисунке 4.11);
- массивные залежи с общим ВНК с синрифтовым комплексом (месторождение Элемир, сейсмический разрез представлен на рисунке 4.12).

На протяженных региональных профилях в первом приближении комплекс донеогенового основания хорошо опознается, так как рисунок сейсмической записи в интервале разреза, сопоставляемом с донеогеновым основанием, резко отличается от сейсмического изображения в перекрывающей его толще и характеризуется нерегулярными хаотическими отражениями. Отдельные оси синфазности или цуги волн отмечаются фрагментарно, как на разрезах МОГТ 2D,

так и на вертикальных сечениях материалов МОГТ 3D, реперные отражающие горизонты отсутствуют.

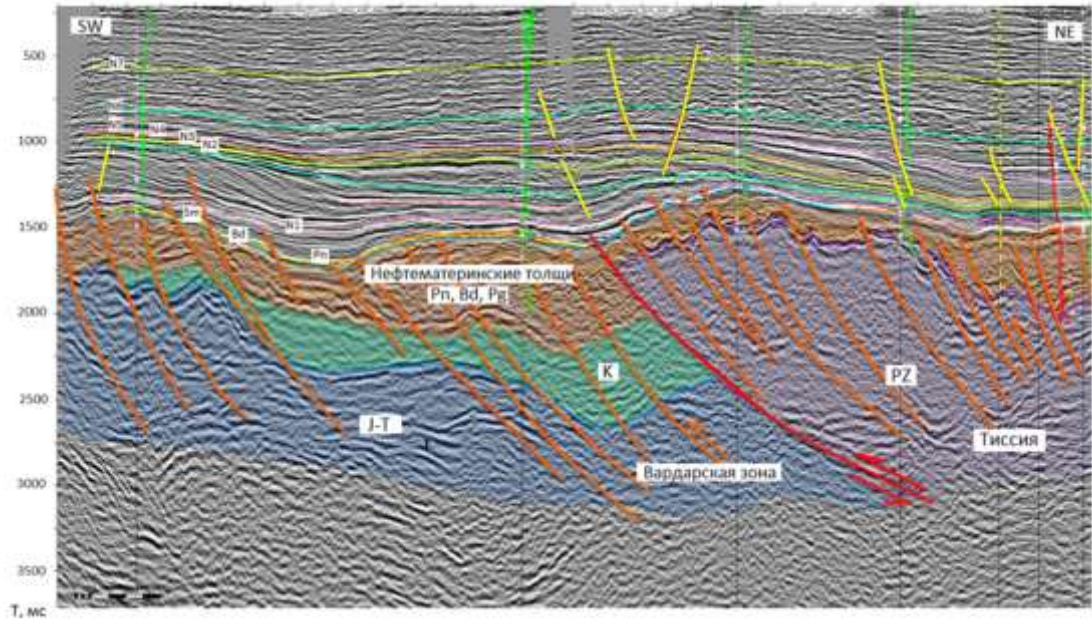


Рисунок 4.10 - Сейсмическое изображение в интервале донеогенового основания (сечение через месторождение Турия)

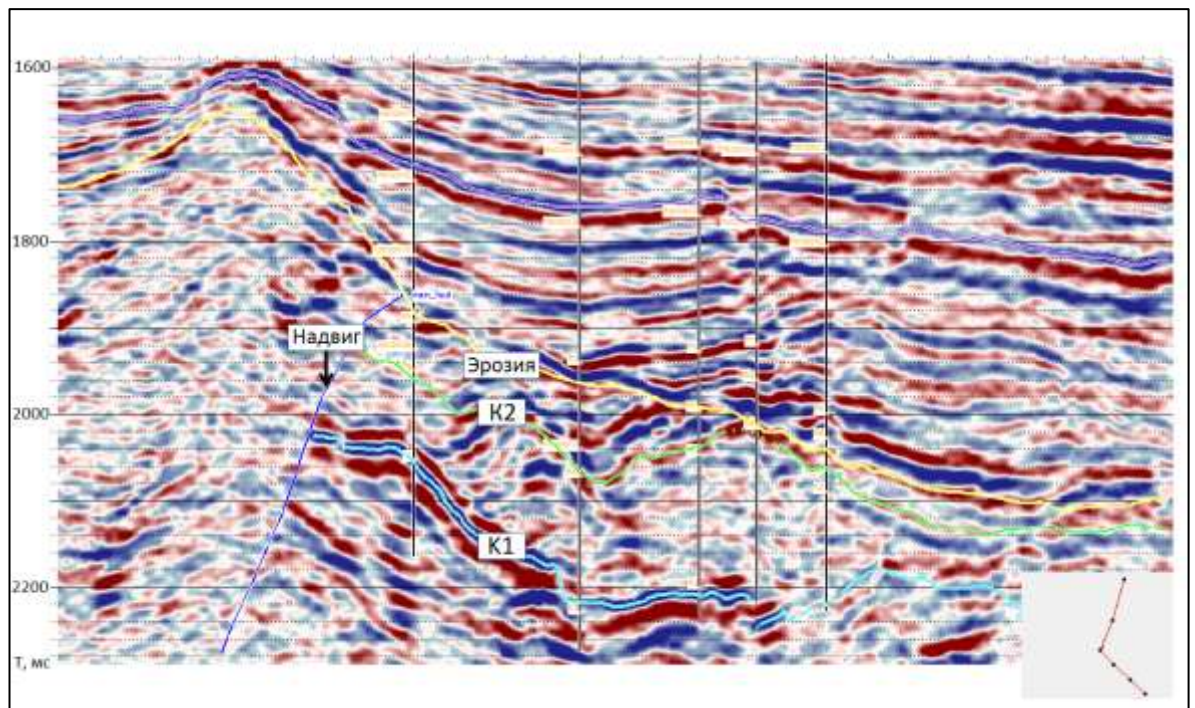


Рисунок 4.11 - Сейсмическое изображение в интервале донеогенового основания (месторождение Русанда, субмеридиональное сечение сейсмического куба через скважины)

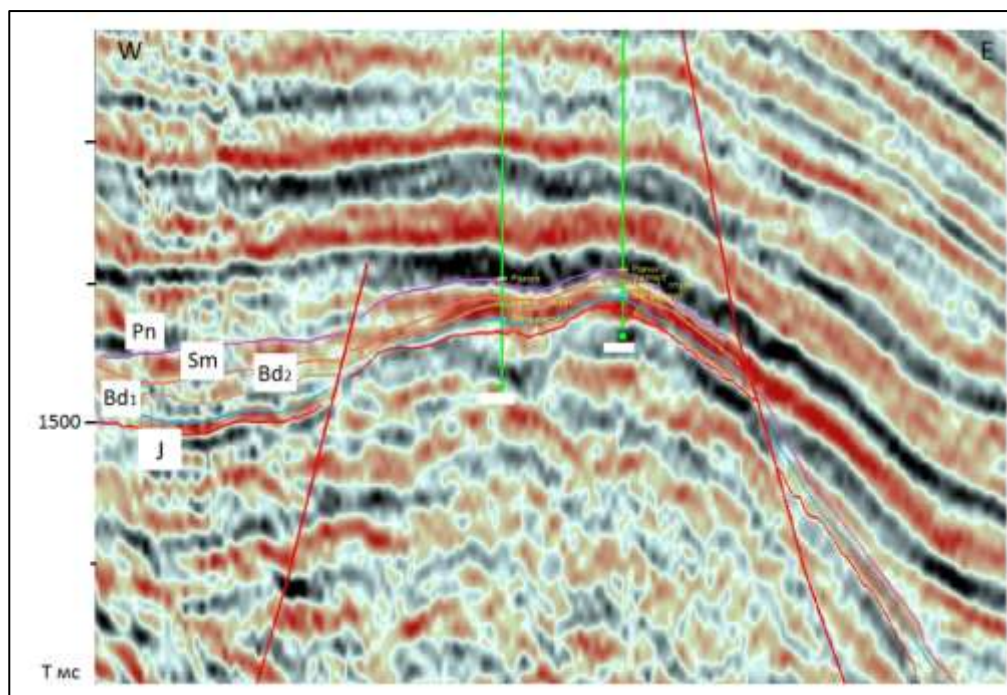


Рисунок 4.12 - Сейсмическое изображение в интервале донеогенового основания (месторождение Элемир)

При наличии скважинной информации сейсмические отражения можно условно отождествить со стратиграфическими границами, но только в пределах локальных участков.

Для улучшения сейсмического изображения в граф обработки были внедрены процедуры миграции до суммирования: временная и глубинная.

С целью получения дополнительной информации о геологическом строении складчатого основания проводилось тестирование технологии CRS (Common Reflection Surface). Анализ результатов, по экспертному заключению автора диссертации, позволяет констатировать некоторое улучшение сейсмического изображения, появление более протяженных осей синфазности, способствующих интерпретации. Но в целом, сохраняется высокая неопределенность, как при картировании отражающих горизонтов, так и при трассировании тектонических нарушений. Основной вывод экспертов о целесообразности применения технологии CRS сводится к статусу «альтернативного вспомогательного варианта» обработки для более аргументированной интерпретации.

При наличии скважинной информации сейсмические отражения можно условно отождествить со стратиграфическими границами, но только в пределах локальных участков. В процессе экспертизы регионального проекта автором были проанализированы скважинные данные. В Таблице 5 представлены результаты, демонстрирующие крайне низкую информативность скважинных данных по внутреннему строению донеогенового основания для комплексирования их с сейсмическими исследованиями.

Таблица 5

Изученность фундамента бурением

№	Количество скважин, вскрывающих донеогеновое основание	950 скв. на территории Сербии и Респ. Сербской	88 скв. на территории Венгрия	70 скв. на территории Румынии
1	2	3	4	5
1	Количество скважин, вскрывающих только PZ (M1/ PZ, Bd/ PZ, Sm/ PZ, Pt/PZ)	423	39	51
2	Количество скважин, вскрывающих только К	194	14	9
3	Количество скважин, вскрывающих только J	167	3	0
4	Количество скважин, вскрывающих только Т	93	14	0
5	Количество скважин, вскрывающих К и J	30	4	0
6	Количество скважин, вскрывающих J и Т	1	0	0
7	Количество скважин, вскрывающих К и Т	10	2	0
8	Количество скважин, вскрывающих К и J и PZ	1	0	0
9	Количество скважин, вскрывающих J и Т и PZ	2	0	0
10	Количество скважин, вскрывающих К и Т и PZ	0	0	0
11	Количество скважин, вскрывающих К и J и Т	0	1	1
12	Количество скважин, вскрывающих К, J, Т и PZ	0	2	3

В литературе приводятся примеры успешной идентификации отражений в фундаменте в условиях комплексирования со скважинной информацией. Например, юрские офиолиты могут диагностироваться в сейсмическом изображении по низкочастотным высокоамплитудным прерывистым отражениям. Карбонатные толщи триасового возраста формируют более высокочастотное отражение, чем вмещающие метаморфические породы палеозоя. Существуют примеры эффективной интерпретации сложных разрезов с надвиговой тектоникой, например, в сопредельном Венском бассейне, где в юрских и триасовых отложениях выявлены залежи, как нефти, так и газа [127, 221].

Отсутствие репрезентативной выборки скважинных данных в наиболее погруженных частях депрессий, и, соответственно, информации о скоростных характеристиках разреза, приводит к большим погрешностям в определении глубины поверхности донеогенового основания, что влияет на достоверность результатов моделирования углеводородных систем.

В 2017 году, в связи с актуальностью темы, в компании НИС а.д. Нови Сад был обоснован и запущен научно-исследовательский проект: «Развитие нефтегеологических исследований в подошве неогена Паннонского бассейна, Карпато-Балканид и Динарид в Сербии и Республике Сербской», внедряются подходы структурно-тектонического моделирования для контроля качества сейсмогеологической интерпретации [67].

Общая характеристика комплекса:

- комплекс характеризуется сложным структурно-тектоническим строением, большим количеством тектонических дислокаций разного типа: сбросы, взбросы, надвиги;
- сейсмическое изображение отличается от изображения в перекрывающей осадочной толще нерегулярными хаотичными фрагментами осей синфазности или "прозрачным" изображением;
- характерно отсутствие реперных горизонтов;

- для возрастной идентификации отражений обязательно наличие скважинной информации, которой, в настоящий момент, крайне недостаточно для изучения внутреннего строения ССК;
- специализированные методики по обработке сейсмических данных, такие как технология CRS (Common Reflection Surface), позволяют улучшить сейсмическое изображение, но не вносят кардинальных изменений для снижения неопределенностей в интерпретации;
- кардинальные улучшения сейсмического изображения возможны только при изменении полевых методик, направленных на получение более качественной исходной информации.

Раздел 4.2.2. Синрифтовый комплекс. ССК 1. Нижний миоцен

Отложения нижнего миоцена в пределах Паннонского бассейна сохранились локально. Их спорадическое распространение отображает наиболее погруженные и продолжавшие на тот момент погружение блоки донеогенового основания в синрифтовую фазу. Несмотря на фрагментарность распространения отложений, геологическая летопись фиксирует однотипные геологические процессы. Основная концептуальная модель образования нижнемиоценовых отложений - «шлейфы нарушенных разломами склонов» [83, 97]. По классификации Х. Рединга эти образования характерны для склонов, которые активно контролируются разломами. Обычно эти склоны имеют сложный ступенчатый профиль. Вследствие периодического характера активизации разломов формируются оползневые уступы, оползни, короткоживущие неглубокие русла. Мощный клин осадков аккумулируется в подошве склона. Существование какой-либо закономерности в распределении осадочных фаций по латерали и по разрезу не является определяющим для этого типа осадконакопления [74].

На примере Дремлянской депрессии (Сербия), стоит отметить, что отложения карпат-оттангского возраста (ранний миоцен) подстилаются отложениями так называемой «красной серии», представленными преимущественно

крупнообломочным кластическим материалом бурого и красно-бурого цвета. Возраст красноцветных отложений не подкреплён фаунистическими определениями. Предположительно, они сформированы в континентальной обстановке, в условиях сухого климата.

По данным исследования керн в отложениях «красной серии» выделяют 4 слоя (снизу вверх): переотложенная серия; переходная серия; классическая "красная серия"; слой вулканических и вулканогенно-осадочных пород [206].

Отложения переотложенной серии распространены ограниченно, в основном в пониженных частях палеорельефа. Залегают непосредственно на метаморфических породах фундамента. Представлены алевролитами и песчаниками светло-зеленого цвета, глинами красно-коричневого цвета. Переходная серия, как правило, залегают над переотложенной, в отдельных местах непосредственно на породах фундамента. Для этой толщи характерны отложения брекчиевидной структуры, сложенные фрагментами полимиктовых пород, смешанных с мелкозернистым, глинистым песчаником красноватого цвета; распространены более широко, чем толщи переотложенной серии, являются перспективным объектом исследования. Отложения классической "красной серии" представлены глинистыми породами и алевролитами темно-красного, темно-фиолетового и коричневого цвета, присутствуют песчаники и конгломераты, переслаивающиеся с алевролитами зеленого и серо-зеленого цвета. Вулканические породы андезитового состава, вулканогенно-осадочные породы (туфы и песчаники) вскрыты в отдельных скважинах.

Мощность нижнемиоценовых отложений с учетом «красной серии» в Дремлянской депрессии составляет более 900 м.

На территории Сербии, в периметре исследуемого региона нижний миоцен как правило представлен континентальными терригенными отложениями, преимущественно красных или зеленоватых оттенков. Зачастую толщи немые, без присутствия ископаемых организмов. Отложения сложены брекчиями, конгломератами, песчаниками, известняками с примесью терригенных отложений различного гранулометрического состава. Брекчии и конгломераты состоят из

обломков песчаников, алевролитов, известняков, сланцев, кварцитов, гранитоидов, серпентинитов, диабазов. Фотографии характерного керна продемонстрированы на рисунке 4.13 [97].

Для сравнения, на северо-востоке Хорватии по описанию керна в скважине отложения нижнего миоцена (оттнангий) представлены крупнозернистыми брекчиями и конгломератами, которые сменяются мощной серией конгломератов с угленосными прослоями глин толщиной в 156 м. Валуну конгломератов состоят из метаморфических и магматических пород (филлиты, амфиболитовые сланцы, андезиты и др.).



Рисунок 4.13 - Образцы керна: а – осадочная брекчия полимиктового состава; б - алевролит с неокатанными обломками гравийно-галечной размерности; в – глины с протоконкрециями и ожелезнением; г - крупнослоистый конгломератовый песчаник

К нижнемиоценовым отложениям приурочен целый ряд месторождений нефти и газа в регионе. Основные факторы, контролирующие распределение залежей УВ – фациальный и структурно-тектонический. Типы ловушек: структурные, структурно-тектонические, литологически экранированные.

Продуктивные пласты сложены преимущественно грубообломочными терригенными породами – конгломератами, брекчиями, конгломератовидными песчаниками, в меньшей степени – алевритами и разномерными песчаниками. Отмечается значительная фациальная и мощностная дифференциация отложений по площади и разрезу. Например, в пределах одного из месторождений общая мощность пластов-коллекторов изменяется от 3 до 26 м, пористость – от 6,2 до 22,2%. Дебиты нефти при испытании в колонне – от 0,2 до 50 м³/сут.

Сейсмостратиграфический комплекс, сопоставляемый с отложениями нижнего миоцена, в подошве ограничивается поверхностью донеогенового основания, в кровле – отражающим горизонтом, стратиграфически идентифицируемым как кровля отложений нижнемиоценового возраста. Отражение от поверхности донеогенового основания, как правило, является комплексным откликом, изменчивым по латерали, в зависимости от изменения акустических свойств пород, слагающих основание и пород в перекрывающей его толще. Как результат – отсутствие четко выраженного опорного горизонта на границе «фундамент – осадочный чехол» и неопределенность в его корреляции. Сейсмическое отражение, сопоставляемое с кровлей нижнего миоцена также сильно изменчиво по латерали.

ССК на сейсмическом разрезе характеризуется чередованием протяженных и локально выраженных осей синфазности. Некоторые особенности сейсмического изображения на разрезах и слайсах можно связать с этапами активного поступления материала, заполняющего впадины палеорельефа [205]. Выделить этапы можно только условно, так как процесс происходил непрерывно-прерывисто. Каждый из этапов включает в себя подэтапы с событиями более локального характера или более кратковременные по продолжительности.

На рисунках 4.14 и 4.15 показано характерное изображение в интервале ССК 1.

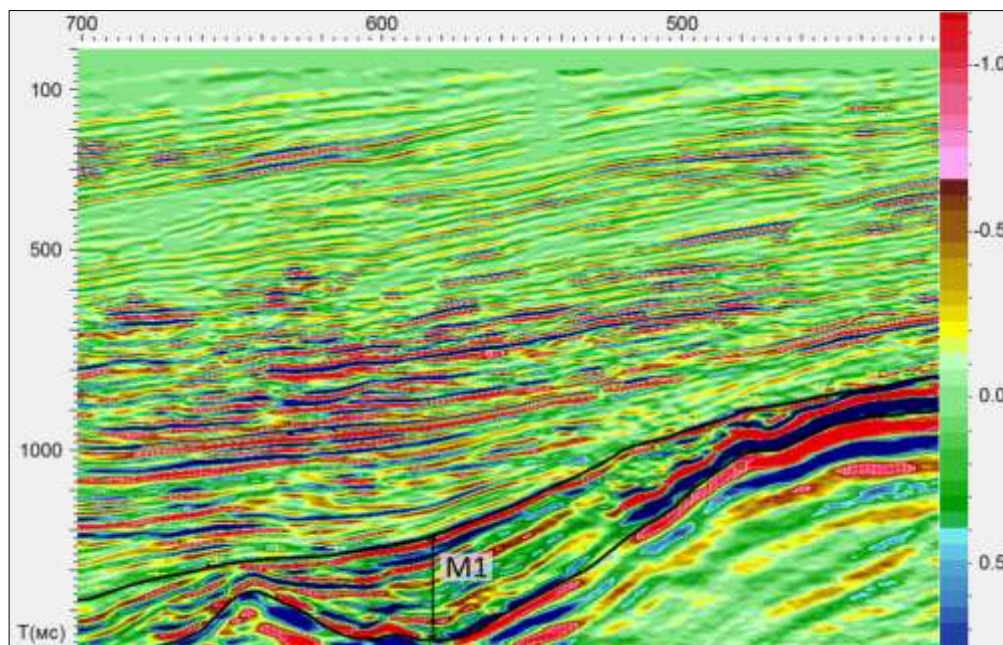


Рисунок 4.14 - Пример сейсмического изображения, характерного для ССК 1 на временном разрезе

Условные обозначения: цветовая шкала соответствует относительной интенсивности амплитуд; нумерация трасс произведена через 20 метров (горизонтальный масштаб)

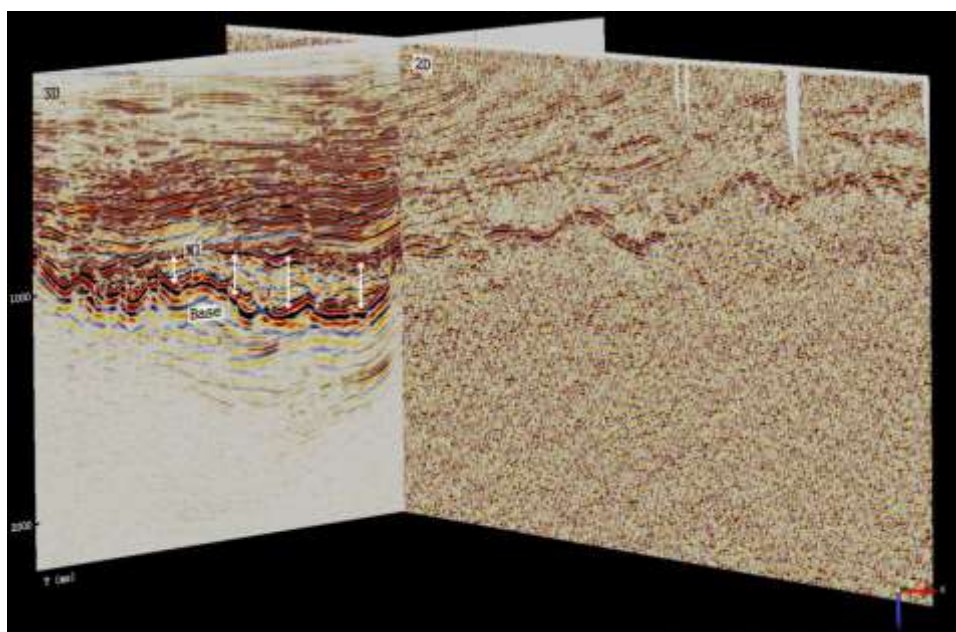


Рисунок 4.15 - Пример сейсмического изображения в интервале фундамента и нижнемиоценовых отложений (Дремлянская депрессия)

На рисунке 4.16 представлен разрез по линии скважин, полученный путем классификации нескольких динамических атрибутов в пределах профиля и заданного интервала. Протяженные оси синфазности в кровле указанного интервала имеют локальное распространение и приурочены к границе первого крупного цикла, в течение которого происходило нивелирование палеорельефа донеогенового основания. В соответствии с этим можно предположить наличие в кровле нижнемиоценовых отложений латерально выдержанных пластов-коллекторов (пунктир terrакотового цвета). В пределах террасы, сейсмический разрез резко меняется. Можно наблюдать протяженные оси синфазности вблизи отражающего горизонта, отождествляемого с поверхностью фундамента (пунктир зеленого цвета), и обрывки наклонных осей синфазности в пределах всей временной мощности интервала исследований (пунктир синего цвета). Последние, позволяют предположить отсутствие латерально выдержанных пластов на этом участке месторождения.

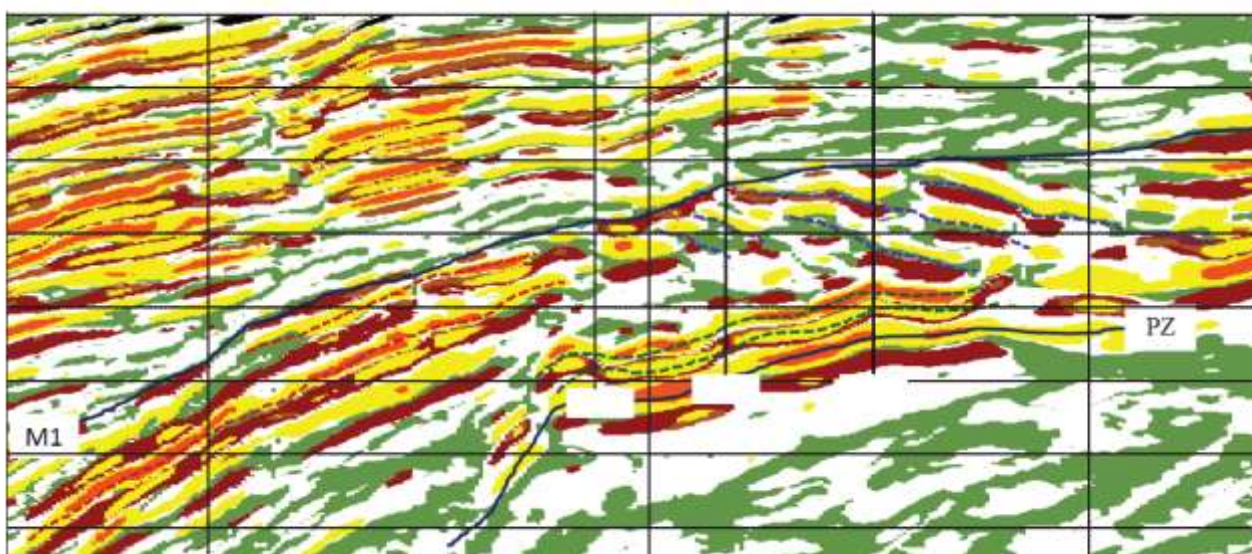


Рисунок 4.16 - Разрез по линии скважин в пределах действующего месторождения, полученный путем классификации нескольких динамических атрибутов

На рисунке 4.17 демонстрируется концептуальная модель, сформированная на основе среза, полученного в пределах целевого интервала с применением спектральной декомпозиции и RGB смешивания. Визуализация среза выполнена путем совмещения с гипсометрической поверхностью фундамента.

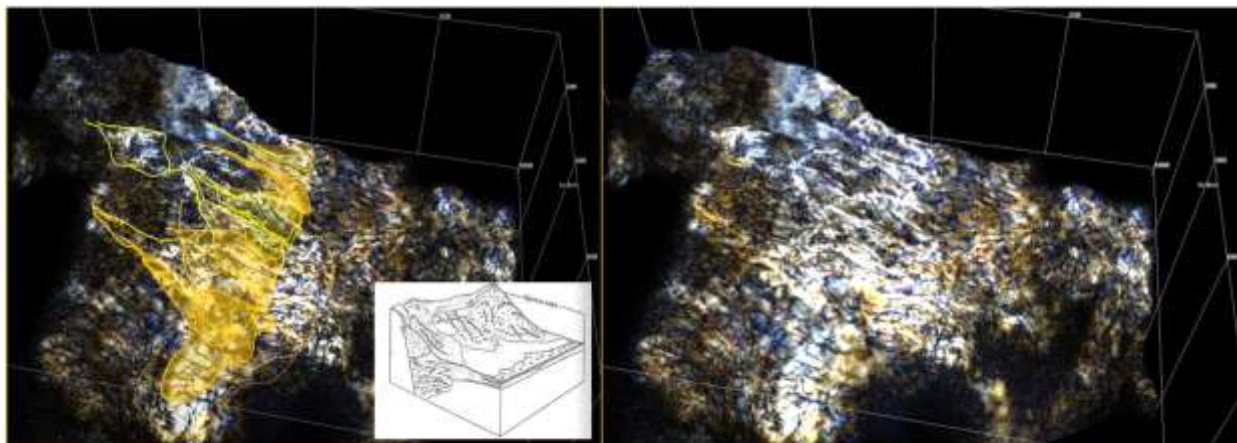


Рисунок 4.17 - Слайс, полученный в целевом интервале с применением спектральной декомпозиции и RGB смешивания, совмещенный с рельефом поверхности фундамента

Тестирование различных приемов интерпретации, таких как анализ седиментационных и погоризонтных слайсов различных атрибутов сейсмической записи, классификация целевого интервала по форме трассы для выявления отдельных событий и литологических особенностей, позволяет сделать вывод, что сейсмические данные отображают неоднородность нижнемиоценовой толщи с точки зрения процесса ее формирования.

Общая характеристика ССК 1:

- локальное распространение комплекса, приуроченность к наиболее погруженным частям депрессий;
- ограничивается поверхностью донеогенового основания в подошве и отражающим горизонтом, стратиграфически идентифицируемом как кровля отложений нижнемиоценового возраста в кровельной части;
- концептуальная модель образования - «шлейфы нарушенных разломами склонов, сложенные отложениями пролювиальных конусов выноса, селей и временных водотоков, оползневymi образованиями»;
- в сейсмическом изображении отмечаются как протяженные оси синфазности, так и фрагментарно выраженные; на отдельных разрезах визуально идентифицируются наклонные оси синфазности, характерные для оползневых образований.

4.2.3. Синрифтовый комплекс. ССК 2. Средний миоцен

В соответствии с региональной стратиграфической схемой среднемиоценовые отложения в изучаемом регионе (территория Центрального Паратетиса) подразделяются на баденский и сарматский ярусы, частично к ним относятся низы паннонского яруса. В Восточном Паратетисе баденским отложениям соответствует тархан, чокрак, караган и конка; сарматским и паннонским – сармат [22, 100].

Отложения среднего миоцена сформированы в синрифтовую фазу развития бассейна и представляют собой базальные образования, перекрывающие палеозойско-мезозойское основание или толщи нижнего миоцена. Начало баденского времени ознаменовалось крупной трансгрессией, которая привела к открытию коридора сообщения с Мировым океаном через Словению и север Хорватии. Осадконакопление происходило в условиях разобщенных бассейнов, сообщение между которыми периодически восстанавливалось. [4, 98, 149, 156, 184, 188, 193].

Отложения баденского возраста представлены обломочными породами, карбонатными, отмечается широкое присутствие вулканогенного материала. Фотографии характерных образцов кернa представлены на рисунке 4.18.

Нижний баден сложен брекчиями, конгломератами, конглобрекчиями, гравелитами, песчаниками, алевролитами, отмечаются карбонатные включения с фауной мелководных бентосных фораминифер (*Heterostegina*, *Amphistegina*, *Elphidium*, *Cibicides*). Карбонаты представлены как мелководными известняками, богатыми окаменелостями, характерными для рифовых комплексов (*Lithothamnium*, *Lithophylum*, etc), так и известняками, образовавшимися в более глубоководных условиях, включающими фораминиферы пелагиали (*Praeorbulina glomerosa circularis*, *Orbulina suturalis*, *Globigerinoides bisphericus*, *G. trilobus*, *G. quadrilobatus*, *Globigerinopsis grilli*, *Globigerina praebulloides*, *Globigerina bulloides*, *G. concinna*).

Средний баден сложен, в основном, обломочными породами (песчаники, мергели и др.).

Верхний баден характеризуется развитием карбонатно-обломочных пород, в состав которых входят органогенно-детритовые известняки, мергелистые известняки и песчаники.

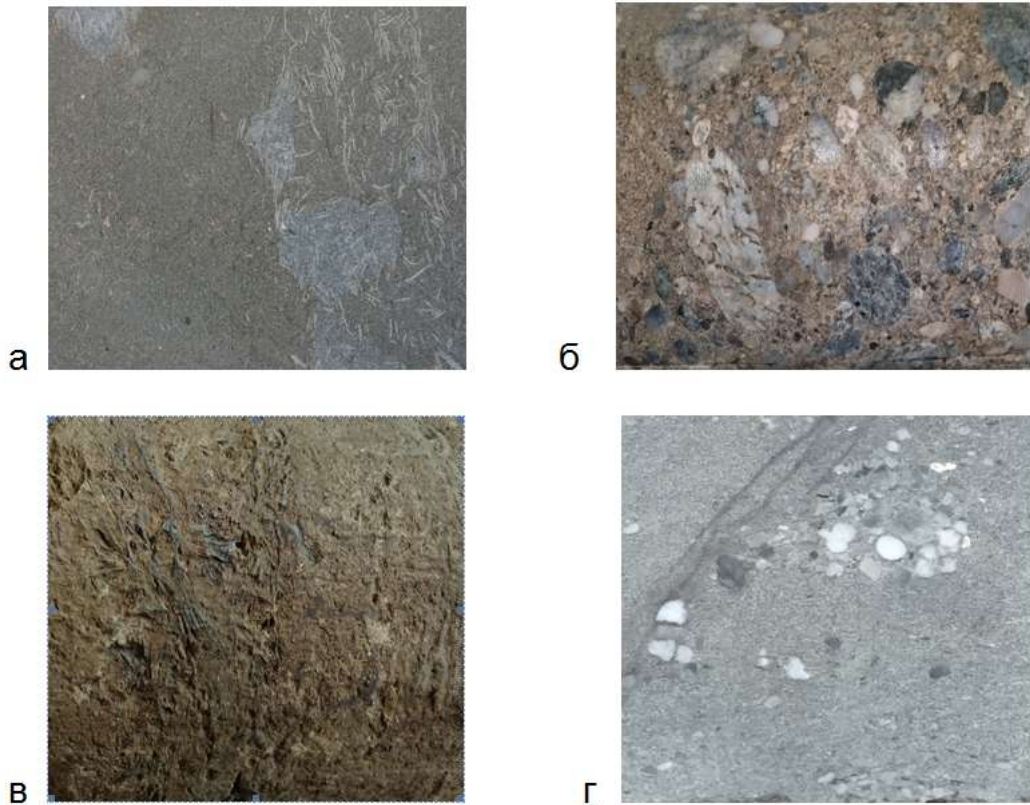


Рисунок 4.18 - Образцы керна: а - песчаник известковый средне-мелкозернистый с микрофоссилиями; б - конгломераты с песчаным матриксом; в - песчаник крупно-среднезернистый нефтенасыщенный с раковинным детритом; г - песчаник мелкозернистый с гравием

Сарматские отложения накапливались преимущественно в мелководно-морских условиях. Геологические события, происходившие в сарматское время, подробно описаны в работе Р.Йовановича (2010) [178]. Автор выделяет три фазы: фазу площадного карбонатного осадконакопления в раннем сармате и последующие две фазы активных тектонических движений в раннем и позднем сармате, которые привели к формированию расчлененного рельефа, впоследствии

эродированного, чем и объясняется локальное распространение сарматских отложений в палеопогруженных участках донеогенового основания.

Отложения нижнего сармата представлены конгломератами, песчаниками, глинистыми мергелями, породами вулканогенно-осадочного комплекса, органогенными известняками, тонкослоистым переслаиванием глин, алевролитов, мергелей, песчаников).

Верхний сармат характеризуется наличием песчаников, мергелистых песчаников, мергелей и алевролитов.

Детальная стратиграфия внутри комплекса среднемиоценовых отложений возможна только на основе микропалеонтологического анализа. Для отложений сармата характерно присутствие *Quinqueloculina longirostra*, *Q. hauerina*, *Q. akneriana*, *Elphidium aculeatum*, *E. crispum*, *E. antoninum*, *E. josephinum*, *E. hauerinum*, *Porosonion granosum*, *Triloculina consobrina*, *T. austriaca*, *T. inflata*, *Aurila notate*, а также моллюсков e.g. *Maetra* sp., *Ervilia* sp., *Modiolus incrassatus*, *Irus gregarius*, *I. vitalianus*, *Cardium* sp., *Pirenella pieta*, *Calliostoma* sp., *Gibbula* sp., *Calliostoma conitesta*, *Hydrobia frauenfeldi*, *Dorsanum* sp.

По данным скважин толщина баденских отложений составляет от 1 м в скважине Kaba-D-1 (Венгрия) до 2385 м в скважине Ortahaza_Ny-1 (Венгрия), толщина сарматских отложений: от 2 м в скважине Конак-1 (Сербия) до 835 м в скважине Тополовник-1 (центральная Сербия).

Отложения бадена и сармата распространены не повсеместно, четких площадных границ ССК не закартировано. В большинстве случаев отложения среднего миоцена представляют собой базальные образования, перекрывающие палеозойско-мезозойское основание или отложения нижнего миоцена. В зависимости от этого, по-разному определяется нижняя граница ССК.

Отражение от поверхности донеогенового основания в регионе, как правило, является комплексным откликом. С этим связаны проблемы интерпретации отражающих горизонтов, характеризующих распределение комплексов нижнего и среднего миоцена. Целевые интервалы разреза в миоценовых отложениях вблизи поверхности основания, как правило, осложнены

интерференцией, представлены фрагментами осей синфазности, которые не поддаются объективной фазовой корреляции. Дополнительные осложнения в волновое поле вносят многочисленные тектонические нарушения. Характерное сейсмическое изображение показано на рисунке 4.19. В результате в интерпретацию отражающих горизонтов закладывается высокая неопределенность, которая приводит к негативным результатам геологоразведочного процесса.

В пределах участков, характеризующихся полным разрезом отложений среднемиоценового возраста, на сейсмических разрезах можно выделить интервалы с «морским» заполнением и «континентальным». В первом случае сейсмическое изображение более контрастно и состоит из достаточно протяженных и амплитудновыраженных осей синфазности; во втором случае выглядит более приглушенно и хаотично. Причина кроется в близости по составу обломочной части баденских отложений и пород фундамента. Большинство отражений носит интерференционный характер.

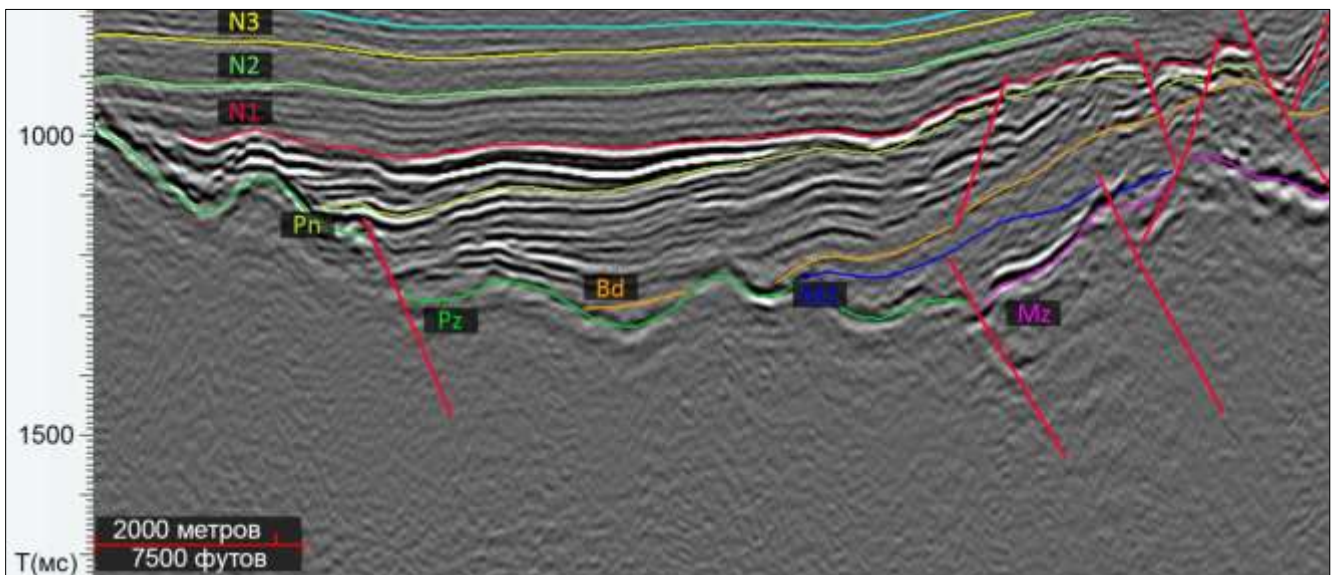


Рисунок 4.19 – Временной разрез с примером характерного сейсмического изображения для интервала, ассоциированного с отложениями бадена

Отложения сарматского возраста более широко распространены по площади, но имеют небольшую мощность, что затрудняет их картирование.

Верхней границей комплекса является акустическая граница на контакте с отложениями паннонского возраста и понта.

Явно выраженных геологических событий в сейсмическом материале ССК 2 не наблюдается. Погоризонтные слайсы, как правило, характеризуются мозаичной картиной. Но возможность подобрать поисковый критерий на основе особенностей сейсмического изображения сохраняется. Это могут быть более четко выраженные фазы, локальные амплитудные максимумы или минимумы. Примером эффективно сформированного поискового критерия на основе особенностей сейсмического изображения служит открытие месторождений-спутников в регионе Средний Банат [105]. Целевой интервал, соответствующий отложениям сармата характеризуется наличием четкой фазы с аномальными экстремумами и по своим характеристикам сопоставим с аналогичным интервалом на уже открытом месторождении, проиллюстрирован на рисунке 4.20.

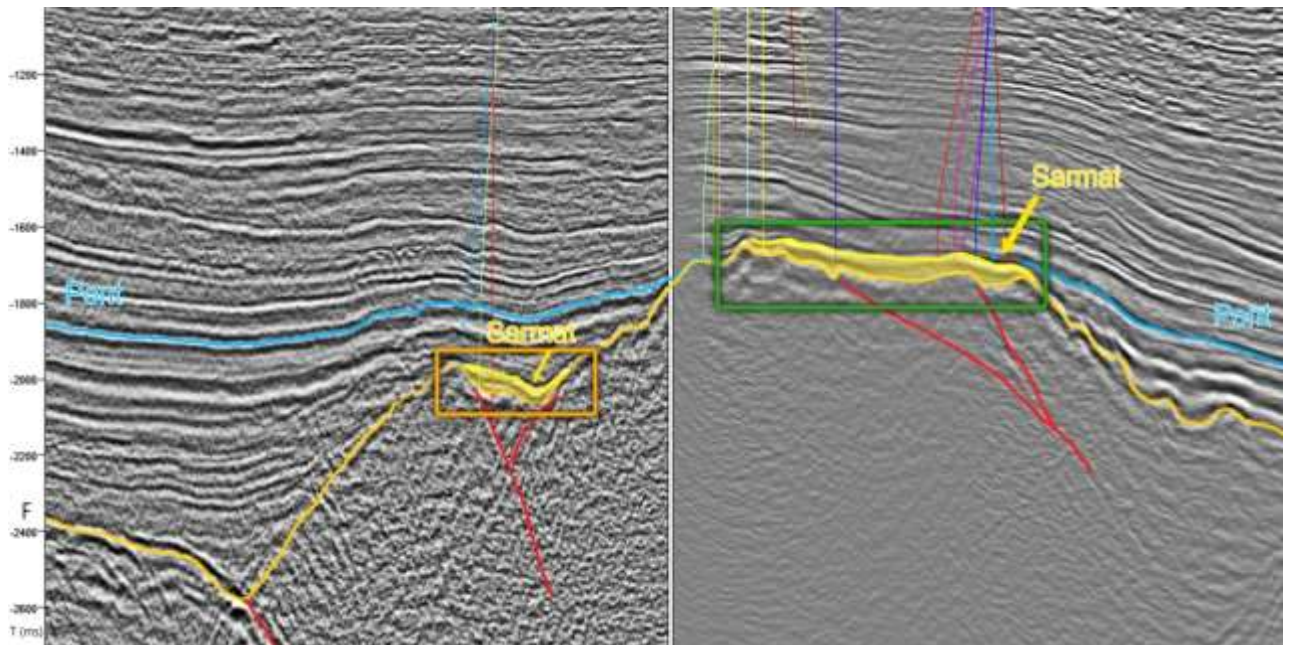


Рисунок 4.20 - Региональный сейсмический профиль, демонстрирующий положение в разрезе отложения сарматского возраста; в зеленом контуре - сарматские продуктивные отложения одного из крупных месторождений, в оранжевом контуре – месторождение-спутник [105]

На рисунке 4.21 демонстрируется стратиграфическая идентификация целевого интервала исследований и характер изменчивости амплитуды в его пределах.

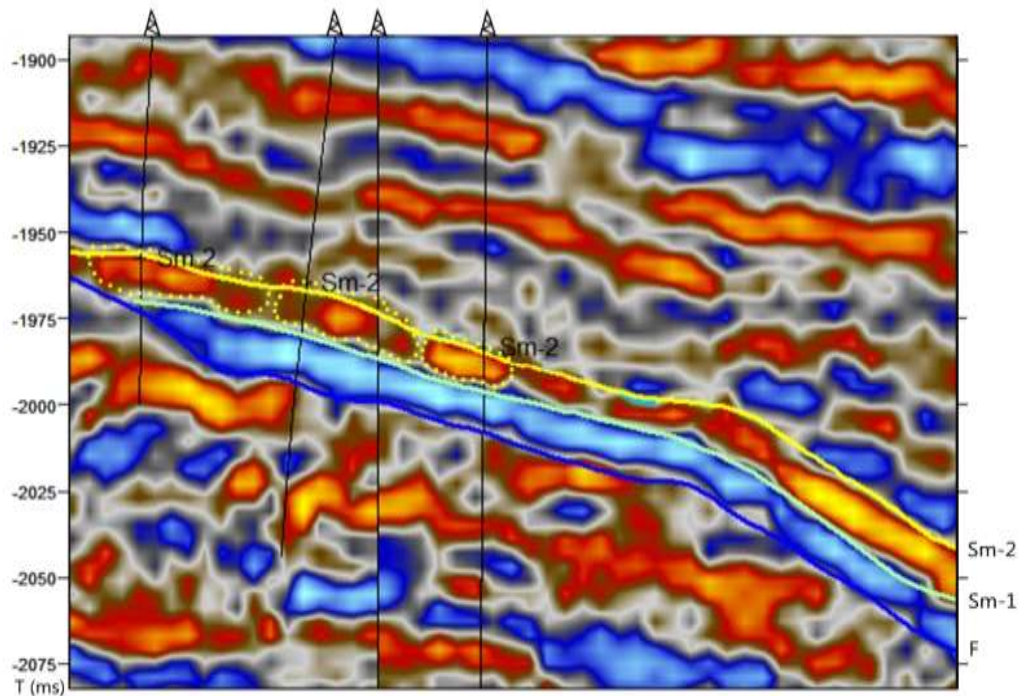


Рисунок 4.21 - Особенности сейсмического изображения в целевом интервале; расстояние между скважинами ориентировочно 400-500 м

В совокупности с другими поисковыми критериями, такими как наличие выступа в донеогеновом основании, локальное распространение отложений; факт наличия следов нефти по результатам испытаний в одной из близко расположенных поисковых скважин особенности сейсмического изображения сыграли свою роль в открытии двух месторождений-спутников.

На сейсмических разрезах, один из которых представлен на рисунке 4.22, выявленные объекты узнаваемы по динамическим характеристикам в целевом интервале исследований. Опираясь на этот ключевой критерий, было продолжено изучение зоны выклинивания среднемиоценовых отложений, но большинство выявленных объектов оказались нерентабельными. На рисунке 4.23 продемонстрированы результаты классификации целевого интервала по форме трассы, выполненной с целью локализации объекта.

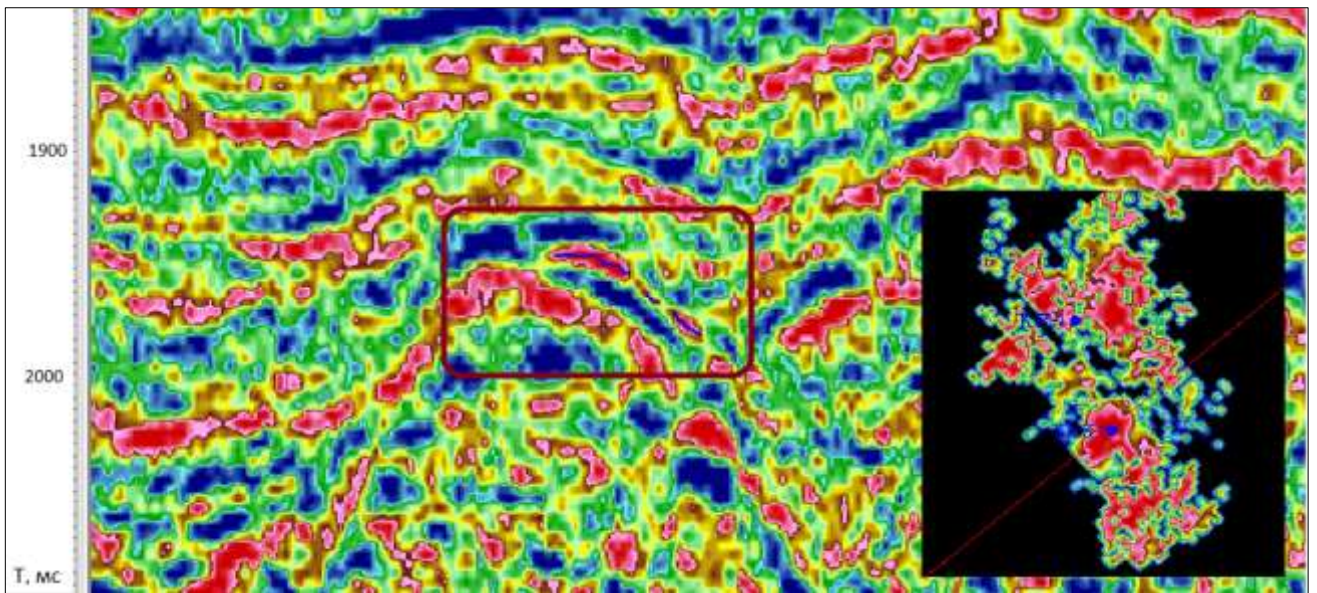


Рисунок 4.22 - Временной разрез с интерпретацией целевого отражающего горизонта; на карте – результаты автоматической корреляции с амплитудными характеристиками; расположение профиля на карте показано линией красного цвета

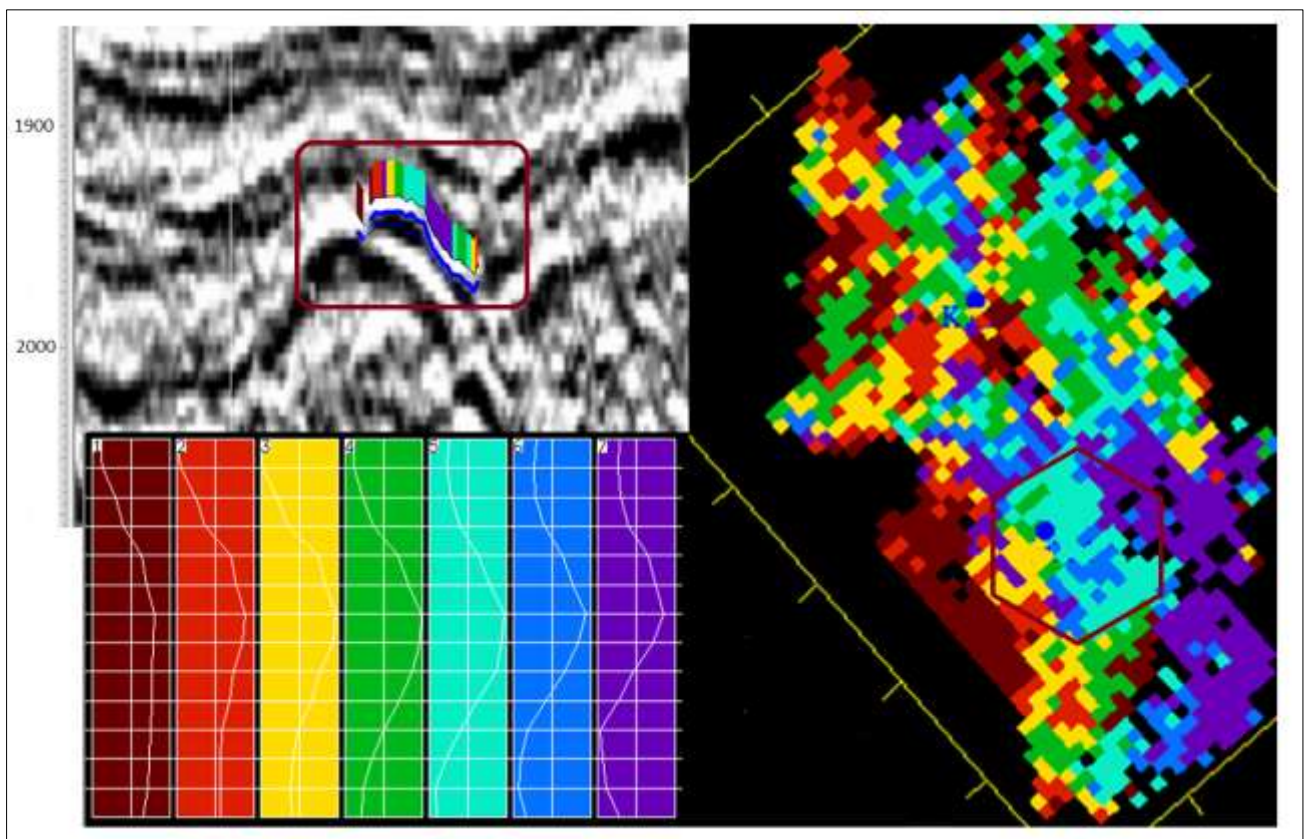


Рисунок 4.23 - Результаты классификации целевого интервала по форме трассы, подчеркивающий локальность объекта

Общая характеристика ССК 2:

- локальный характер распространения, отсутствие опорных отражающих горизонтов в кровле и в подошве комплекса;
- детальная стратиграфия внутри комплекса среднемиоценовых отложений возможна только на основе микропалеонтологического анализа; высокая неопределенность в стратиграфических разбивках по скважинным данным;
- интерференционный характер сейсмического изображения вблизи поверхности фундамента, влияние на волновое поле большого количества разломов;
- высокая неопределенность при прослеживании отражающих горизонтов, ассоциированных с кровлей бадена или сармата;
- погоризонтные слайсы, как правило, характеризуются мозаичной картиной, явно выраженных геологических событий не наблюдается;
- особенности сейсмического изображения, в совокупности с другими геологическими факторами могут быть основой для поискового критерия.

4.2.4. Пострифтовый комплекс. ССК 3. Верхний миоцен (паннон, нижний понт)

В пределах Сербии верхнемиоценовые отложения несогласно залегают на среднемиоценовых, подразделяются на паннонский и понтийский комплексы. Изменение окружающей среды на границе сармата и паннона, в том числе снижение солености, привело к исчезновению морской биоты и диверсификации эндемичных моллюсков и остракод, (Papp et al., 1985).

Паннонские отложения формировались, в основном, в глубоководных озерных условиях, имеют более широкое распространение, чем среднемиоценовые отложения, представлены мергелями, известняками,

переслаиванием глин и песчаников, являются нефтематеринской толщей. Фотографии характерных образцов кернa представлены на рисунке 4.24. Их стратиграфическая идентификация строится, в основном, на озерной биоте. По оценкам разных исследователей, максимальная глубина Паннонского моря-озера составляла около 1000 м. В последующем, глубины заметно уменьшились, и проградационная толща формировалась уже в бассейне глубиной от 300 до 600 м [46].

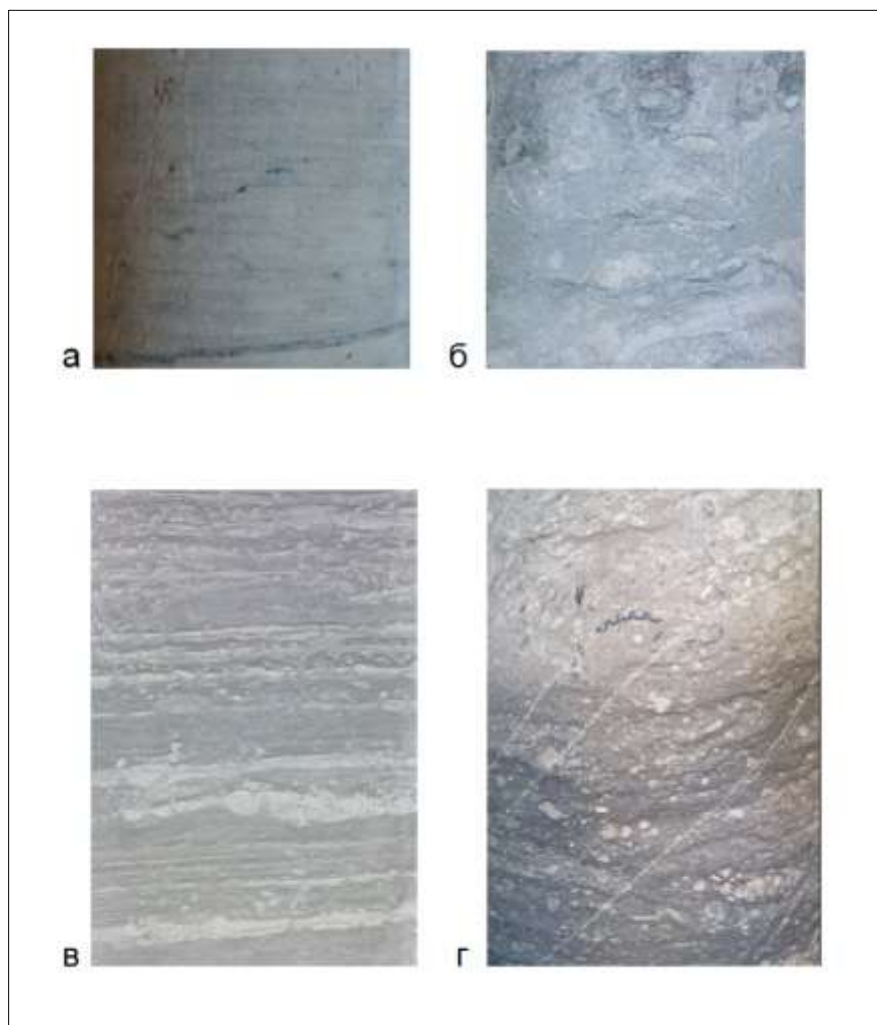


Рисунок 4.24 - Образцы кернa: а – мергель; б - глинистый интракластовый известняк; в – переслаивание глин и песчаников; г – органогенно-обломочный известняк

Паннонские отложения перекрывают основание, ниже и среднемиоценовый комплексы. В венгерской части бассейна им соответствуют формации Endrod и Szolnok.

Нижний понт в регионе представлен отложениями мергелисто - глинисто – песчанной ассоциации, которая характеризуется чередованием серых до темно-серых мергелей, песчаных мергелей, однородных глинистых мергелей, серо-коричневых мергелистых известняков со слоями и прослойками серых мелкозернистых карбонатных песчаников и песков. Стратиграфическая принадлежность отложений нижнего понта обычно определяется по богатой фауне моллюсков, указывающей на солоноватоводные условия.

Для ССК 3 на сейсмических разрезах характерны выдержанные, достаточно хорошо прослеживаемые отражения.

Кровлю ССК 3, подошву непосредственно клиноформного комплекса, в пределах отдельной съемки отследить достаточно сложно, так как отражение, принятое за базу проградации может оказаться фондоформной частью предыдущего клиноциклита. Поэтому в процессе площадной интерпретации очень важно учитывать региональную модель. Пример сейсмического изображения приводится на рисунке 4.25.

В пределах бортовых частей депрессий на палеоизохронных слайсах отмечаются локальные зоны, по форме интерпретируемые как конусы выноса. Вдоль осевых направлений депрессий выделяются характерные только для этого интервала образования в стиле оползневых «потоков». На разрезах они проявляются в хаотичном изображении, уверенно опознаются на седиментационных (погоризонтных) слайсах, в плане имеют вытянутые очертания. Такое распределение конусов выноса и оползневых потоков свидетельствует о трех направлениях в заполнении депрессий: с бортов и вдоль осевой части. Предположительно, формирование оползневых потоков происходило в момент активизации тектонических движений.

Общая характеристика ССК 3:

- в интервале, соответствующем ССК, отмечаются выдержанные, достаточно хорошо прослеживаемые отражения;
- кровля комплекса является подошвой проградационной серии;
- на палеоизохронных слайсах отмечаются формы, характерные для конусов выноса и оползневых потоков.

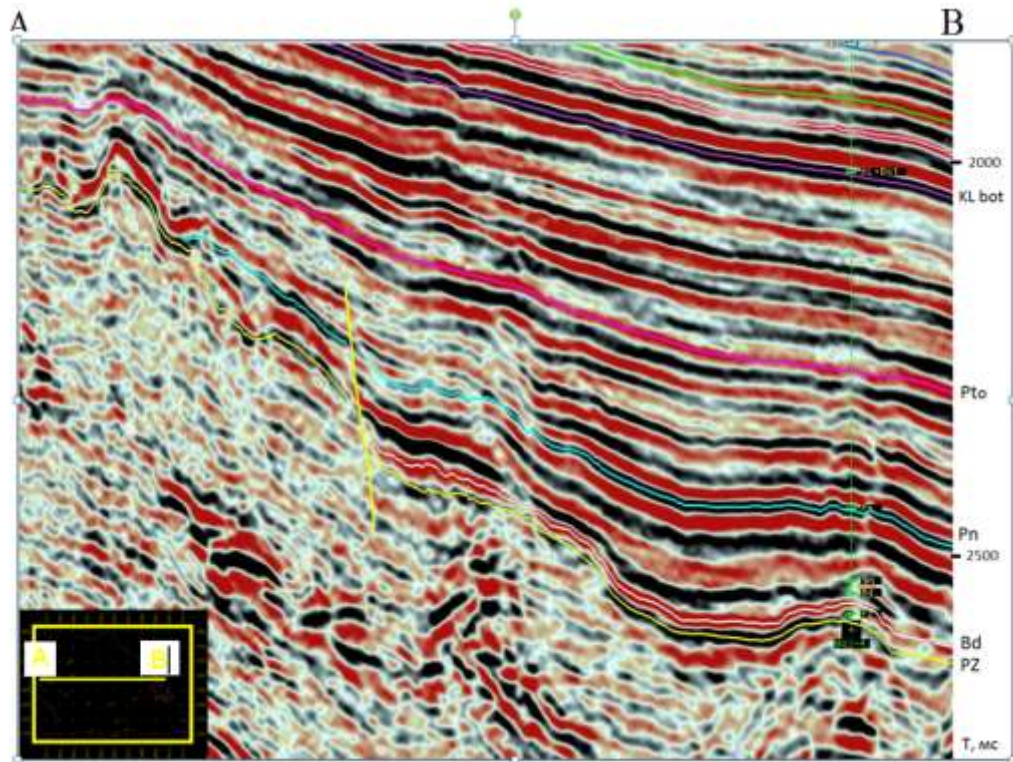


Рисунок 4.25 - Пример сейсмического изображения в интервале, ассоциированном с отложениями паннона (интервал между отражающими горизонтами Vd и Pn)

4.2.5. Пострифтовый клиноформный комплекс. ССК 4. Верхний миоцен (понт)

В течение понта Паннонский бассейн активно заполнялся, образованный клиноформный комплекс представлен преимущественно терригенными отложениями. Характерные образцы керна представлены на рисунке 4.26. Глубина бассейна оценивается в 300-600 м, длина склона в 5-7 км, угол наклона в 1-2° (Sztano, 2013; Horvath, 2015).



Рисунок 4.26 - Образцы керна: песчаники мелко-среднезернистые, с прослоями глинистых интракластов, частое неравномерное переслаивание глин и песчаников, зачастую нарушенное мелкой преимущественно горизонтальной биотурбацией

В толще понтийского и плиоценового возрастов на площади исследований к настоящему моменту выявлено 97 месторождений углеводородов: 46 месторождений находится в отложениях нижнего понта, 33 – в отложениях верхнего понта и 18 – в отложениях плиоцена. Одна шестая часть запасов и ресурсов сосредоточена в отложениях верхнего понта и плиоцена, остальные - в отложениях нижнего понта.

Типы ловушек: структурные, структурно-тектонические, литологические и комбинированные.

Отражающие горизонты, сопоставляемые с подошвой и кровлей клиноформного комплекса, как правило, прослеживаются локально и не относятся к категории региональных реперных горизонтов.

Для сейсмического разреза ССК характерно наличие сигмоидных амплитудно выраженных отражений. Составляющие их оси синфазности по падению и восстанию сближаются с осями синфазности, характеризующими отражающие границы в подстилающих и перекрывающих интервалах. Отражающие горизонты прослеживаются фрагментарно, в пределах локальных

участков. Типичный характер сейсмического изображения продемонстрирован на рисунке 4.27.

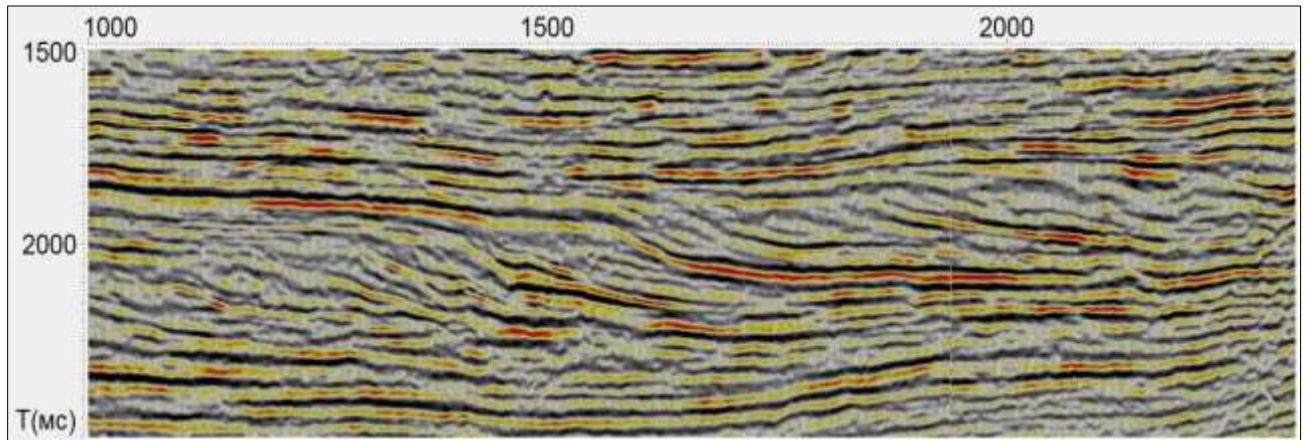


Рисунок 4.27 - Типичный временной разрез клиноформного комплекса; нумерация трасс произведена через 20 метров (горизонтальный масштаб)

В пределах ССК выделяются фрагменты с нерегулярным хаотичным изображением как показано на рисунке 4.28.

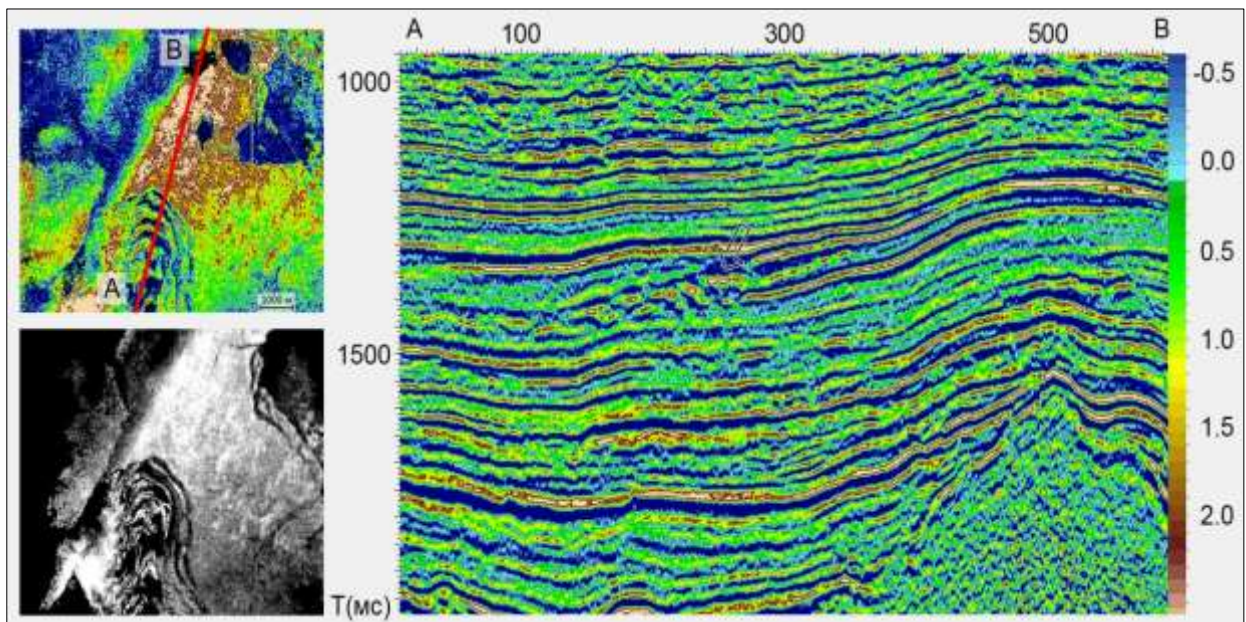


Рисунок 4.28 - Отображение оползневых образований на погоризонтном слайсе и временном разрезе (ССК 4)

Условные обозначения: цветовая шкала соответствует относительной интенсивности амплитуд; нумерация трасс произведена через 20 метров (горизонтальный масштаб)

Эти фрагменты отождествляются с образованиями, сформированными гравитационными процессами. В отдельных случаях хаотичность имеет определенную внутреннюю структуру, выраженную в серии субпараллельных, наклонных к общему тренду осей синфазности.

Сейсмогеологические условия ССК 4 способствуют изучению целостной системы: шельф – склон – подножие. На погоризонтных слайсах, соответствующих палеоизохронным поверхностям, отображаются дельтовые палеоканалы в шельфовой части, подводящие каналы конусов выноса на склоне и в подножии склона, лопасти конусов выноса. Один из подобных примеров приводится на рисунке 4.29.

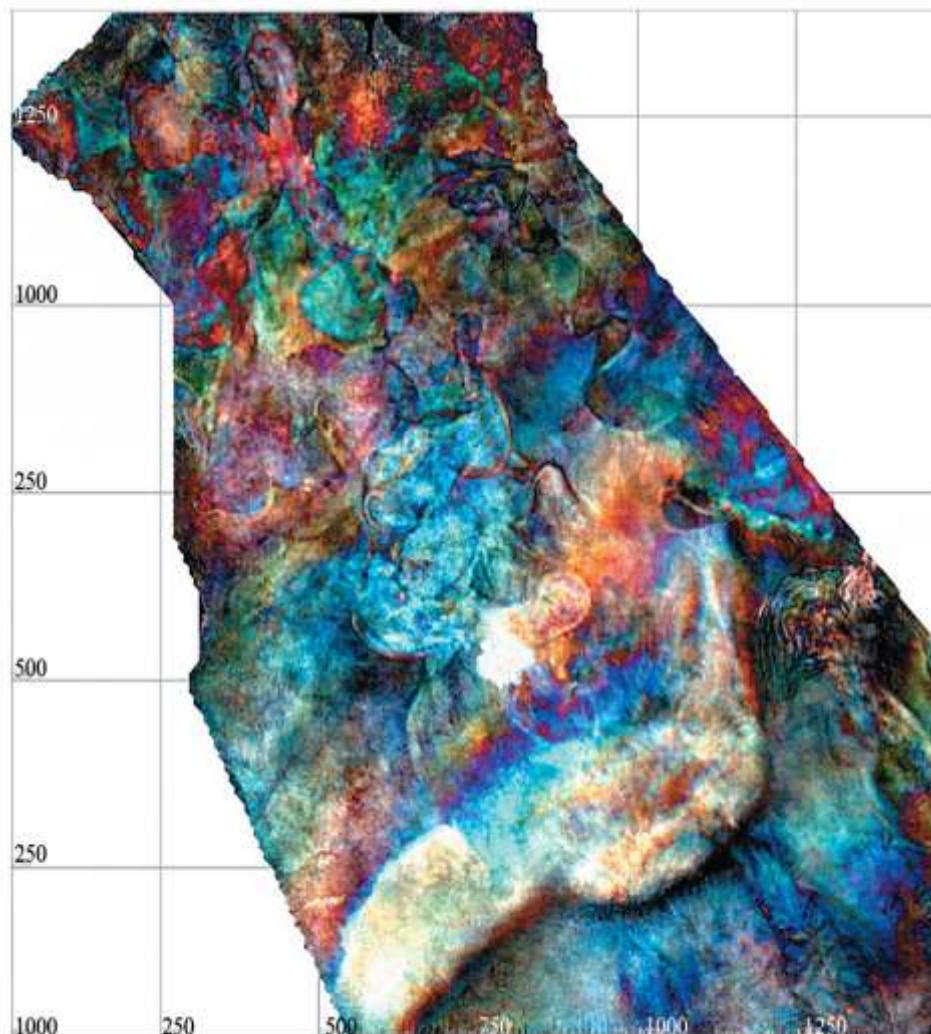


Рисунок 4.29 – Седиментационный слайс, полученный средствами спектральной декомпозиции и RGB смешивания [93]

Особенностью ССК является наличие аномалий типа «яркое пятно». На рисунке 4.30 проиллюстрировано проявление амплитудной аномалии на сейсмическом сечении в клиноформном комплексе, которой соответствует лопасть конуса выноса на погоризонтном слайсе. Применение этого эффекта в качестве поискового критерия в конце 80-х годов ознаменовалось открытием газового месторождения Житиште. Позднее были открыты еще несколько небольших залежей. Однако, результаты бурения последних лет не подтверждают связь аномалий исключительно с наличием УВ.

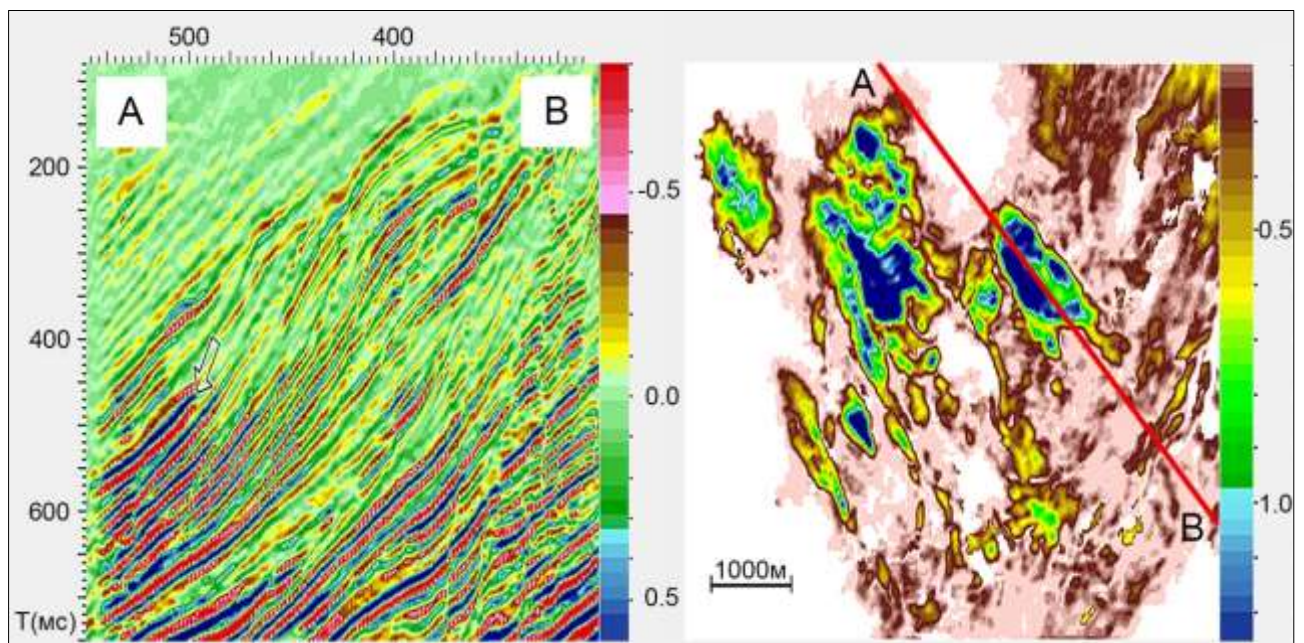


Рисунок 4.30 – Проявление на сейсмическом сечении амплитудной аномалии в клиноформном комплексе, которой соответствует лопасть конуса выноса на погоризонтном слайсе

Условные обозначения: цветовые шкалы соответствуют относительной интенсивности амплитуд; нумерация трасс на разрезе произведена через 20 метров (горизонтальный масштаб)

Общая характеристика ССК 4:

- повсеместное распространение;
- отсутствие реперных отражающих горизонтов в кровле и подошве комплекса;

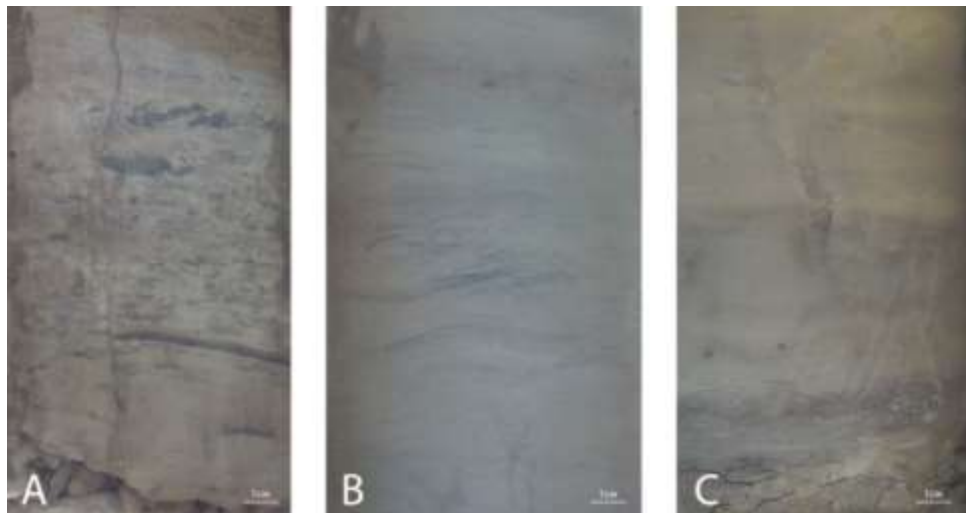
- наличие характерных для клиноформных комплексов сигмоидных, амплитудно-выраженных отражений;
- возможность интерпретации на погоризонтных слайсах целостной системы «шельф – склон – подножие».
- наличие интервалов с фрагментами нерегулярных хаотических осей синфазности, отображающих масштабные оползневые процессы в неконсолидированных озерных толщах;
- наличие аномалий типа «яркое пятно», некоторые из них связаны с лопастями и подводными каналами конусов выноса.

4.2.6. Пострифтовый комплекс. ССК 5. Верхний миоцен (верхний понт)

– плиоцен

Клиноформный комплекс перекрыт отложениями верхнего понта и плиоцена, сформированными в условиях обширной озерно-аллювиальной равнины [185, 194].

Разрез представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, мергелей, глинистых отложений, а также угольных пластов и прослоев. Фотографии характерных образцов керна приводятся на рисунке 4.31.



**Рисунок 4.31 - Фотоснимки керна: А, В - руслового аллювия;
С – пойменных отложений**

Песчаники от средне-мелкозернистых до мелкозернистых, переходящих в алевролиты, средне и хорошо сцементированные. Цемент известково-глинистый или глинистый. Углистые отложения содержат много древесных фрагментов, глинистые - большое количество мелкого углефицированного растительного детрита и остатков макрофауны. Глинистые компоненты часто перекристаллизованы в серицит [83].

Интервал сейсмического разреза, сопоставимый с толщиной отложений верхнего понта – плиоцена, характеризуется прерывистыми осями синфазности, наличием локальных аномалий, отсутствием латерально выдержанных (устойчивых по латерали) опорных отражающих горизонтов, представлен на рисунке 4.32. Отражения, ассоциированные с границами нижний понт – верхний понт и верхний понт – плиоцен, как правило, интерференционные и динамически невыдержанные .

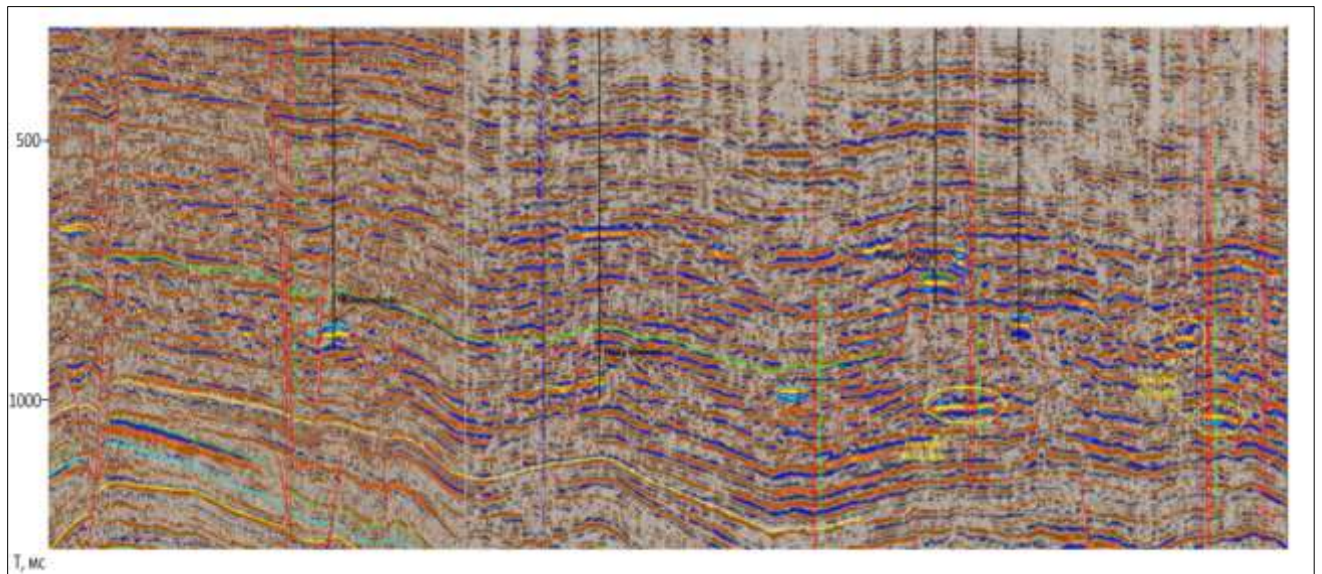


Рисунок 4.32 - Характерное для региона сейсмическое изображение соответствующее ССК 5

По данным сейсмофациального анализа в отложениях понт-плиоценового возраста Паннонского бассейна можно предположить развитие разветвленных рек, многочисленные русла которых разделены намывными островами, сложенными в основном песчаным материалом. По сейсмическим данным

определено доминирующее субмеридиональное направление русел, что отражает положение геоструктурных элементов и направленность тектонических движений. В отдельных случаях отмечаются участки ограниченного меандрирования, которые могут быть связаны как со стабилизацией тектонического режима, так и с процессами воздымания территории. В течение верхнего понта и плиоцена в регионе продолжалась активная тектоническая деятельность, как в центральной части бассейна, так и на его периферии. В совокупности с глобальными вариациями климата тектонические процессы повлияли на питание рек и густоту речной сети, на эрозионные процессы (при воздымании блоков), на морфологию речных долин и их изменение, направление русел.

В толще верхнего понта и плиоцена разведаны и разрабатываются небольшие газовые залежи, приуроченные к локальным поднятиям. По мере поступления сейсморазведочных данных МОГТ 3D изменяются концептуальные модели месторождений. Результаты сейсмофациального анализа демонстрируют, что большинство структурных ловушек таковыми не являются, а представляют собой структурно-литологические образования.

На рисунке 4.33 приводится результат интерпретации сейсмических данных по одному из таких месторождений. Две скважины, расположенные в пределах амплитудных аномалий „bright spot“ вскрыли интервалы, из которых получен приток газа. К этим объектам был проявлен особый интерес, проведен комплексный анализ керновых, каротажных и сейсмических данных. Седиментационный анализ керна свидетельствует о преобладании континентальной среды осадконакопления на момент формирования отложений: косая и горизонтальная слоистость, наличие древесных обломков, прослоев угля.

На первом этапе выполнялась «техническая корреляция» по скважинам с выделением границ песчаных тел по данным ГИС.

При сопоставлении детальной схемы корреляции продуктивных пластов, выполненной на основе только скважинных данных с сейсмическими разрезами, обнаружилось их некорректное прослеживание по латерали. Дальнейшее

уточнение корреляции основывалось на поинтервальном сопоставлении скважинных данных с результатами спектральной декомпозиции, так как на слайсах отчетливо проявились объекты шнуркового типа шириной от 120 до 150 м. В пределах изучаемой площади они прослеживаются на 10 – 15 км.

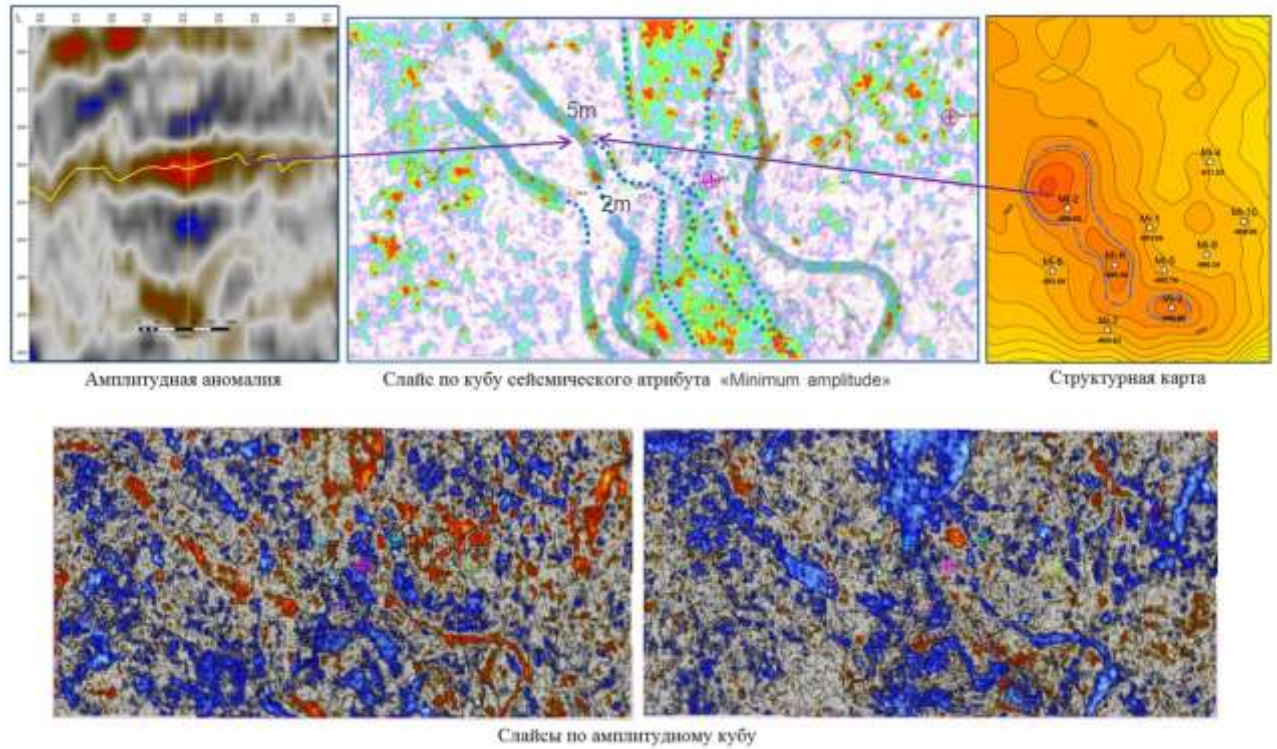


Рисунок 4.33 - Объектно-ориентированная интерпретация в пределах одного из действующих месторождений

Совместный анализ латерального распределения выявленных объектов и формы каротажных диаграмм (GR, PS) в целевом интервале исследований, позволил идентифицировать фации русел и поймы. Русловые фации отличаются от вмещающих отложений высоким коэффициентом песчаности (NTG) - до 0.7, их эффективная мощность составляет около 7 м, коэффициент пористости - 24%. В результате второго этапа исследований была получена карта сейсмических фаций, представленная на рисунке 4.34 и литофациальная геологическая модель.

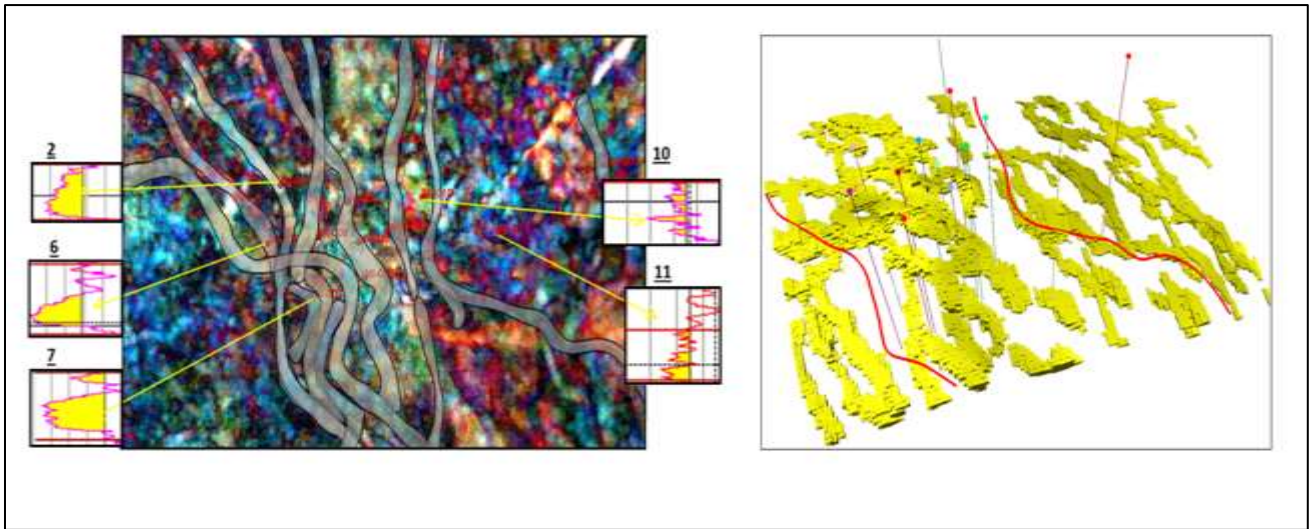


Рисунок 4.34 - Сейсмофациальный анализ и литофациальная геологическая модель

Идея объектно-ориентированного подхода к интерпретации, предполагающего скрупулёзную работу по интерпретации объекта с последующим его всесторонним анализом, родилась в процессе интерпретации отражающих горизонтов в ССК 5. На рисунке 4.35 продемонстрированы характерные погоризонтные слайсы с отображением палеоруслового объекта.

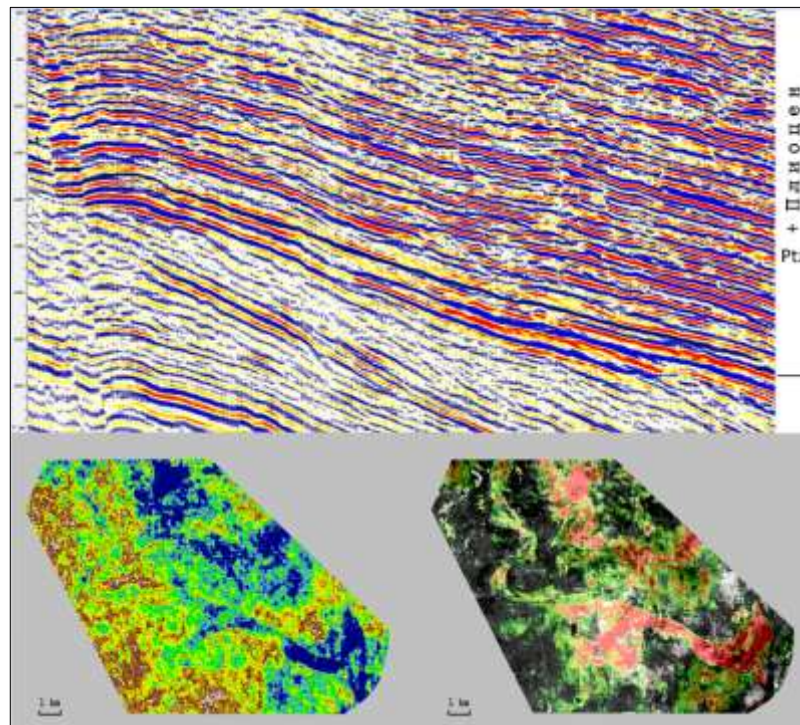


Рисунок 4.35 - Типичный разрез, характерный для интервала ССК 5 и седиментационные слои

Одной из сложностей в геологической интерпретации комплекса является анализ множественных локальных объектов. Например, как показано на рисунке 4.36, нахождение на одном слайсе трех палеорусел при неточной корреляции может быть отображением миграции одного русла по латерали, а не наличием трех отдельных объектов.

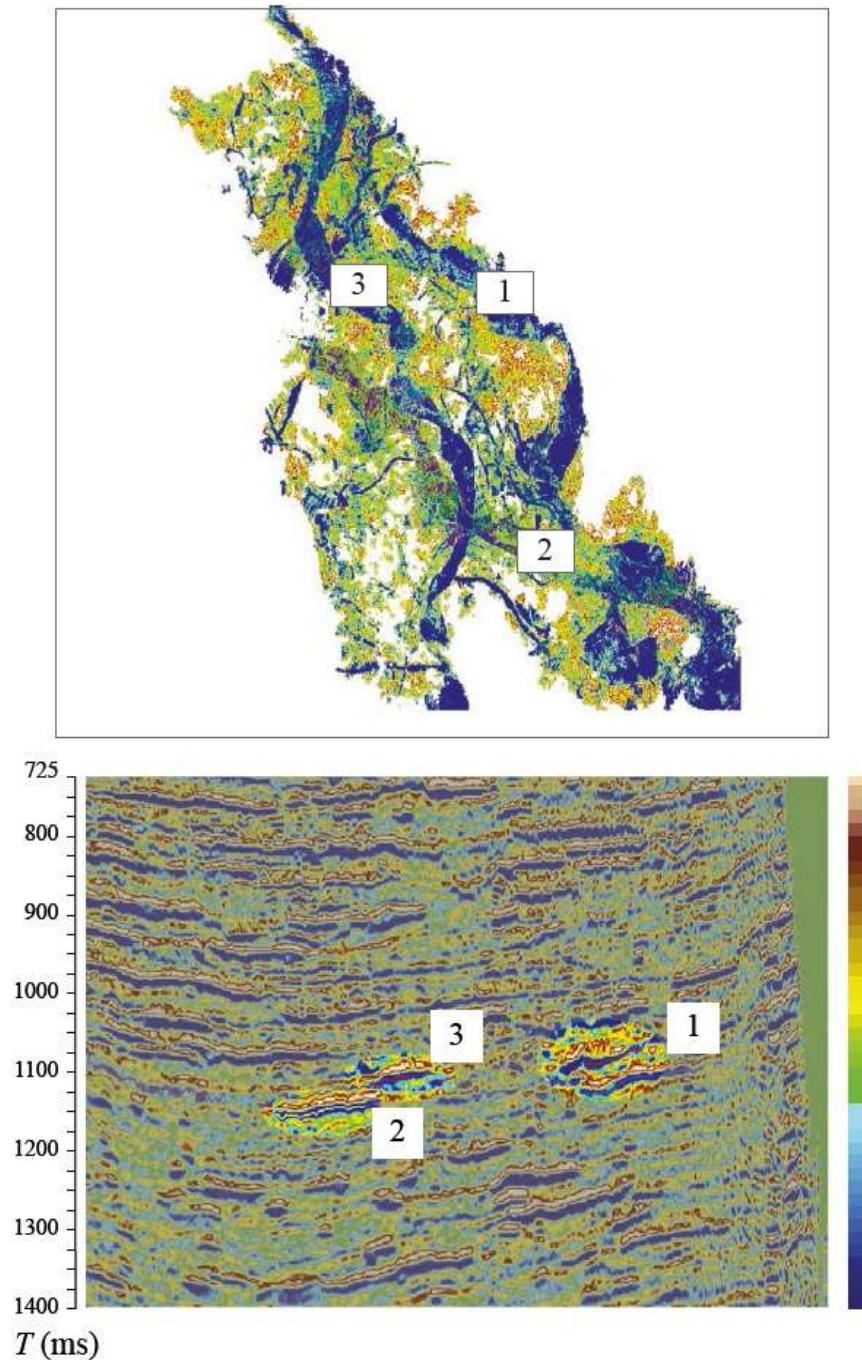


Рисунок 4.36 - Пример изучения латерального смещения геологического события в геологическом времени с помощью объектно-ориентированной корреляции

Общая характеристика ССК 5:

- повсеместное распространение;
- отсутствие реперного отражающего горизонта в подошве комплекса;
- неопределенность в стратиграфических разбивках по скважинным данным;
- оригинальное сейсмическое изображение, представленное аномально выраженными фрагментарными осями синфазности;
- наличие на временных и погоризонтных слайсах палеорусловых объектов, соответствующих разветвленным и меандрирующим руслам.

Сводная характеристика сеймостратиграфических комплексов приводится в таблице 6.

Таблица 6

Характеристика сеймостратиграфических комплексов

№	ССК	Фаза	Возраст	Описание
1	2	3	4	5
1	Донеогеновое основание		Докембрийский и палеозойско-палеогеновый комплекс	Сейсмическое изображение в полной мере не передает сложное внутреннее структурно-тектоническое строение основания с большим количеством тектонических дислокаций разного типа: сбросов, взбросов, сдвигов. Отсутствие реперных горизонтов, для возрастной идентификации отражений обязательно наличие скважинной информации, интервал представлен нерегулярными хаотичными фрагментами осей синфазности или "прозрачным" изображением.

1	2	3	4	5
2	ССК 1	Син рифтовый комплекс	Нижний миоцен	<p>Концептуальная модель: «Шлейфы нарушенных разломами склонов».</p> <p>Характерно чередование как протяжённых, так и локально выраженных осей синфазности. Фрагментарность сейсмического изображения на разрезах и слайсах можно связать с этапностью поступления материала, заполняющего впадины палеорельефа. В пределах отдельных участков рисунок соответствует характерному отображению оползневых процессов в виде серии наклонных осей синфазности.</p>
3	ССК 2	Син рифтовый комплекс	Средний миоцен (баден, сармат)	<p>Концептуальная модель: «Морские и прибрежно-морские условия».</p> <p>Локальный характер распространения, отсутствие региональных границ в кровле и подошве комплекса. Интерференционный характер сейсмического изображения вблизи поверхности фундамента создает неопределенность в прослеживании отражающих горизонтов. Особенности сейсмического изображения могут рассматриваться как поисковый критерий.</p>
4	ССК 3	Пост рифтовый комплекс	Верхний миоцен (паннон, понт)	<p>Концептуальная модель: «Глубоководные озерные условия».</p> <p>Характерны выдержанные, достаточно хорошо прослеживаемые отражения; в бортах депрессий на палеоизохронных слайсах интерпретируются конусы выноса; в осевых частях палеодепрессий установлено развитие оползневых потоков.</p>

1	2	3	4	5
5	ССК 4	Пост рифто вый комплекс	Верхний миоцен (понт)	<p>Концептуальная модель: «Проградационный комплекс».</p> <p>Повсеместное распространение; отсутствие реперных отражающих горизонтов в кровле и подошве комплекса. Характерны сигмоидные, амплитудно-выраженные отражения, отображающие внутреннее строение клиноформного комплекса. Отмечается наличие локальных интервалов с фрагментами нерегулярных хаотических осей синфазности, отображающих масштабные оползневые процессы в неконсолидированных озерных толщах. Аномалии типа «яркое пятно» широко распространены по всему ССК, часть из них связана с лопастями и подводными каналами конусов выноса.</p>
6	ССК 5	Пост рифто вый комплекс	Верхний миоцен (верхний понт) - плиоцен	<p>Концептуальная модель: «Озерно-аллювиальная равнина».</p> <p>Повсеместное распространение; отсутствие реперного отражающего горизонта в подошве комплекса. Оригинальное сейсмическое изображение представленное аномально выраженными фрагментарными осями синфазности, большинство из которых связано с наличием в комплексе палеорусел, хорошо проявляющихся на временных и погоризонтных слайсах.</p>

ГЛАВА 5. КЛАССИФИКАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ АНОМАЛИЙ В ТОЛЩЕ ПОНТ-ПЛИОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Тема прямых поисков углеводородов путем вовлечения в процесс интерпретации динамических характеристик волнового поля актуальна с 50-х годов прошлого века, в то время были выдвинуты первые гипотезы об изменении интенсивности отражений при переходе от водонасыщенной части коллектора к нефтегазонасыщенной. История вопроса подробно изложена в публикации Ф.Д. Хилтермана «Интерпретация амплитуд в сейсморазведке» [131]. В 1963 г В.В. Черлин и А.А. Сергеев сформулировали четыре ключевых диагностических признака прямых поисков: «яркие пятна», интерференционные эффекты на краях залежей, «плоские пятна» и поглощение («тусклые пятна»).

Применение критериев прямого поиска на основе сейсмических исследований МОГТ 2D позволило открыть на территории Сербии в конце 80-х газовое месторождение Банатский Двор (в настоящее время ПХГ), в начале 90-х - месторождение Житиште. На рисунке 5.1 показан временной разрез через месторождение Житиште с характерной аномалией.

Позднее было открыто еще несколько месторождений в отложениях среднего и верхнего миоцена. Для региональных сейсмогеологических условий амплитудные аномалии типа «Bright spot» в интервале сейсмического разреза, соответствующем потенциально продуктивным отложениям понта и плиоцена, являются характерной особенностью и до последнего времени считались надежным поисковым критерием.

Например, оценивая геологическую успешность объекта, при наличии амплитудной аномалии эксперты по региону увеличивают фактор вероятности существования залежи с 0.32-0.48 до 0.72.

Однако, результаты бурения последних пяти лет продемонстрировали, что природа аномалий не связана исключительно с наличием углеводородов. Успешность разбуривания объектов, выделенных на основе картирования амплитудных аномалий, составила 21%. Поэтому один из важных поисковых

критериев оказался под вопросом и обозначилась проблема корректной интерпретации амплитудных аномалий.

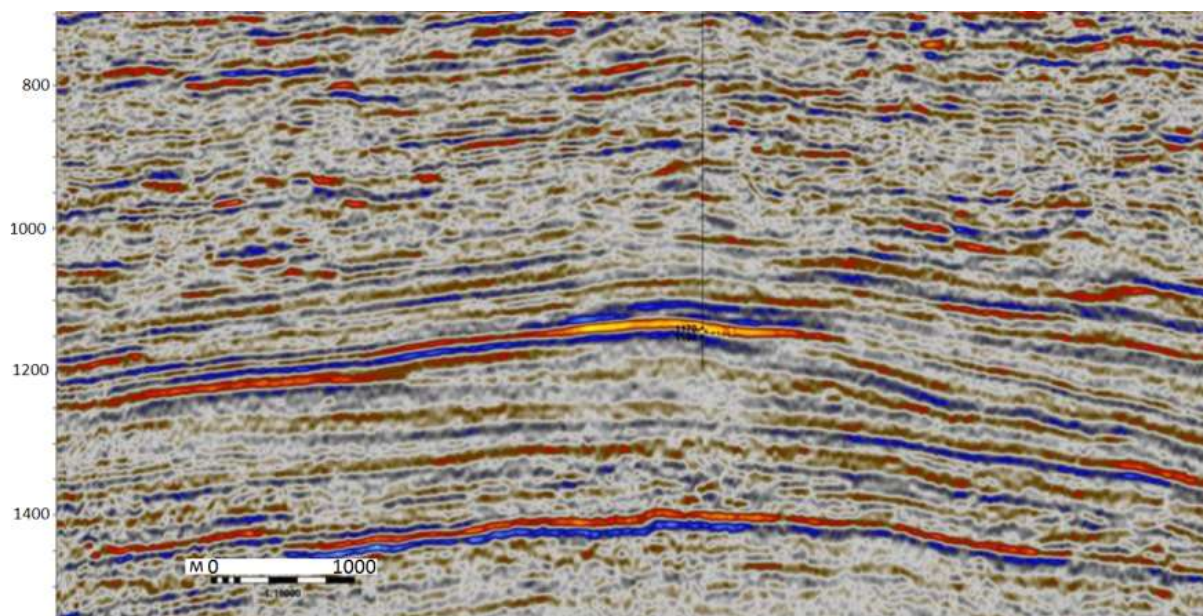


Рисунок 5.1 - Временной разрез через месторождение Житиште

С одной стороны известно, что, если порода насыщена газом на 5-10%, то дальнейшее насыщение газом оказывает лишь незначительный эффект на скорость Р-волны, и это означает, что «экономически рентабельные газовые залежи характеризуются практически такими же сейсмическими амплитудами Р-волн, как и истощенные коллектора» [131]. С другой стороны, через аномалии в волновом поле могут проявляться слои угля, вулканического пепла, мергелей и других подобных акустически контрастных включений.

Комплексный анализ данных позволил установить, что из общего числа месторождений в амплитудных аномалиях проявляются только 35%. Следовательно, исторически сложившийся «надежный поисковый критерий» не является таковым.

Для снижения рисков геолого-разведочных работ и повышения надежности сейсмогеологической интерпретации за последние два года проведены направленные исследования по изучению аномалий. Автор диссертационной работы является одним из инициаторов и исполнителей НИР: «Анализ критериев

исследования газовых месторождений с аномальной сейсмической амплитудой и классификация амплитудных аномалий в интервале сейсмической записи, соответствующей комплексу отложений понт-плиоцен».

Одна из идей НИР заключалась в классификации амплитудных аномалий по сейсмофациальным зонам, проиллюстрированным на рисунке 5.2. В соответствии с геологическим строением понт-плиоценовых отложений, были выделены пять категорий обстановок осадконакопления: 1 - озерно-аллювиальная равнина, 2 - фронтальная часть дельтового комплекса, 3 - прodelьта и склон с характерными гравитационными процессами, 4 - подножие склона, 5 - подводная равнина понтийского моря-озера [15, 229].

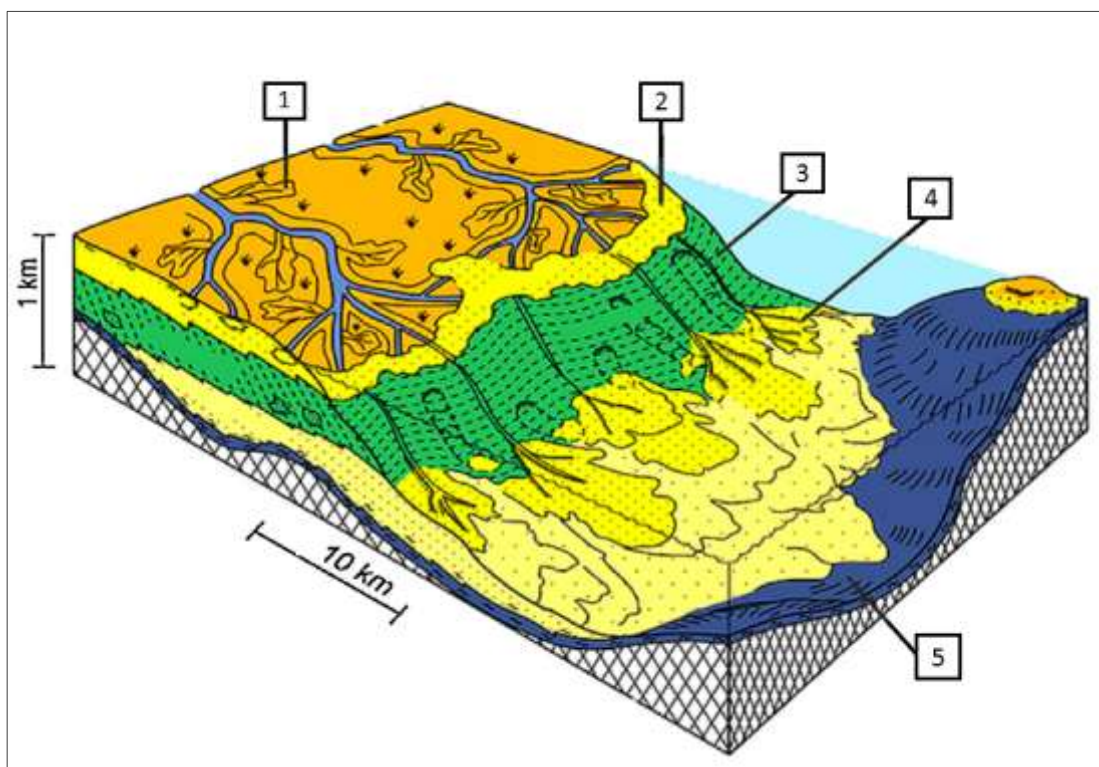


Рисунок 5.2 - Концептуальная модель среды осадконакопления в позднем миоцене [157]

На первом этапе проанализированы существующие месторождения. В результате получены следующие данные:

- 26% залежей, проявляющихся в амплитудных аномалиях, приурочено к озерно-аллювиальной равнине;

- 50% – к фронтальной части дельтового комплекса;
- 18% – к склоновой части;
- 3% – к подножию склона;
- 3% – к подводной равнине.

На рисунке 5.3 амплитудные аномалии соответствуют двум газовым залежам действующих месторождений. Западная аномалия – месторождение Р. плитко; восточная – М. север плитко. Анализ керна позволил сделать заключение о приуроченности отложений к озерно-аллювиальной равнине с наличием меандрирующих палеорусел, затопляемых участков, небольших озер с пресноводными условиями. Коллектор месторождения Р. плитко представлен глинисто-алевритовыми разностями предположительно сформированными в пределах затопляемого участка дельты. Коллектор месторождения М. север плитко сложен песчаником, характерным для условий прируслового бара (point bar). Несмотря на разные фации, газонасыщение определяет наличие амплитудных аномалий в волновом поле.

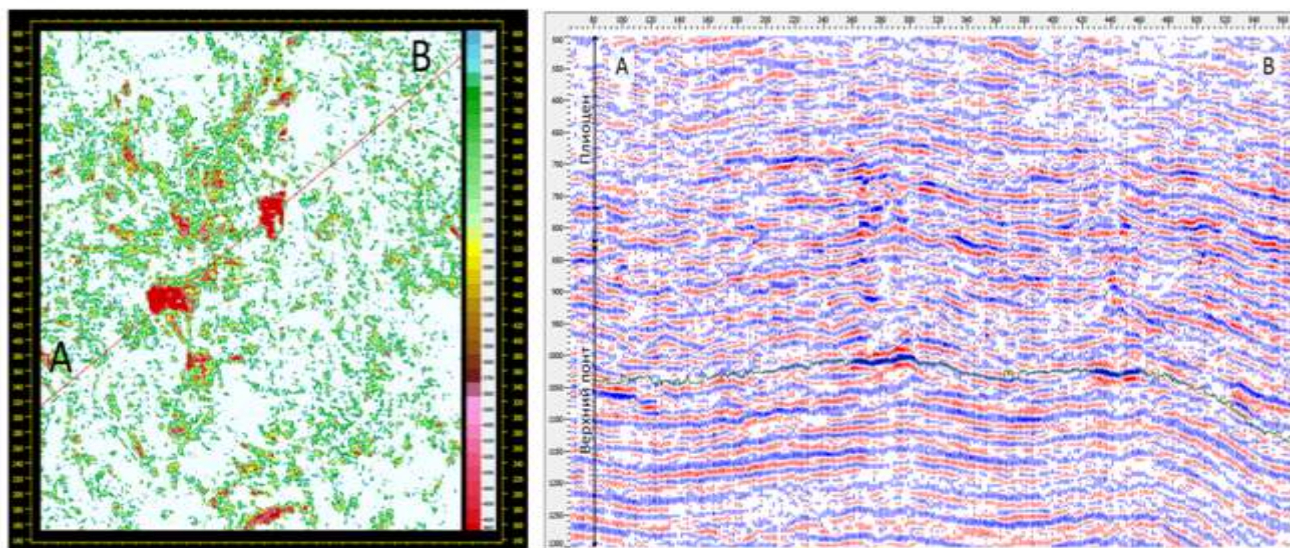


Рисунок 5.3 - Отображение на седиментационном слайсе аномалий связанных с существующими месторождениями газа в отложениях верхнего понта (шаг по инлайнам и кросслайнам в пределах съемки – 20 метров). Вертикальное сечение (вертикальная шкала во временном масштабе), демонстрирующее положение аномалий на разрезе

Для анализа пространственной приуроченности амплитудных аномалий был разработан специальный метод «сканирования пространства» на основе существующих технологических решений в одном из интерпретационных пакетов. На первом этапе проводилась загрубленная корреляция условных отражающих горизонтов. В базовый каркас обязательно входили горизонты, к которым приурочены существующие месторождения. Далее, средствами программного комплекса, вблизи каждого горизонта создавался подьобъем сейсмических данных – «geoprobe», временные толщины определялись субъективно, в зависимости от сейсмического изображения. Возможен вариант формирования объема сейсмических данных между горизонтами. На третьем этапе использование режима «прозрачности» позволяло выделять в локальных объемах наиболее амплитудные объекты, которые на языке программного обеспечения для интерпретации именуется как «geobody». Таким образом, поинтервально «сканировался» весь объем ССК 4 и ССК 5. Выделение наиболее амплитудных объектов позволяло определиться с их формой, диспозицией по отношению к соседним объектам, приуроченностью к конкретной обстановке осадконакопления, чтобы на следующем этапе оперативно подключить скважинную информацию для проведения седиментационного анализа. Наиболее интересные выявленные объекты впоследствии интерпретировались более детально с применением традиционных подходов и инструментов сейсмофациального анализа.

В дополнение к методу «сканирования пространства» тестировались различные сейсмические атрибуты на предмет их эффективности в усилении контрастных аномалий, такие как Original Amplitude, RMS, Average Energy, Sweetness и Envelope. По рекомендации производителей программного обеспечения, эти атрибуты наилучшим образом проявляют более сильные амплитудные отклонения по отношению к базовым значениям, т.е. косвенно подчеркивают аномалии типа «Bright Spot».

В результате проведенного сканирования получены следующие данные: к озерно-аллювиальной равнине;

- 5% залежей, проявляющихся в амплитудных аномалиях, приурочено к озерно-аллювиальной равнине;
- к фронтальной части дельтового комплекса – 35%;
- к склоновой части – 57%;
- к подножию склона – 2%;
- к подводной равнине – 1%.

На рисунке 5.4 приводятся диаграммы для сопоставления статистических данных. При анализе двух статистических выборок необходимо учитывать ранее установленный факт, что только одна треть залежей проявляется в волновом поле в виде амплитудных аномалий.

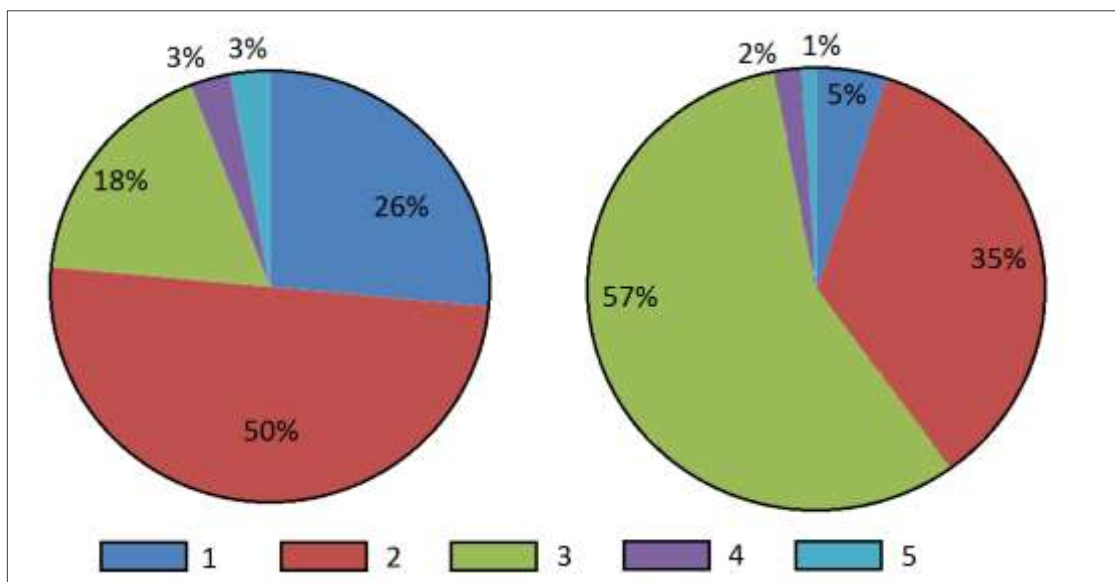


Рисунок 5.4 – Сопоставление статистических данных распределения аномалий по фациальным зонам: амплитудные аномалии соответствующие подтвержденным залежам (слева); амплитудные аномалии выявленные методом сканирования (справа)

Условные обозначения фациальной зональности: 1 – озерно-аллювиальная равнина; 2 – фронтальная часть дельтового комплекса; 3 – склоновая часть; 4 – подножие склона; 5 – подводная равнина.

Анализ результатов позволяет сделать предположение, что наибольший риск в выявлении потенциальных объектов связан с амплитудными аномалиями, приуроченными к склоновой части.

Примером, подтверждающим данное предположение служат результаты бурения скв. XXX. Временной разрез представлен на рисунке 5.5. На основании критерия «Bright spot» была закартирована потенциальная литологическая ловушка (линза песчаника) в нижнем отделе понтического яруса (глубина 1050 м). Прогнозировалось наличие газовой залежи. Предполагаемая песчаная линза имела субширотную ориентацию с погружением в восточном направлении, ее размеры оценивались в 2 x 4 км, мощность \approx 50 м. Максимальная толщина коллектора прогнозировалась 15-16 м.

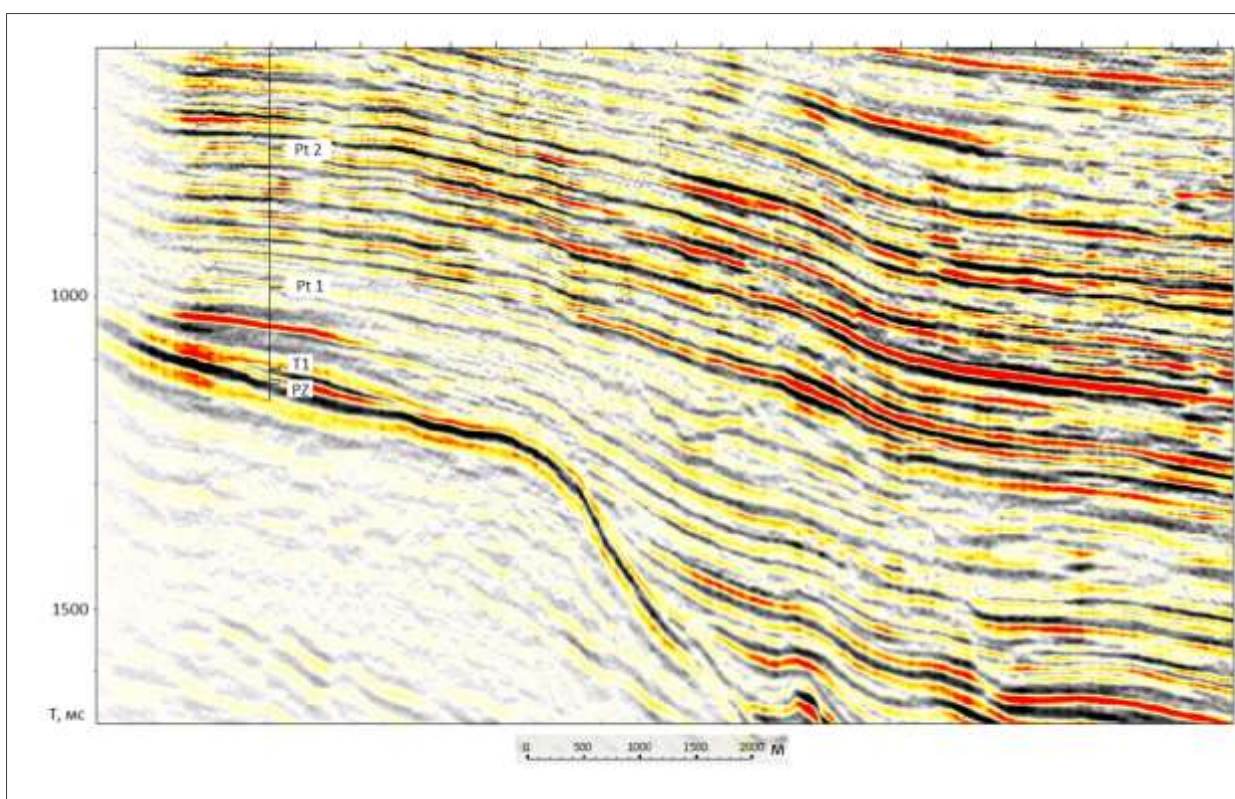


Рисунок 5.5 – Временной разрез через скважину XXX (Сербия, Воеводина)

По результатам бурения (2013 г) в интервале 1039–1092 м (-952-1005 м) вместо ожидаемой линзы песчаника был вскрыт пласт, представленный мергелем пониженной глинистости с подчинёнными пропластками песчаников и углей. При испытании верхней части пласта в интервале 1041-1066 м (-954 -979 м) получен приток пластовой воды. Интервалов, перспективных для испытания, по данным газового каротажа не выявлено. Подобные аномалии в пределах

склоновых частей встречаются по всему бассейну. Характерный пример представлен на рисунке 5.6.

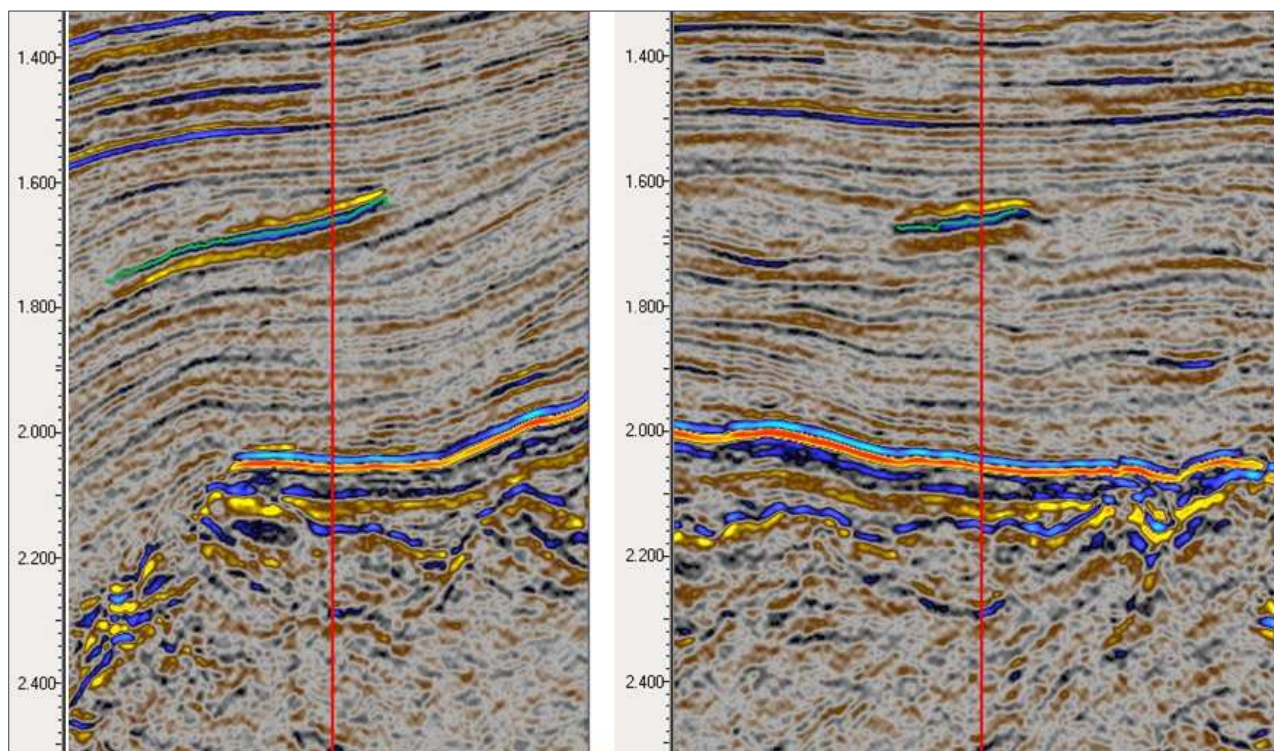


Рисунок 5.6 – Амплитудная аномалия в ССК 4, выделенная как потенциальный объект при оценке нового лицензионного участка (Деречка депрессия, Венгрия)

В интервалах сейсмических данных, сопоставимых с обозначенными обстановками осадконакопления, аномалии волнового поля создают благоприятную среду для проведения сейсмофациального анализа, так как через специфическую форму передают информацию о характере геологического события.

В интервале, ассоциированном с озерно-аллювиальной равниной, аномалии принимают линейные и синусоидальные формы, характерные для палеорусел; изометричные локальные формы возможных мелких озерно-болотных образований, серповидную форму отдельных узнаваемых элементов аллювиальной системы, предположительно стариц. Характерные формы проиллюстрированы рисунками 5.7, 5.8.

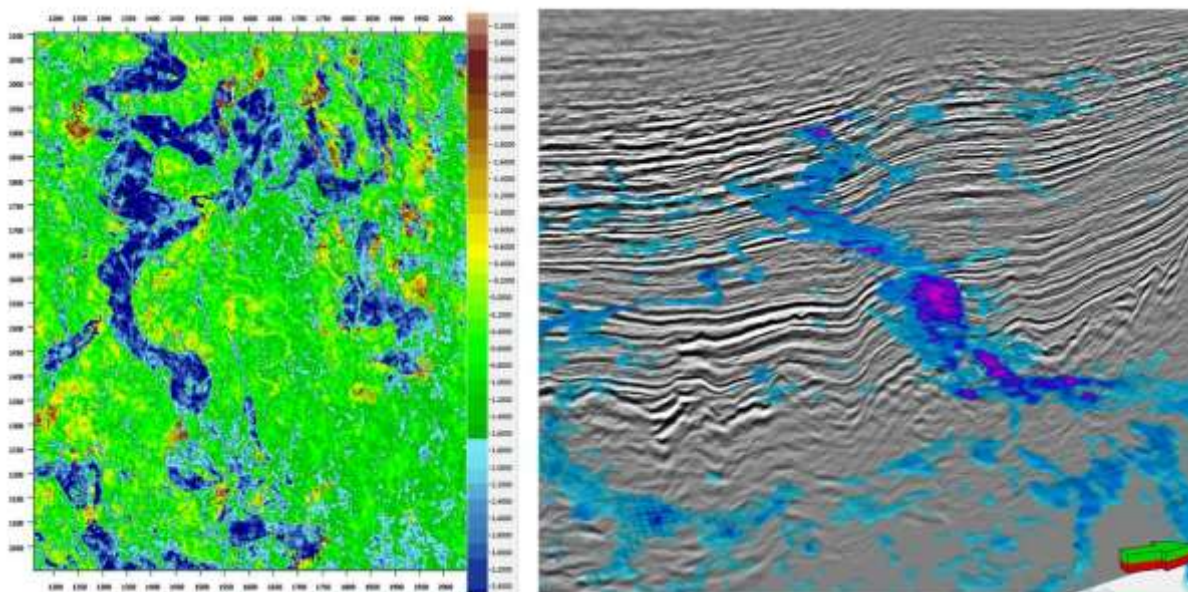


Рисунок 5.7 - Линейные и синусоидальные формы аномалий, ассоциированные с палеорулами озерно-аллювиальной равнины

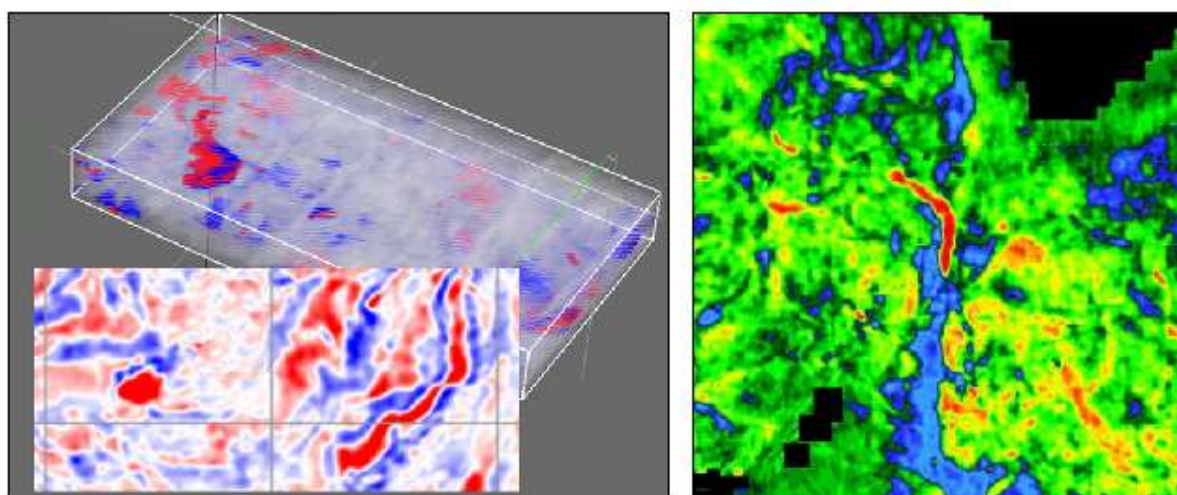


Рисунок 5.8 - Аномалия изометричной формы (слева) и серповидной формы (справа)

Аналогичные формы характерны и для фронтальной части дельтового комплекса. Высока вероятность того, что аномалии в волновом поле могут быть спровоцированы пластами угля, характерными для данных обстановок осадконакопления, и небольшими скоплениями биогенного газа.

Для участков продельты и склона наличие аномалий зачастую пространственно коррелируется с развитием оползневых фаций. Высказывается предположение, что аномалия создается акустически контрастными пластами

мергелей, которые, в свою очередь, обеспечивают облегченное скольжение залегающих на них осадков и являются одним из элементов целостного механизма формирования оползней. На рисунке 5.9 приводится подобный пример: выше по разрезу над амплитудной аномалией сейсмическое изображение в виде обрывочно – хаотичных осей синфазности можно интерпретировать как оползневой объект.

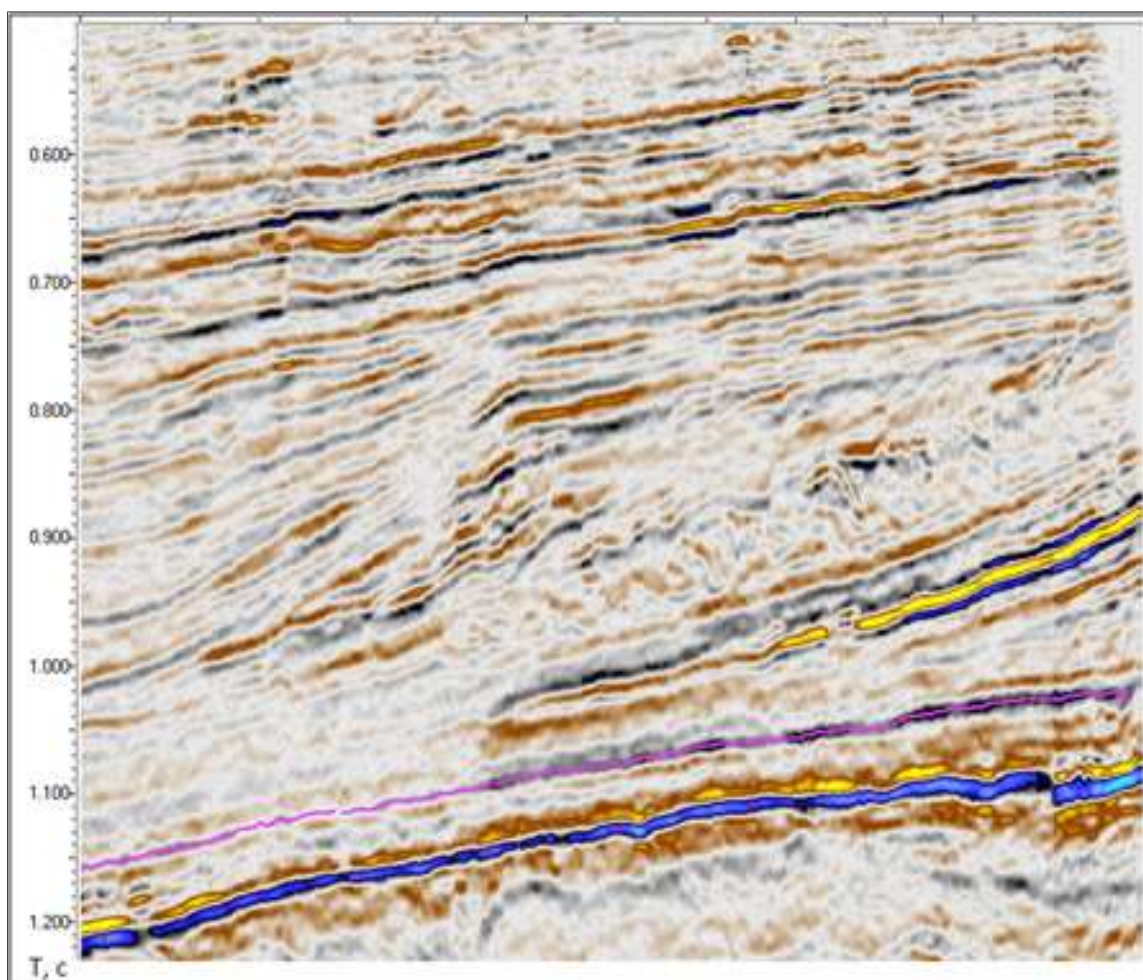


Рисунок 5.9 – Амплитудная аномалия в ССК-4 с характерным для оползневых процессов сейсмическим изображением выше по разрезу

В обстановке подножия склона через локальные особенности сейсмического изображения традиционно проявляются конусы выноса с распределительными каналами и отдельными лопастями. Последним иногда соответствуют достаточно контрастные аномалии. Один примеров показан на рисунке 5.10.

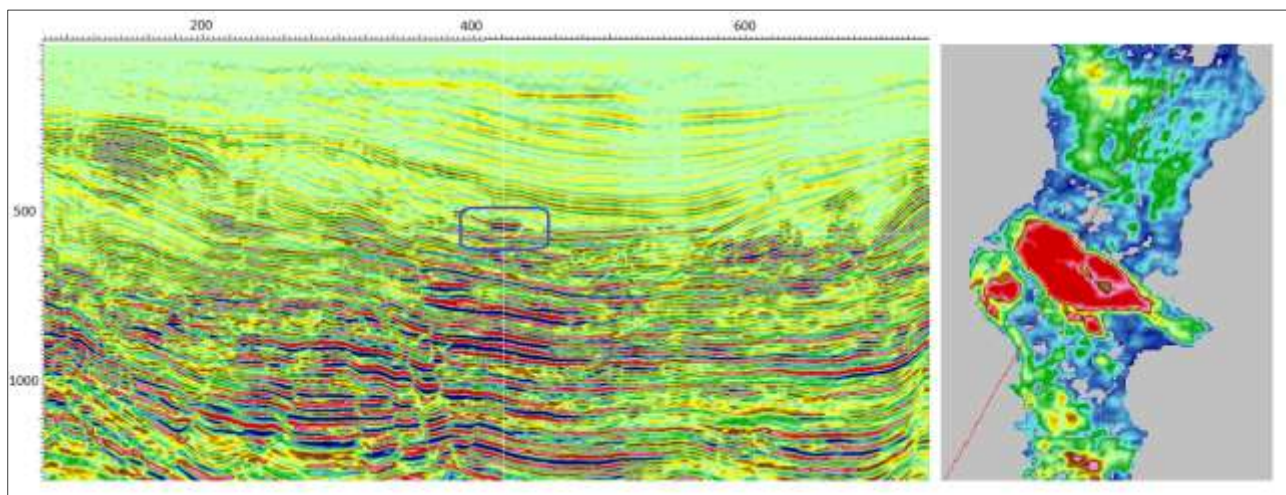


Рисунок 5.10 - Амплитудная аномалия в фондоформе на временном сейсмическом разрезе и ее проявление на погоризонтном слайсе

Выполненный анализ распределения аномалий позволил утвердиться в том, что наличие аномалии не является гарантом обнаружения газовых месторождений в интервале, соответствующем ССК 4 и ССК 5. Большинство аномалий спровоцированы литологическим фактором, через аномалии проявляются седиментационные объекты, создавая благоприятные условия для проведения сейсмофациального анализа.

Анализ интенсивности аномалий позволяет сделать вывод, что контрастных аномалий, амплитудные значения которых в 10 раз превышают общий фон, всего 10 %.

Для корректного определения потенциальной успешности выявляемых объектов необходимо всестороннее изучение целого ряда факторов.

Во – первых, корректные подходы к обработке исходных данных, с целью недопущения появления ложных аномалий. Например, вследствие недоучета верхней части разреза, некорректного шумоподавления, проблем с подавлением кратных волн-помех, с точностью построения ГСМ и проведения миграционных преобразований.

Во – вторых, комплексный интерпретационный подход, учитывающий следующие факторы: корректное картирование аномалии в пределах зоны с

доказанной нефтегазоносностью; отождествление аномалии с потенциальной структурной или литологической ловушкой; изучение продуктивности нижележащих отложений; установление наличия каналов миграции. Дополнительным аргументом могут послужить результаты AVO/AVA анализа.

Для определения потенциальных возможностей геологической интерпретации сейсмических данных выполнялось петрофизическое моделирование [197]. По результатам анализа кросс-плота AI и V_p/V_s по 3 опорным скважинам, представленного на рисунке 5.11, можно сделать следующие выводы.

1. Интервалы коллекторов-песчаников и углей обладают схожими значениями акустического импеданса, что делает их разделение стандартными методами невозможным. Однако, подобная дифференциация становится возможной, если опираться на совместные показания P- и S-волн с учетом использования кривых, скорректированных за характер насыщенности;

2. Величина объемной глинистости достаточно четко связана с величиной отношения V_p/V_s , что потенциально позволяет выявлять наименее глинистые интервалы (песчаники) по акустическим данным;



Рисунок 5.11- Кросс-плот: акустический импеданс по оси X (AI) и V_p/V_s по оси Y (материал по трем опорным скважинам)

3. Плотные прослои, такие как карбонаты и мергели, могут быть выделены по увеличению акустического импеданса;

4. Для корректного учета эффекта влияние УВ на значения упругих модулей необходимо реализовать более сложные подходы, основанные на моделировании упругих свойств, при наличии точной объемной флюидоминеральной модели, основанной на показаниях высокотехнологичной аппаратуры [15].

Комплексный геолого-геофизический анализ позволяет обеспечить повышение эффективности разбуривания объектов, выявленных на основе картирования амплитудных аномалий. Несмотря на небольшие запасы, вследствие неглубокого залегания, месторождения экономически рентабельны.

По завершению основной части проекта НИР в 2017 году на объекты «Bright Spot» пробурены две успешные скважины.

ГЛАВА 6. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Условия осадконакопления в озерах, каким представляется Паннонское море-озеро в понтийское время, могут значительно отличаться от традиционно рассматриваемых морских условий. В настоящее время озера занимают 1.8% поверхности суши, самое большое по площади водной поверхности – Каспийское (376 тыс. км², максимальная глубина 1025 м). Усредненная площадь Паннонского моря-озера оценивается как одна третья часть современного Каспия. Ф.А. Аллен и Дж.Д. Коллинсон обращают внимание, что «из-за зависимости процессов и чувствительности системы к изменениям интерпретация озерных отложений неуловимо тонка, но зато щедрa на вознаграждение их исследователю» [74]. Ученые также отмечают, что отложения древних озер являются лучшими индикаторами палеоклимата, вследствие сверх чувствительности к климатическим условиям. Важной особенностью озерной среды осадконакопления является также разнообразие осадочных фаций, обусловленное колебаниями биохимического режима воды и непостоянством береговой линии [74].

Физические процессы, запечатленные в древних озерных отложениях, аналогичны процессам, связанным с морскими образованиями. В строении озерной котловины выделяются шельф, бровка шельфа, склон, подножие склона, глубоководное дно. Механизмы заполнения бассейнов также во многом сопоставимы. Непрерывная последовательность процессов переноса и переотложения вещества приводится в работе Х. Рединга [74]. Начальным членом ряда зафиксирован обвал, конечным – мутьевой поток с очень низким содержанием осадочного материала. В сейсмических данных находят свое отображение лишь отдельные акустически контрастные геологические события, связанные с этим глобальным процессом. В основном, это оползневые образования и конусы выноса (отдельные элементы системы «конус выноса»).

6.1. Оползневые процессы и явления

6.1.1. Теоретические и практические аспекты геолого-геофизического изучения подводных оползней

Интерес к изучению подводнооползневых дислокаций, как отдельной группе геологических явлений со своими специфическими особенностями, прослеживается с начала прошлого века в работах Н.Н. Горностаева (визейские отложения, Томск, 1925); А.Д.Архангельского и Н.М. Страхова (Черное море, 1930); Н.Б. Вассоевича и С.Т. Короткова (олигоценные отложения северо-западного Кавказа, 1935); И.А. Конюхова (продуктивные толщи Апшеронского полуострова, 1947); В.В. Тихомирова и В.Е. Хаина (третичные отложения Прикаспийско-Кубинского района, Азербайджан, 1947), В.А.Гроссгейма (третичные и меловые отложения, юго-восточный Кавказ, 1948), З.А. Мишуниной (1950) и др.

Геологическое значение этих событий сформулировано в самых ранних работах. По мнению классиков (цитируется по работам Н.Б. Вассоевича и С.Т. Короткова) подводные оползни позволяют объяснить:

- генезис отложений (например, появление пород конгломератового и брекчевидного строений);
- некоторые типы деформаций (например, псевдоскладчатость, смятие, разрывы);
- присутствие более древних отложений среди молодых;
- удвоение толщи в разрезе, отсутствие отдельных слоев и целых свит в области сползания;
- существование местных несогласий и т.д.

Анализ распространения подводных оползней позволяет выполнять палеогеографические реконструкции, прогнозировать местоположение береговой линии и основных направлений сноса осадочного материала. Идентификация

гравитационных процессов в разрезе дает основание увязывать их с периодами активизации тектонических движений.

Современными исследованиями установлено, что озерные отложения являются наиболее благоприятной средой для формирования подводных оползней.

По мнению большинства специалистов, подводные склоны являются активной динамической системой. Процессы, протекающие в пределах склонов оказывают сильное воздействие как на строение самих склонов, так и на формирование ближайшего окружения. Во многом эти процессы аналогичны процессам происходящим на суше, но повышенная пластичность материала определяет свою специфику.

Особенностью подводной среды, в которой развиваются эти процессы, в отличие от дневной поверхности, является изначально высокое насыщение водой и, как следствие, повышенная пластичность донных отложений. Для сравнения: на морском дне оползневые явления могут возникать при углах наклона в $3-5^\circ$, некоторые исследователи снижают эту планку до $1^\circ 30'$ [47]. В условиях дневной поверхности, определяющим параметром является угол естественного откоса грунта (отложений), превышение которого приводит к запуску процесса оползания. Угол естественного откоса связан с коэффициентом трения и зависит от шероховатости зерен, степени их увлажнения, гранулометрического состава и формы, а также от удельного веса материала. Для увлажненных глин эта величина составляет $-15-22^\circ$, сухих глин $-25-40^\circ$, влажного песка $-15-45^\circ$, сухого песка -34° , для скальных грунтов величина во многом зависит от трещиноватости (обобщенные данные из разных источников). Приведенные выше цифры являются одним из косвенных подтверждений того факта, что подводные оползни являются более распространённым и более масштабным явлением, чем их «сухопутные» аналоги. Площади подводных склонов, вовлеченные в процесс оползания, достигают сотен и тысяч квадратных километров.

Одним из уникальных примеров, описанных в литературе, является серия из трех древних оползней под названием Стурегга, образовавшихся в голоцене во

время последнего оледенения приблизительно 8200 лет назад. События разворачивались на границе континентального шельфа в 100 км к северо-западу от Мёре-ор-Ромсдал современной Норвегии. Оползневый процессом было охвачено около 290 км побережья, объём сползших пород составил около 2500-3500 км³, что в 300 раз превышает годовую поставку в Мировой океан осадочного материала всеми реками Земли; дальность перемещения достигла 500 км [53, 54]. Оползень вызвал крупное цунами в северной части Атлантического океана, способное накрыть Исландию слоем воды в 34 м. У поверхности срыва оползня в южной части крупного поднятия открыто газовое месторождение Ормен Ланге (от норвежского «длинный змей»). В литературе встречаются подробные описания и других именитых оползней [40 - 41, 53, 58].

В качестве аналогов, для более уверенной интерпретации сейсмических данных, представляют интерес не только подводные съемки современных объектов, но и моделирование самого процесса оползания. На сайте <http://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/landslides/sea.html> приводится реконструкция оползня Афен, который был идентифицирован в 1996 г. на восточном склоне Faroe - Shetland Channel, относится к небольшим образованиям около 13 км в длину, 3 км в ширину, мощностью в 10-20 [233].

Большой интерес представляет статистика описания 260 оползней, полученная по результатам исследований устойчивости континентальных склонов в рамках проекта COSTA (Continental Slope Stability, Nuhnerbach, Masson, 2004). На основании обобщения упомянутых и аналогичных исследований, А.П. Лисицин приводит в своей статье следующие выводы: длина оползневых тел изменяется от нескольких до сотен километров, самые крупные имеют длину до 1100 – 1400 км; средняя площадь оползневых тел по Восточной Атлантике – 1550 км², крупные - более 1000 км², самые крупные – более 100 тыс. км²; углы наклона на склонах обычно от 1° и менее до 3-5°, во фьордах средние углы наклона схода – 5.5°; смещение оползневых тел – десятки и сотни километров, для крупнейших более 1000 км [53].

Интересное наблюдение, касающееся современных процессов и, способное повлиять на сейсмогеологическую интерпретацию палеооползней, заключается в том, что в одном районе выделяются целые цепи последовательных оползней, которые постепенно наращивают первый главный оползень. Временной интервал схода оползней может оцениваться в тысячи лет [53].

По общей классификации геологических процессов и явлений, оползневые процессы относятся к гравитационным. Собственно под «оползнем» понимается как сам процесс, так и объект, формирующийся в результате процесса. Существует большое количество классификаций самих оползней: по возрасту и фазам развития, по масштабности, форме оползневого тела, механизму перемещения и т.д. В зависимости от степени дезинтеграции материала в процессе его перемещения вниз по склону выделяют два типа: смещение блоков по склону с сохранением внутренней структуры (структурные оползни); смещение оползневых масс с частичной дезинтеграцией перемещенных отложений и перемещение путем формирования оползневого потока [47]. По общему мнению разных исследователей, процесс совершенствования классификаций будет продолжаться по мере изучения этого явления и решения конкретных практических задач.

В качестве основного «спускового механизма» образования подводных оползней, большинство исследователей указывают на землетрясения, отмечая при этом возможность развития процессов оползания в пределах склонов подводных дельт в результате резко различной скорости осадконакопления. Предполагаются и другие возможные механизмы. Например, влияние размывающей деятельности вдольбереговых течений; возникновение внутренних напряжений в осадках в результате диагенетических процессов, дестабилизация склонов вследствие разгрузки газонасыщенных горизонтов.

В настоящее время, по мере накопления опыта опознавания оползневых явлений в процессе интерпретации сейсмических изображений, происходит переосмысление их масштабности и роли при поисках, разведке и разработке нефтегазовых месторождений. В печати все чаще появляются работы по

исследованиям конкретных оползневых тел. Анализируется их строение, условия формирования, влияние на существование барьеров, характер распределения проницаемых пород в резервуаре и т.д. [66, 75, 80].

В мировом опыте, сейсмические данные подтверждают общие геологические представления о достаточно широком развитии подводных оползневых явлений в разных обстановках осадконакопления: как морских, так и континентальных (лимнических).

В обнажениях палеооползни идентифицируются, прежде всего, по наличию смятых слоев среди субгоризонтально залегающих пород. Слои могут быть перевернуты, нарушены внутренними сбросами и надвигами. Интенсивность этих дислокаций проявляется от первых сантиметров до десятков метров. Интервалы могут включать брекчии, образованные в процессе сползания уплотненных слоев песчаников или других плотных пород. В ряде случаев, элементы деструкции, сопровождающие процесс образования оползней можно спутать с тектоническими деформациями, такими как надвиги, шарьяжи, складки волочения [32, 47, 48].

На сейсмических разрезах это геологическое событие не менее узнаваемо, чем в обнажениях горных пород или при наблюдении современных аналогов. В отдельных случаях удается выявить все элементы строения классического оползневого объекта: поверхность скольжения, тело оползня, стенку отрыва, напорный оползневой вал и другие, более мелкие элементы внутреннего строения [93, 95]. На рисунке 6.1 представлена принципиальная схема строения оползня и отображение оползня на карте сейсмических фаций, полученной в целевом интервале путем классификации по форме трассы. Объект закартирован в интервале черкашинской свиты неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири (регион Приобского месторождения).

Сейсмический образ локального подводного палеооползня на разрезе, как правило, соответствует его геологическому описанию: наличие между двумя отражающими горизонтами («недислоцированными пластами (или толщами)» прим. автора) в пределах склона интервала линзовидной формы, «раздува» с

хаотичной волновой картиной, обрывками осей синфазности («смятого в складки пласта» прим. автора). На материалах сейсмических исследований МОГТ 2D крупные оползневые образования могут проявляться отдельными интервалами сейсмической записи с хаотичным распределением обрывков осей синфазности как целостный сейсмостратиграфический комплекс. На временных и погоризонтных срезах, картах сейсмофаций в целевом интервале исследований, оползневые объекты имеют много индивидуальных особенностей.

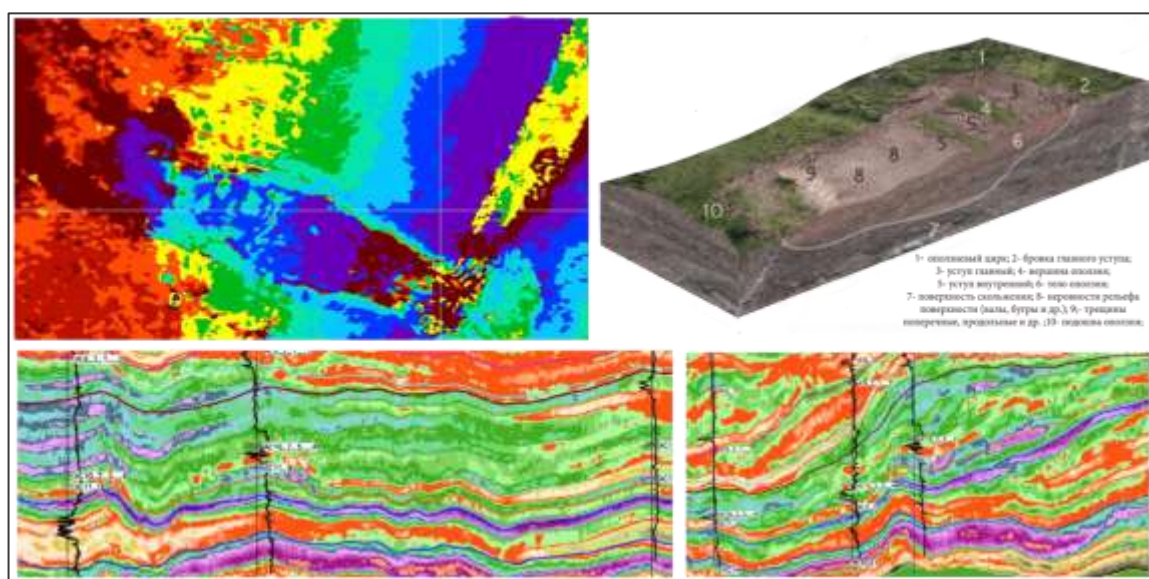


Рисунок 6.1 - Принципиальная схема строения оползня. Отображение оползня на карте сейсмических фаций, полученной в целевом интервале путем классификации по форме трассы (а), сейсмический разрез вкрест (б) и по направлению (с) оползания; объект закартирован в интервале черкашинской свиты неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири (регион Приобского месторождения) [95]

6.1.2. Морфометрические характеристики и типизация оползневых дислокаций

В отложениях понта юго-восточной части Паннонского бассейна по результатам интерпретации сейсмических материалов МОГТ 3D, выявлено активное развитие оползневых процессов. Во время позднего миоцена речные системы транспортировали материал с окружающих горных массивов и активно заполняли бассейн. Высокие скорости осадконакопления,

слабоконсолидированные толщи, медленные поступательные тектонические движения отрицательного знака способствовали развитию оползневых процессов.

Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ позволяет выявить наиболее характерные признаки сейсмического изображения, отображающего гравитационные процессы, и типизировать отдельные явления.

Первый тип (сейсмообраз) представлен на рисунке 6.2; проявляется на слайсах в виде характерного рисунка концентрических дуг. Размер в диаметре гипотетической окружности от 2 до 5 км. Направление гравитационного оползания предполагается по нормали (радиусу) длинной дуги к условному центру концентрических линий.

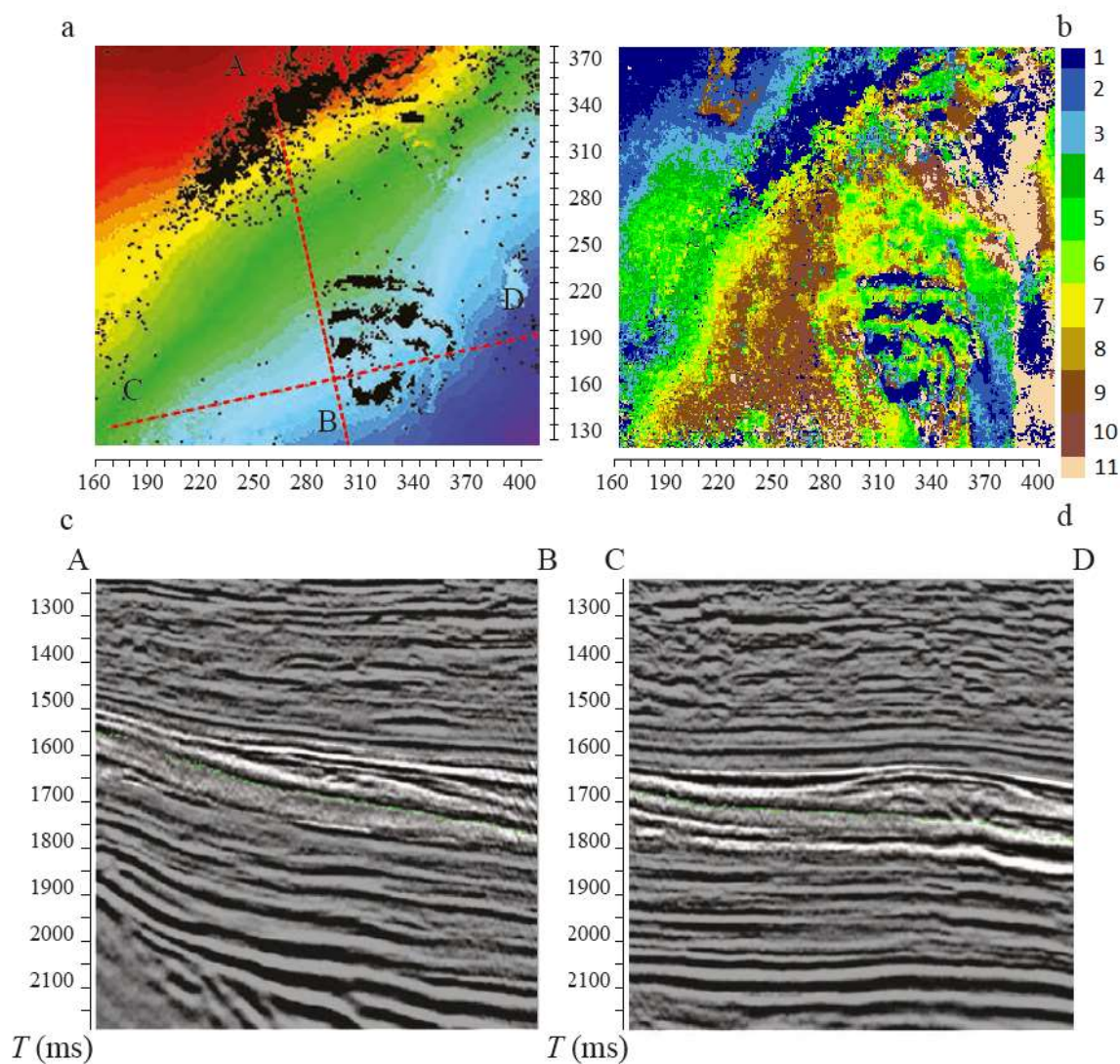


Рисунок 6.2 - Проявление в сейсмических данных локального объекта оползневого типа в процессе автоматической корреляции (а), по результатам классификации формы трасс в целевом интервале (b), на разрезах (с,d)

Среди современных примеров оползания склонов как подводных, так и наземных можно найти много аналогов подобной формы, которую обычно описывают как «амфитеатр». Непосредственно сам «амфитеатр» формируется в верхней части склона, в зоне отрыва оползневых масс (Рисунок 6.3).



Рисунок 6.3 – Оползни формы «амфитеатр» (фото с сайта С.Булавина)

В отдельных случаях, как показано на рисунке 6.4, в пределах шельфовой части удастся проинтерпретировать систему каналов, пространственно тяготеющую к подобным образованиям, которая, по-видимому, обеспечивала поступление материала на склон.

В сейсмическом разрезе интервал, ассоциированный с подобного рода образованиями, отличается хаотичным рисунком или, наоборот, серией осей синфазности, упорядоченных, параллельных друг другу, но наклонных по отношению к нижерасположенному ближайшему опорному горизонту. Существование нескольких подобных объектов с латеральным перекрытием приводит к формированию более сложного сейсмического изображения, в котором, тем не менее, также просматриваются элементы концентрических дуг.

В разрезе можно идентифицировать фрагменты, интерпретируемые как проявление оползневых процессов в одной и той же зоне, но в разных временных интервалах, что свидетельствует об унаследованности условий осадконакопления и направлении транспортировки материала. Проиллюстрировано на рисунке 6.5.

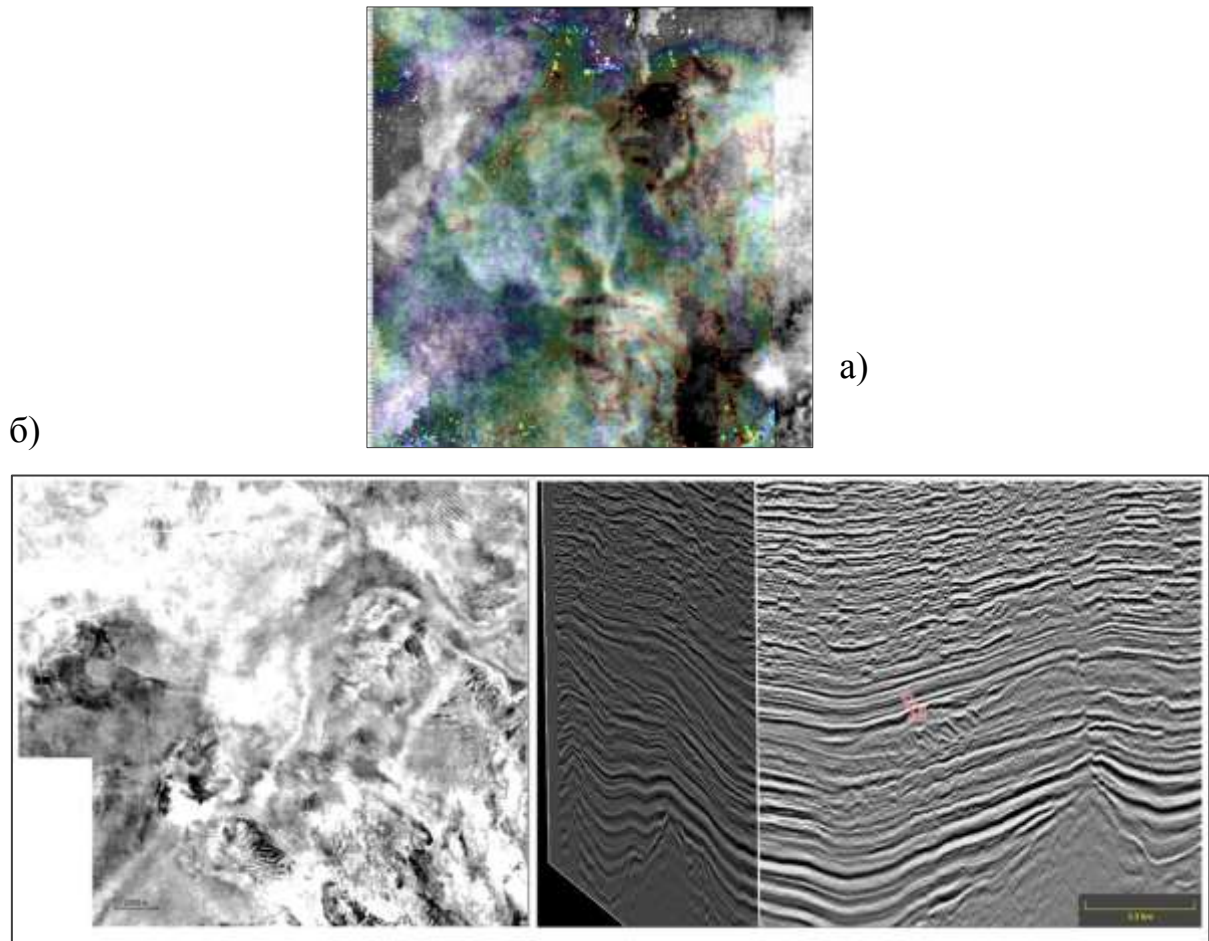


Рисунок 6.4 - Отображение на слайсах меандрирующих каналов на шельфе и оползневых дислокаций на склоне: а – визуализация путем совмещения двух седиментационных слайсов; б – погоризонтный слайс в пределах клиноформного комплекса и вертикальное сечение

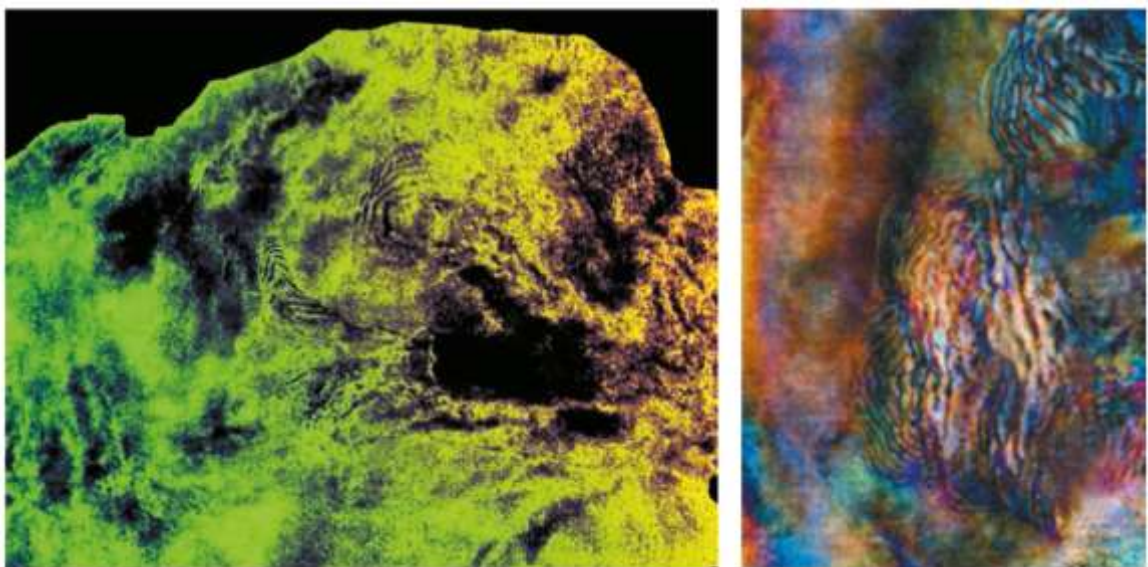


Рисунок 6.5 - Визуализация на седиментационных слайсах серии объектов оползневого типа

Второй тип (сейсмообраз) характеризуется изображением, на первый взгляд близким первому типу. На слайсах можно опознать кажущиеся визуально похожими с первым типом, концентрические дуги, но отображают они совсем другой процесс. Анализ расположения палеосклона и характер изображения на погоризонтном сейсмическом слайсе позволяют сделать вывод, что концентрические линии передают отдельные границы, сформированные в процессе оползания, оплывания и, частично, растекания осадочной обводненной массы. Возможно, отдельные отражения сформированы внутренними границами от нескольких итераций оползневого процесса. Концентрические линии, как показано на рисунке 6.6 расходятся от предполагаемого центра по направлению оползания. Ориентируясь на модель оползня Аффен, можно предположить, что таким образом проявляется в разрезе непосредственно тело оползня (оползней), тяготеющее к подножию склона.

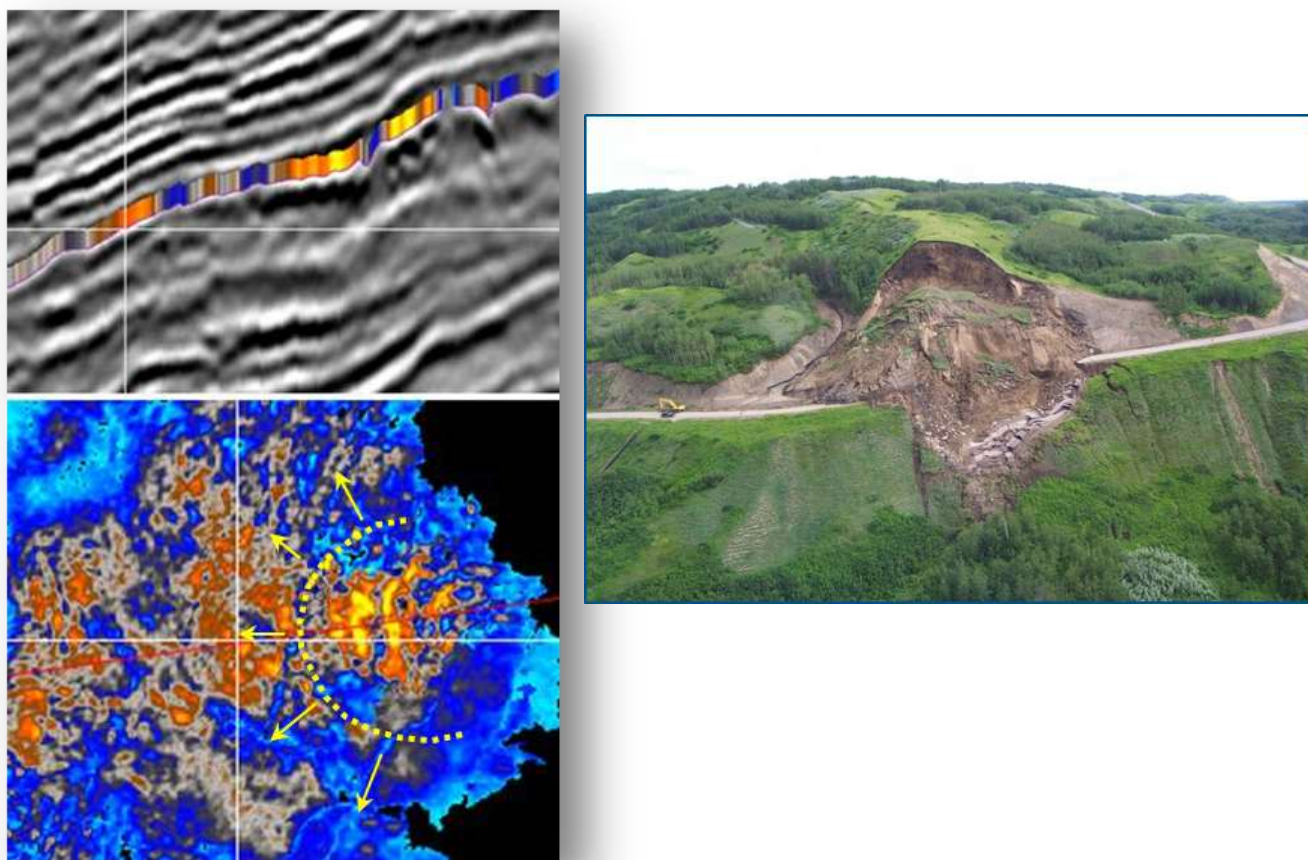


Рисунок 6.6 – Аналог второго типа объекта и его отображение на погоризонтном слайсе

Можно предположить, что описанные выше и представленные на иллюстрациях изображения отображают два взаимосвязанных элемента одного события. В первом случае, в верхней части склона сохраняются элементы строения, характерные для стенки отрыва оползня и их границы являются акустически контрастными по отношению к перекрывающим отложениям. Однако, по каким то причинам не являются акустически контрастными или не сохранились и перераспределены сползшие массы. Во втором случае, проявляют себя отражающие границы, связанные с телом оползня, но нет возможности восстановить палеоизохронную поверхность в геологическом времени, чтобы интерпретировать верхнюю часть склона. Возможно, верхняя часть склона была сnivelирована серией последующих геологических событий.

В процессе интерпретации, в качестве концептуальной модели, большую помощь может оказать схема строения оползня по А.П.Павлову (1932 г.), представленная на рисунке 6.7, на которой выделены деляпсивная часть объекта – соскальзывающая, и детрузивная – напиральная, толкающая коренные породы.

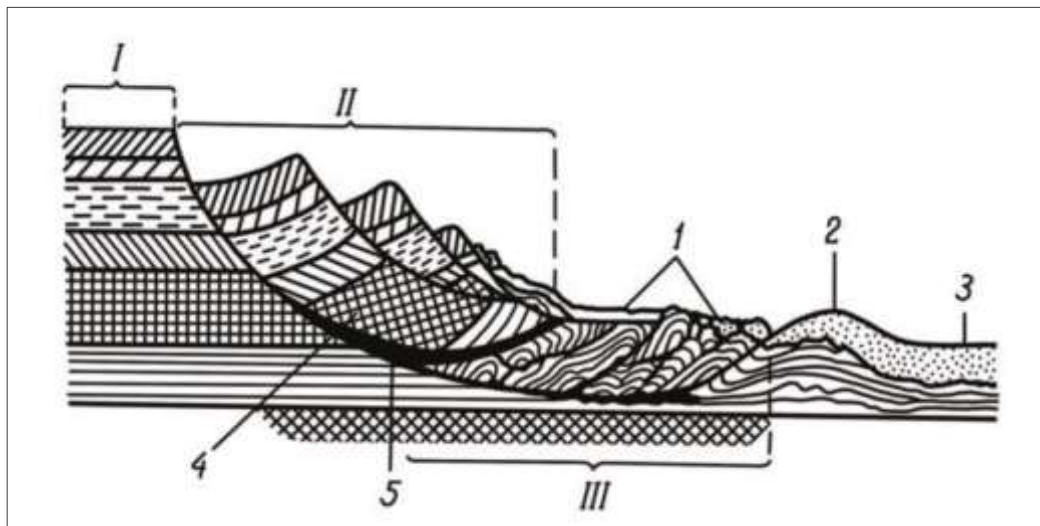


Рисунок 6.7 - Схема строения оползня по А.П.Павлову: I – коренной склон; II – деляпсивная часть оползня; III – детрузивная часть оползня; 1 – аккумулятивная оползневая брекчия оползня поточного типа; 2 – бугор выпирания; 3 – аллювий дна долины; 4 – оползни блокового типа; 5 – зоны брекчирования и оползневые брекчии трения [93]

Первоначально, в соответствии с процессами, выделяли два типа оползней, но впоследствии было доказано, что процессы соскальзывания и давления на подножие склона обычно развиваются совместно.

На рисунках 6.8, 6.9 представлен один из контрастных локальных объектов, который обращает на себя внимание при первом же просмотре материала. На площади съемки в 700 км² он является уникальным по характеру сейсмического изображения, ничего подобного не наблюдается и на соседних площадях. На разрезе объект проявлен серией локально выраженных субпараллельных наклонных осей синфазности в интервале, сопоставляемом с толщиной отложений нижнего понта.

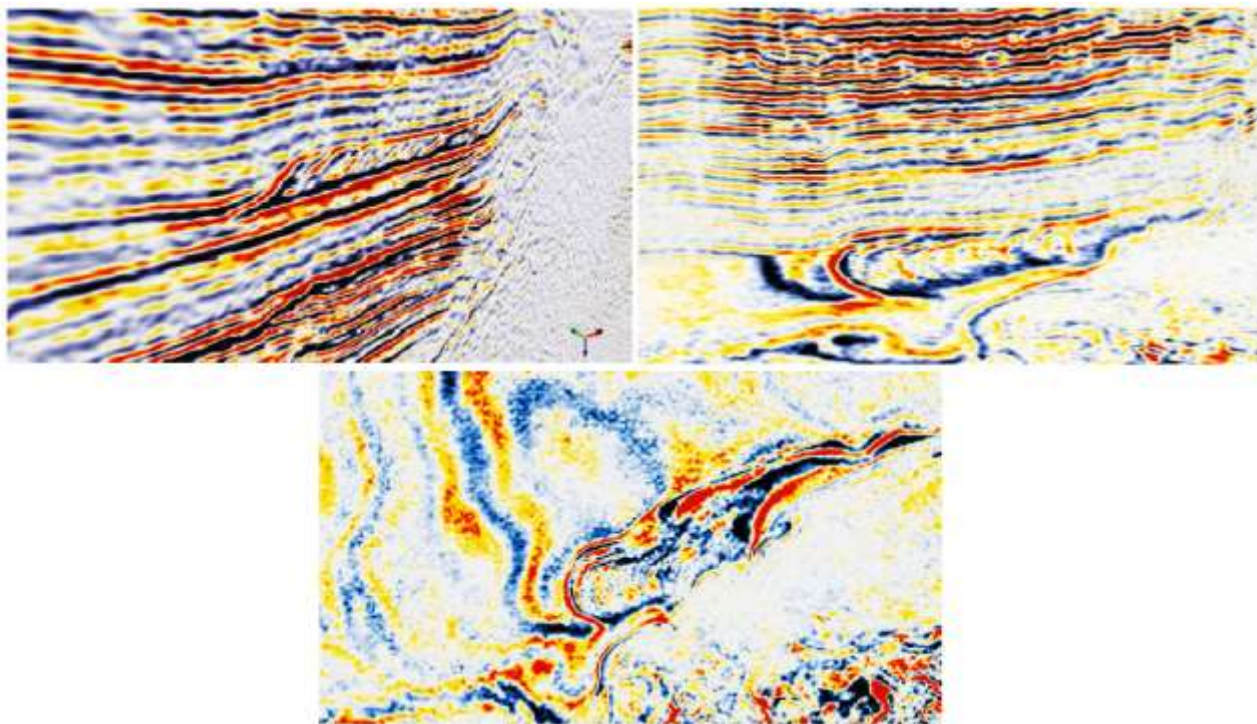


Рисунок 6.8 - Отображение локального оползневого объекта на продольном по отношению к объекту вертикальном сечении и слайсах [93]

По данным единственной скважины, интервалу соответствует тонкое переслаивание глин, алевролитов, аргиллитов, песчаников, мергелистых глин. В кровле отложений верхнего понта отмечается присутствие углистого материала.

Временная мощность пакета наклонных отражений -70-80 мсек (70-100 м), они расположены под острым углом по направлению движения оползня.

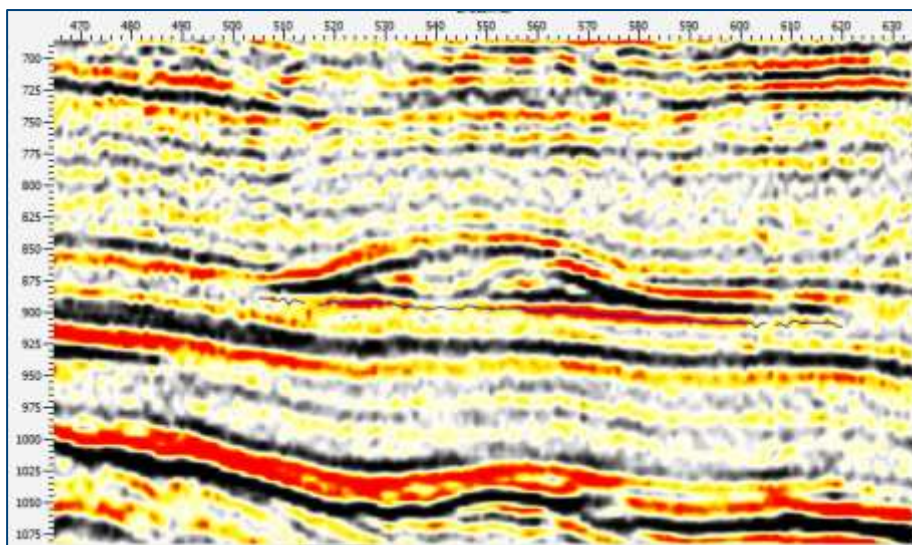


Рисунок 6.9 - Отображение локального оползневого объекта на поперечном по отношению к его расположению вертикальном сечении [93]

В основании этого пакета наблюдается субгоризонтальная протяженная ось синфазности с аномальными значениями амплитуд. Субгоризонтальный характер отражения позволяет использовать для изучения объекта временные слайсы на T_{const} в интервале 850-880 мсек. В плане объект имеет вытянутую форму в юго-западном направлении (по направлению движения), размеры по длинной оси около 2,2 км, по ширине: 1,4 - 1,6 км. В геологическом отношении оползень приурочен к региональному тектоническому шву. На карте донеогенового основания линия тектонического шва фиксируется распространением отложений палеозоя и триаса, предполагается наличие надвиговой дислокации. В отложениях неогена вдоль линии шва отмечается наличие strike-slip зоны позднего заложения, предположительно постплиоценового возраста. Таким образом, вдоль тектонического шва в течение всей геологической истории происходили подвижки разной степени интенсивности, поэтому вывод о тектонической природе данного образования наиболее логичен. В дополнение к аргументам в пользу тектонической природы оползня выступает тот факт, что направление

движения оползня не совпадает с общим региональным трендом транспорта материала.

Третий тип (сейсмообраз) характеризует локальные объекты вытянутой формы в направлении оползания. Форма, предположительно, указывает на более высокую степень пластичности процесса. Подобный тип, вероятно, можно отнести к оползневым потокам.

Один из подобных объектов выявлен в интервале, который сопоставляется с отложениями нижнего понта, демонстрируется на рисунке 6.10. Глубина оценивается в 1625-1640 м. Скважинами не вскрыт. Отложения предположительно представлены переслаиванием песчаников, глин и мергелей, а также их переходных разностей. На вертикальных сечениях объект контрастно не проявляется. Локально выраженная ось синфазности обращает на себя внимание только на отдельных сечениях, расположенных вкост объекта.

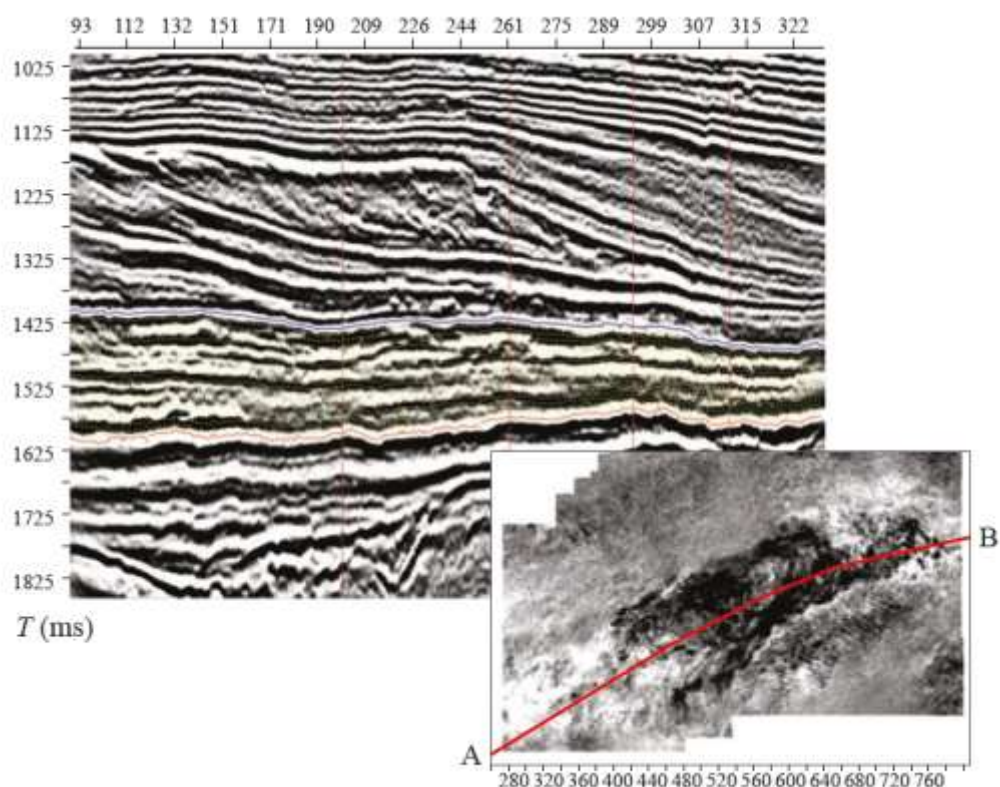


Рисунок 6.10 - Вертикальное сечение вдоль протяженной оси объекта и визуализация наиболее информативного пропорционального слайса в целевом интервале между опорными горизонтами (красный горизонт в основании, синий в кровле целевого интервала)

На вертикальных сечениях расположенных вдоль оси объекта наблюдается условный отражающий горизонт, представленный фрагментарными осями синфазности, участками изображение становится хаотичным и только несколько сечений пересекают серию коротких наклонных осей синфазности, характерных для сейсмического изображения оползневых образований. Анализируя сечения, объект можно легко пропустить, так как он проявлен крайне невыразительно. Подобные условные отражающие горизонты составляют весь временной интервал, сопоставимый с отложениями нижнего понта.

На рисунке 6.11 демонстрируется сейсмическое изображение по горизонту, полученному после трансформации погоризонтного слайса, и подсадки его на ближайший минимум фазы. Благодаря этому технологическому приему объект локализован, а его внутреннее строение подчеркнуто разностью в значениях амплитуд по горизонту. Ширина объекта от 1.0 до 2.4 км, длина оценивается в 7-8 км.

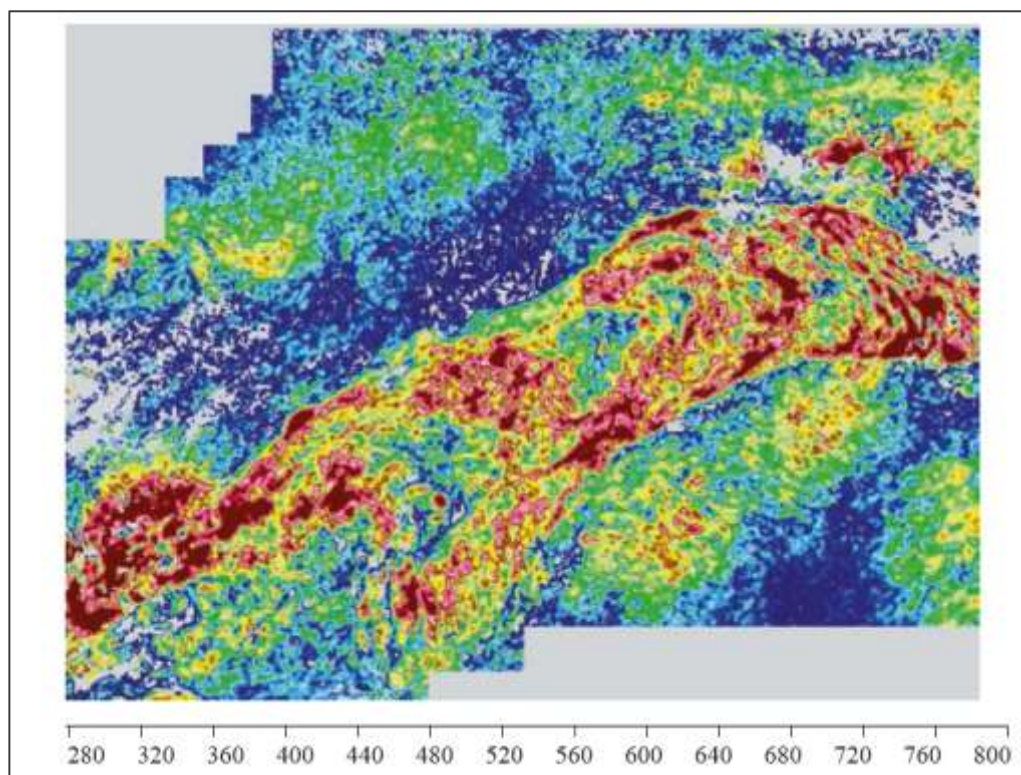


Рисунок 6.11 - Финальное сейсмическое изображение оползневых объектов как результат применения объектно-ориентированных интерпретационных подходов [93]

Прием объектно-ориентированной автоматической корреляции позволяет закартировать объект, подчеркнуть детали сейсмического изображения. Однако имеет один существенный недостаток – отсутствие целостной картины по площади исследований, невозможность интерпретации расположения изучаемой сейсмофации относительно других сейсмофаций, отсутствие материала для анализа седиментационной системы в целом.

Дополнительно в интервале, вмещающем изучаемый объект, проведена классификация. На рисунке 6.12 представлен один из вариантов классификации интервала по форме трассы. Возможно, в интервале замешивается еще одно геологическое событие, поэтому южная граница объекта смотрится неконтрастно. Аналогичное образование выявлено на другой площади, показано на рисунке 6.13. Объект приурочен к стратиграфической кровле сарматских отложений, заключен в интервале мощностью 100-150 м. Выше по разрезу, оползневые отложения перекрыты толщей паннона и мощным клиноформным комплексом. Более подробное его описание приведено в разделе «Восстановление серии унаследованных геологических событий на основе объектно-ориентированного интерпретационного подхода».

Оползневых объектов, которые можно было бы интерпретировать как структурные оползни, не обнаружено. Пример структурного оползня закартированного в интервале черкашинской свиты неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири (регион Приобского месторождения) приводится на рисунке 6.1.

При выделении и детализации описываемых объектов применялись следующие подходы в структурной и динамической интерпретации, которые в совокупности можно обозначить как объектно-ориентированные:

- тщательная пошаговая корректировка интерпретации в зонах спорной корреляции;
- анализ карт временных толщин, которые позволяют оперативно выявить аккумулятивные объекты;

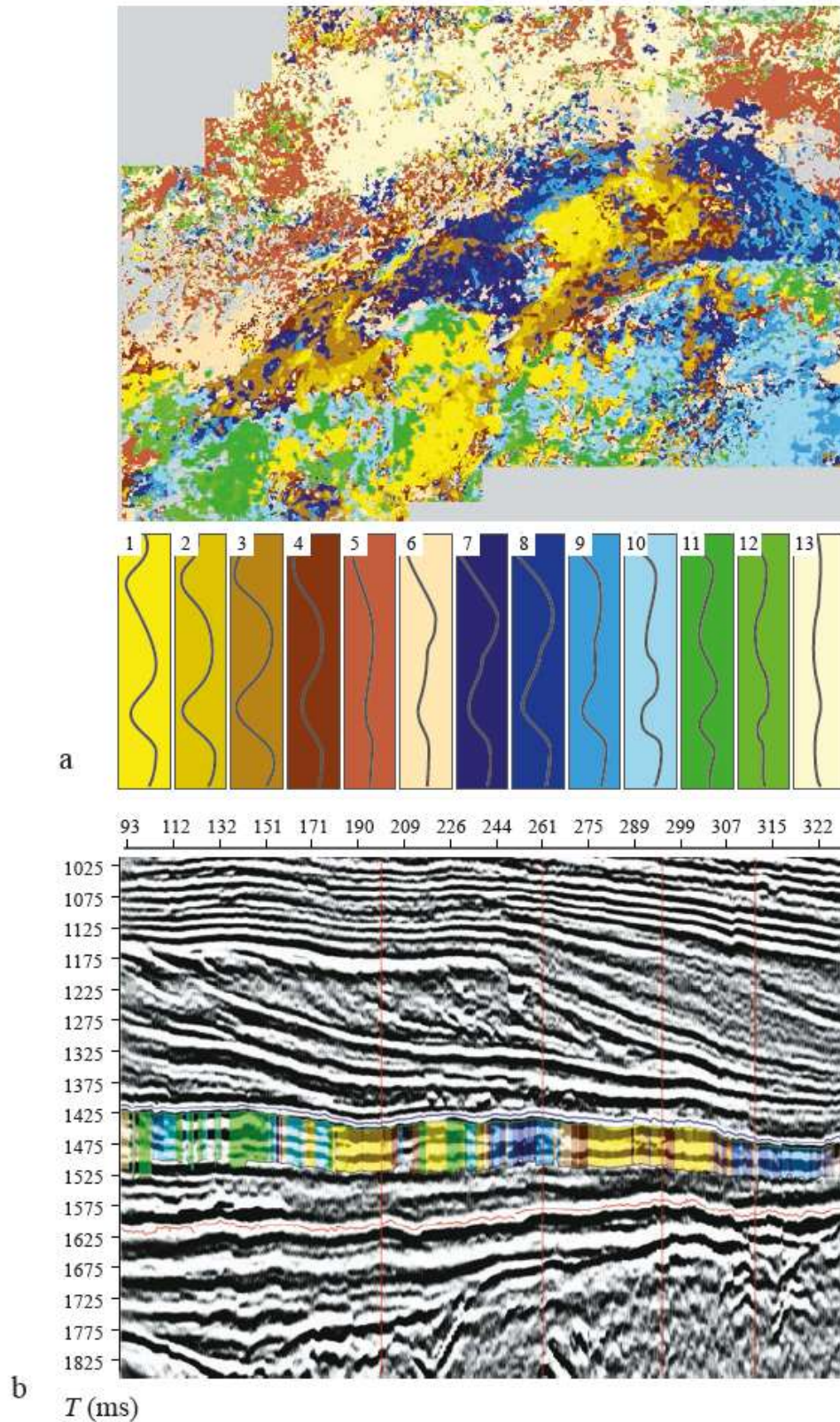


Рисунок 6.12 - Карта классификации целевого интервала по форме трассы (а), формы трасс с цветовой кодировкой (б), сейсмический разрез с выделенным интервалом классификации [93]

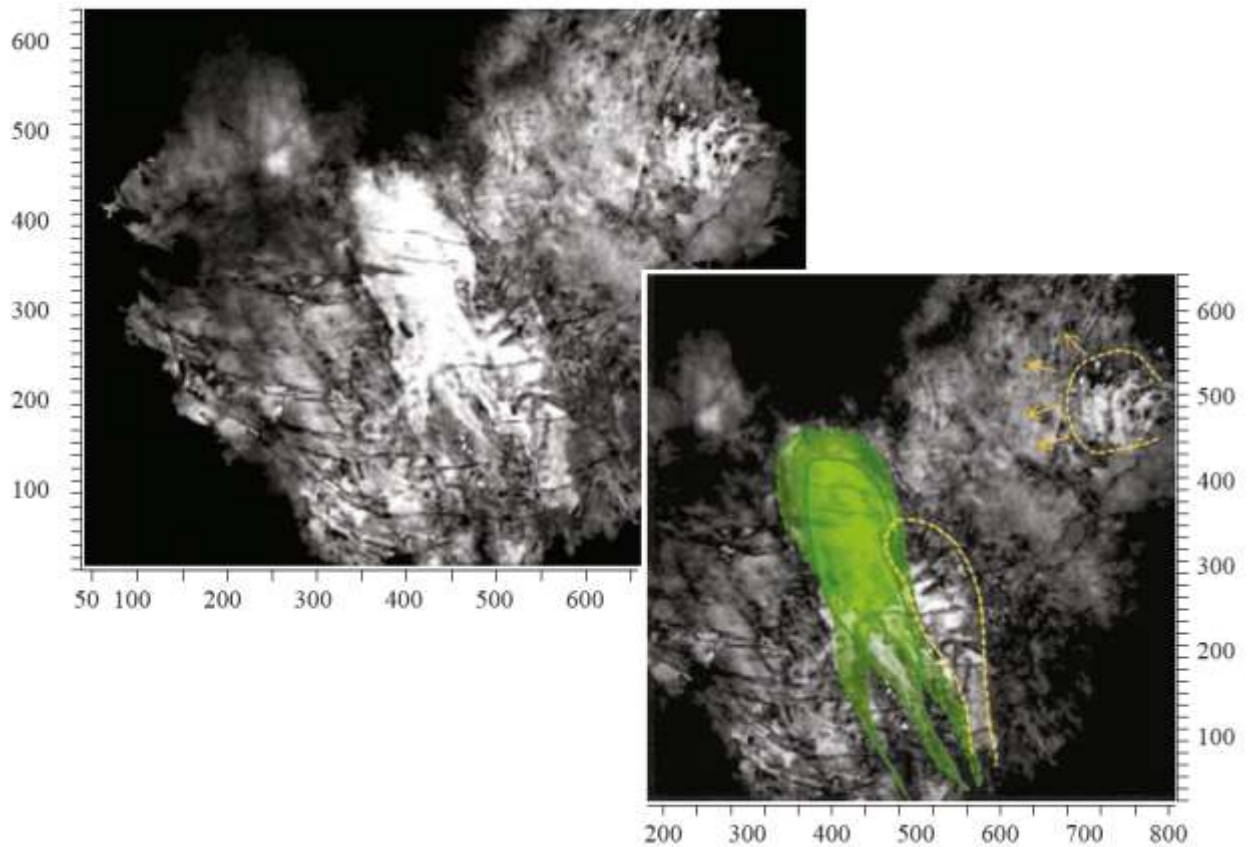


Рисунок 6.13 - Интерпретация оползневых объектов на седиментационном слайсе [93]

- анализ карт различных динамических атрибутов в постоянных и переменных интервалах, с использованием приемов комбинации наиболее независимых атрибутов;
- анализ срезов (пропорциональных и погоризонтных) по исходному кубу сейсмических данных и кубам разнообразных трансформаций;
- использование методов классификации в целевом интервале;
- анализ карт геометрических атрибутов, которые помогают подчеркнуть блоковое строение изучаемых объектов;
- объемная визуализация данных интерпретации;
- спектральная декомпозиция;
- оптимизация цветовых палеток.

В настоящий момент по Паннонскому бассейну нет информации об обнаружении месторождений, приуроченных к оползневым образованиям. В этой связи интересно провести параллель с регионами Восточного Паратетиса. В одной из работ (С.Р. Корост, В.Ф. Шарафутдинов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»), посвященной поиску литологических ловушек в нижнечокракских отложениях Дагестанского сектора Терско-Каспийского прогиба, авторы связывают с оползневыми фациями перспективы обнаружения газовых месторождений. В работе отмечено, что внутри глинисто-песчаных пород чокракского горизонта (баденское время), выполняющих Терско-Сулакскую впадину, наблюдается особая литофация, обязанная своим существованием подводнооползневым процессам. Естественные нефтяные и газовые источники, приуроченные к нижнечокракским оползневым телам впервые были описаны В.В. Вассоевичем.

По характеру и масштабу явления авторы выделяют несколько различных типов: от небольших зон сильной плейчатости без разрывных деформаций и складочек различной степени асимметричности, до включения глыб и линз различного размера. По описанию глыбы представляют собой песчаные и песчано-алевролитовые тела размером от одного до нескольких сот кубических метров, ориентированные своей слоистостью в самых различных направлениях, нередко совершенно отличных от элементов залегания нормально напластованных пород. Линзы ассоциируются со сползшими большими пластинами, претерпевшими сравнительно небольшие нарушения внутреннего строения. Эти образования достигают более километра в длину и ширину и нескольких десятков метров по мощности и могут представлять собой литологические ловушки. Предполагается, что в раннем чокраке, в период наибольшей неравномерности (по площади) опускания передового прогиба, оползневые процессы развивались наиболее активно. По мере выравнивания темпов погружения передового прогиба ослабевают и подводнооползневые явления.

Ресурсы, приуроченные к литологически экранированным ловушкам в чокракских отложениях оцениваются достаточно высоко. Во-первых, оползневые

песчано-алевролитовые тела развиты на большой площади, во-вторых, находятся в благоприятных условиях с точки зрения генерации и миграции.

Применительно к условиям клиноформного комплекса Паннонского бассейна, можно предположить, что основные риски в поиске месторождений связаны с миграцией и насыщением.

6.2. Конусы выноса

6.2.1 Теоретические и практические аспекты геолого - геофизического изучения конусов выноса

По данным многочисленных исследований ключевую роль в образовании подводных конусов выноса (ПКВ) играет сочетание трех факторов: привнос осадочного материала в течение продолжительного времени; наличие подводных каналов; палеорельеф склона и зоны разгрузки, принимающей материал. Поступление осадочного материала контролируется множественными факторами, среди которых главную роль играют колебания уровня моря и тектонические движения. Турбидитные течения в озерах могут вызываться активной оползневой деятельностью.

В соответствии со своим названием, конусы выноса, как наземные, так и подводные (ПКВ), имеют локализованную форму пологого или слабовыпуклого полуконуса [74]. Для подводных конусов выноса (ПКВ) типично нарушение классической формы. Несмотря на многообразие их моделей, Д.А.В. Стоу выделяет три типа. Два основных типа - это глубоководные разности: радиальные и вытянутые со всевозможными переходами между ними. Третий тип - мелководный, к нему относятся дельтовые конусы выноса. Подробное описание ПКВ и блок-диаграммы седиментационных моделей приводятся в многочисленных литературных источниках [3, 6, 13, 31, 34, 74, 128, 144, 150, 214, 222, 231]. Согласно седиментационным моделям, основными элементами системы «подводный конус выноса» являются питающие каналы, каньоны, намывные валы, лопасти (лопастьевидные выносы), оползневые уступы и блоки, области

фоновой седиментации между каналами и лопастьевидными выносами. В пределах ПКВ специалисты отмечают характерную дифференциацию осадочного материала: более грубые разности сосредоточены в проксимальных частях конусов выноса, более тонкие – в дистальных частях.

Категория «формы» объекта имеет первостепенное значение для сейсмофациального анализа. Применительно к конусам выноса, их форма в плане не только помогает идентифицировать объект, но и позволяет составить общие представления о среде осадконакопления.

По своему составу конус выноса представлен перемещенным обломочным материалом. Во многих случаях этот факт предопределяет его акустическую контрастность в волновом поле по отношению к вмещающим отложениям, позволяя средствами динамической интерпретации вычлнить изучаемый объект из общего массива сейсмической информации. Возможность идентифицировать элементы системы подводного конуса выноса зависит от многих факторов: качества сейсмических данных, латеральной и вертикальной разрешающей способности сейсморазведки, применяемых подходов в структурной и динамической интерпретации. На сейсмическом разрезе, как показано на рисунке 6.14, расположенном оптимально относительно изучаемого объекта, конус выноса, как аккумулятивное образование, проявляется раздувом осей синфазности и изменением амплитудных характеристик.

Одним из важных поисковых критериев является увеличение временной мощности интервала, в котором присутствуют лопасти конуса выноса. В связи с этим, особое значение имеет точная стратиграфическая идентификация целевого интервала исследований и детальная корреляция отражающих горизонтов, соответствующих его кровле и подошве. Полученная карта временных толщин позволяет выполнить априорное «ранжирование» изучаемой площади на присутствие аккумулятивных объектов.

Сейсмический образ объекта, как на вертикальных сечениях, так и в плане, является достаточно характерным для того, чтобы интерпретатор, имея определенный наработанный опыт, смог зрительно вычлнить его из общей

картины сейсмической записи. Для убедительной интерпретации важно подобрать атрибуты, через которые поисковый объект проявляется наилучшим образом.

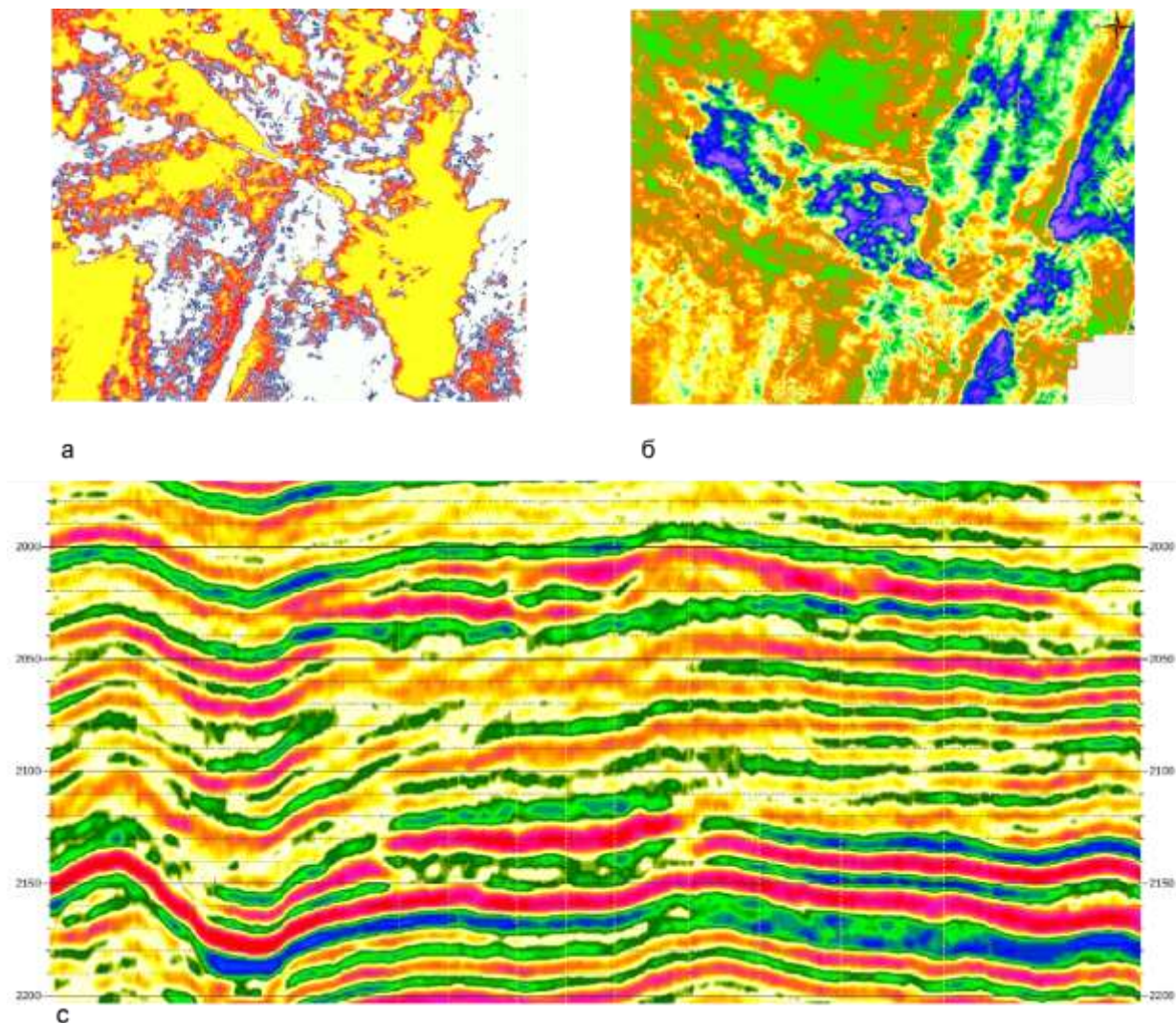


Рисунок 6.14 - Проявление в вертикальном сечении потенциально перспективных объектов. а – конус выноса на седиментационном слайсе по амплитудному кубу; б – оползень на седиментационном слайсе по амплитудному кубу; в – вертикальное сечение с указанными объектами: в интервале времен от 2000 до 2060 мс отмечено присутствие конуса выноса (рис.1а), в интервале 2110 – 2150 мс - наличие оползневого тела (Западная Сибирь)

Не менее значимым фактором является ракурс исследования: наиболее предпочтительны вертикальные сечения 3D кубов в направлении перпендикулярном сносу. Большое значение имеет подбор палеоизохронных поверхностей, позволяющих оценить этапы формирования конуса выноса через серию одномоментных геологических событий.

Если объект является акустически контрастным по отношению к вмещающим отложениям, его размеры соизмеримы с разрешающей способностью сейсморазведки, а качество сейсмических данных достаточно высокое, то эффективно срабатывают средства объемной интерпретации: работа с режимом прозрачности, выделение объекта (geobody) и т.д.

Все перечисленные приемы относятся к подходам и инструментам объектно-ориентированной интерпретации.

6.2.2. Морфометрические характеристики конусов выноса на основе объектно – ориентированной интерпретации

В Паннонском бассейне в течение понта происходило его активное заполнение [162, 170, 225, 234]. Глубина бассейна оценивается в 400-600 м, угол наклона склоновой части $-1-2^\circ$, длина склона $-5-7$ км. Доминантное направление определено предыдущими исследованиями с северо-запада на юго-восток. Это направление подтверждается по данным МОГТ 3D в пределах съемок, тяготеющих к осевой части Банатского грабена. По материалам съемок, расположенных в пределах субширотной Сербобранской депрессии, отчетливо выделяется еще одно зональное направление с юго-запада на северо-восток, перпендикулярное региональному направлению. Направление транспортировки материала зафиксировано в оползневых дислокациях и конусах выноса. На рисунке 6.15 приводится коллаж из слайсов, полученных по сейсмическим данным в клиноформном комплексе.

Полученные данные позволяют проиллюстрировать сложный характер заполнения озерной котловины на региональном уровне. Однако в пределах локальных депрессий сохраняется такой же сложный механизм заполнения: одно осевое направление и одно или два направления с бортовых частей. На рисунках 6.16, 6.17 демонстрируются конусы выноса в бортовых частях депрессий.

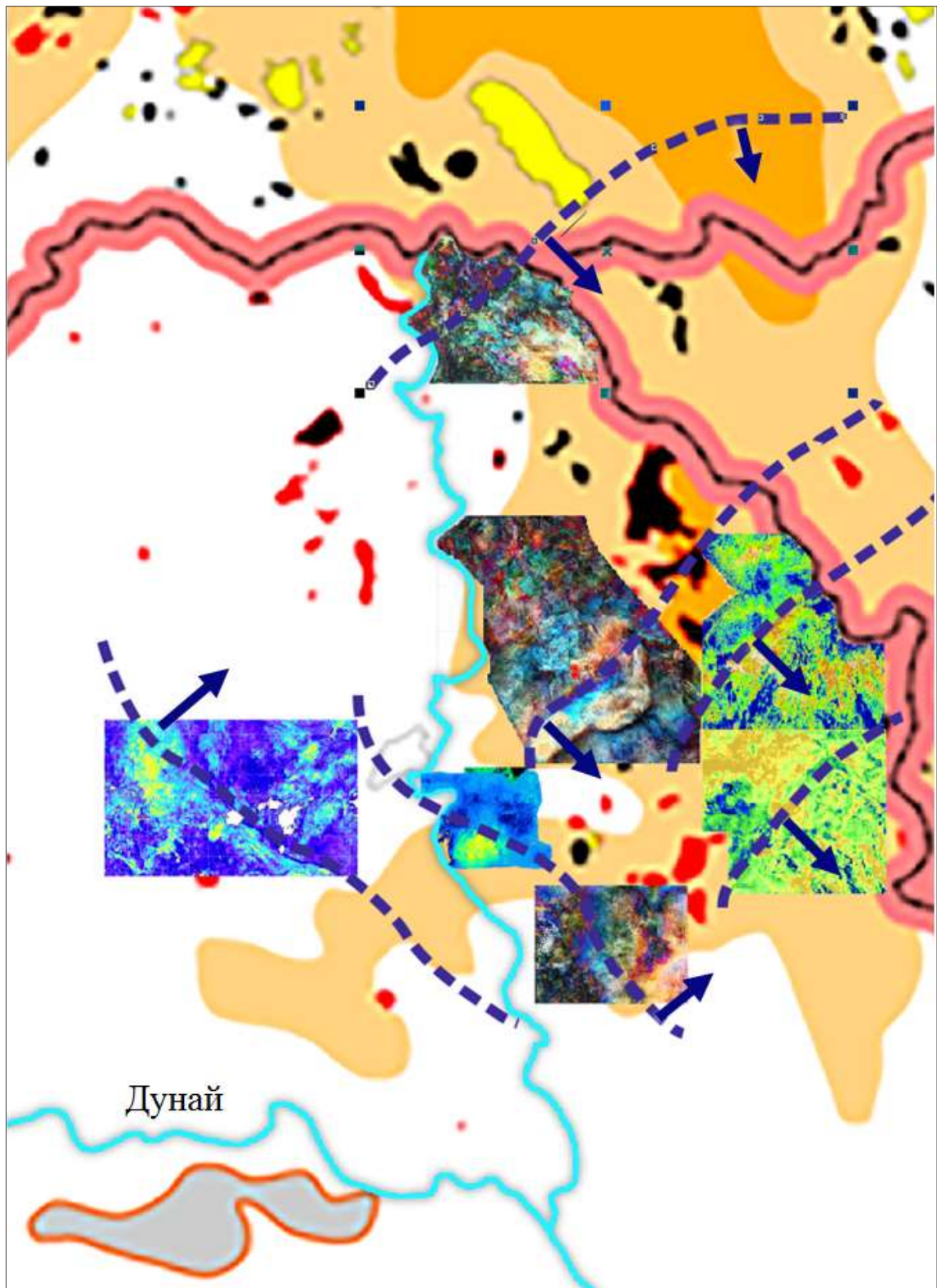


Рисунок 6.15 – Схема направлений регионального сноса осадочного материала на основе интерпретации сейсмических слайсов

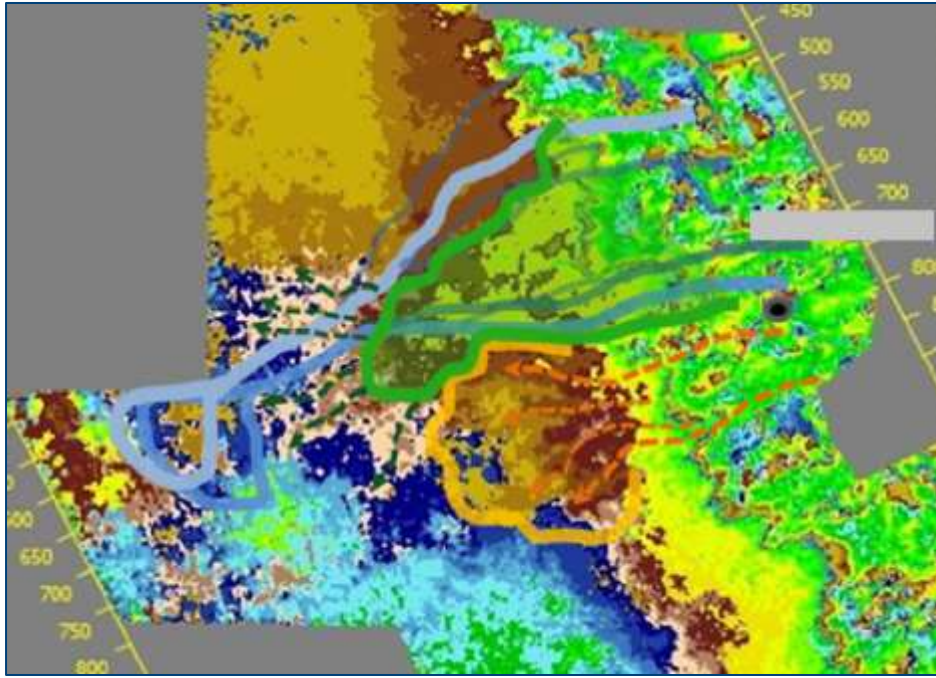


Рисунок 6.16 – Интерпретация конусов выноса в пределах борта депрессии Мако Трог

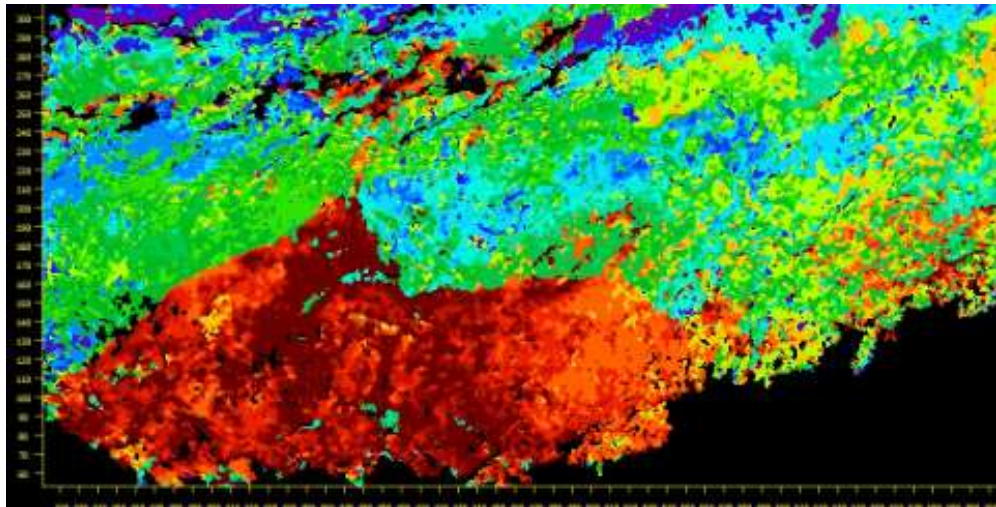


Рисунок 6.17 – Отображение на карте классификации предположительно конусов выноса в пределах борта Сербобранской депрессии

Особенностью сейсмогеологических условий является возможность изучения целостной системы: шельф – склон – подножие. В отдельных случаях, если удастся проследить палеоизохронную поверхность, на погоризонтных слайсах можно наблюдать системы дельтовых палеоканалов в шельфовой части, подводящие каналы конусов выноса на склоне и в подножии склона, лопасти конусов выноса.

По результатам сейсмофациального анализа можно выделить три типа объектов: одиночные конусы выноса, сложносочлененные конусы выноса и конусы прорыва. Одиночные конусы представлены фациями подводных и питающих каналов, небольшими фронтальными лопастями, фоновыми отложениями подножия склона. Сложносочлененные объекты отличаются многочисленными линзовидными телами с глинистыми перемычками.

Выделенные по керну фации подтверждают турбидитовый генезис отложений. В целом они подобны фациям ачимовских отложений. Песчаники имеют преимущественно мелкозернистый гранулометрический состав. Циклы Боума в медиальной части имеют мощность первые десятки сантиметров. Принципиальное отличие от ачимовских турбидитов заключается в достаточно интенсивной горизонтальной биотурбации глинистых прослоев медиальной и дистальной части конуса.

Размеры изученных конусов выноса, в среднем, составляют 5-10 км в длину и 4-10 км в ширину. Это свидетельствует о латеральном смещении большинства конусов в процессе их формирования. Конусы прорыва значительно меньше и имеют обычно размеры 400-2000 м. Пространственно они приурочены к выпуклым излучинам питающих каналов, четко фиксируемых на сейсмике.

Конусы выноса турбидитовых систем традиционно считаются перспективными для обнаружения литологических ловушек, при наличии надежной покрышки.

На основе атрибутивного анализа и по наличию AVO аномалий 3 класса в пределах одной из площадей, в подошвенной части клиноформного комплекса было закартировано 34 перспективных объекта, предположительно представляющих собой лопасти конусов выноса [14, 131, 225]. На рисунке 6.18 представлен разрез, на котором отчетливо отображается одна из подобных аномалий.

Выявленные объекты характеризуются овальной формой, длинная ось соответствует направлению транспортировки материала. На рисунке 6.19

представлен седиментационный слайс и характерная форма объекта, интерпретируемого как лопасть. Площадь объекта около 2.0 км^2 .

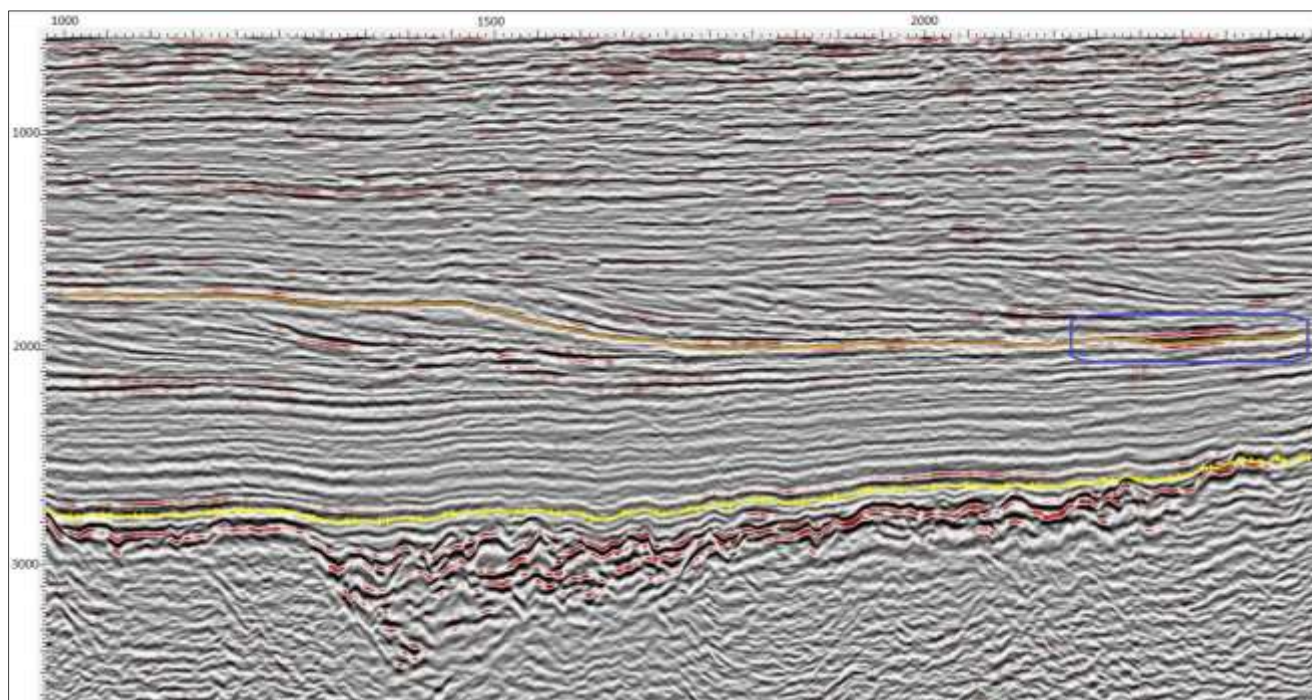


Рисунок 6.18 - Амплитудная аномалия на временном разрезе, интерпретируемая как лопасть конуса выноса

Статистический анализ данных, показанный на рисунке 6.20, позволяет сделать вывод, что наиболее реальный размер геологического события (в данном случае лопасти) находится в диапазоне значений от 1 до 8 км^2 . Объекты, площадью выше этих значений, возможно, представляют собой серию лопастей или не существуют. Если обратиться к статистике по всем месторождениям региона, то 94% залежей по площади соответствуют значениям до 2.5 км^2 .

На основе секвенс-стратиграфических исследований сделано предположение, что в процессе формирования клиноформного комплекса не существовало периодов резкого падения уровня озера. Обстановку осадконакопления можно охарактеризовать как активную с высокой энергетикой. Анализ геологических событий по площади и амплитудным характеристикам позволяет сделать вывод, что процесс осуществлялся поступательно ритмично.

В 2013 -14 гг. на площади заложены скважины на два наиболее крупных объекта из 35 выявленных. Вероятность геологического успеха оценивалась достаточно высоко, около 0,36 и основывалась на существовании литологической ловушки – лопасти конуса выноса, аномалии типа «Bright Spot», наличии нефтематеринских отложений и значительных мощностей осадочного чехла. Пути вертикальной миграции обосновывались системой микро и макро трещин.

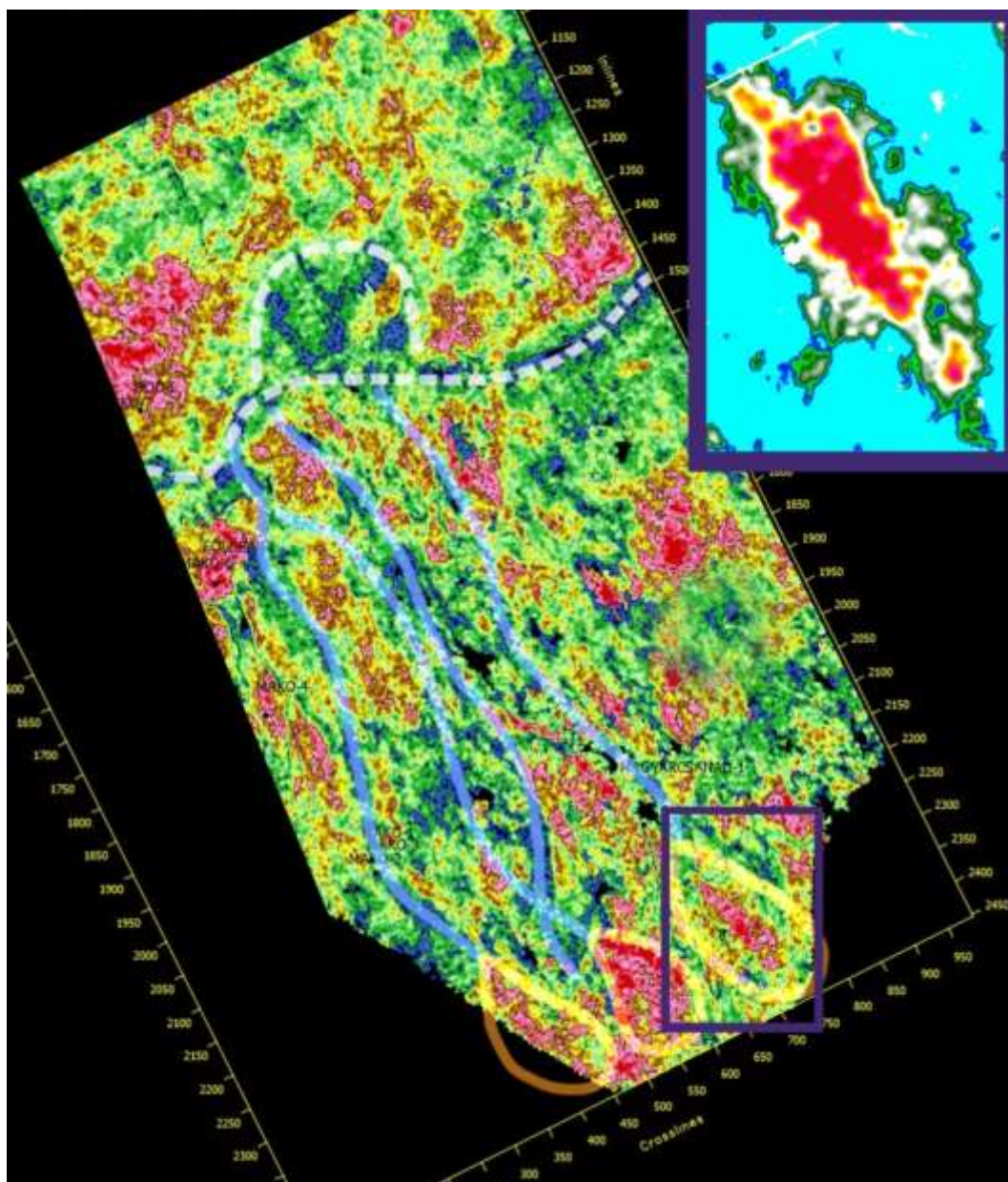


Рисунок 6.19 - Пример интерпретации седиментационного слайса в пределах клиноформного комплекса. Выделение характерных элементов: склон, подводящие каналы, лопасти [33]

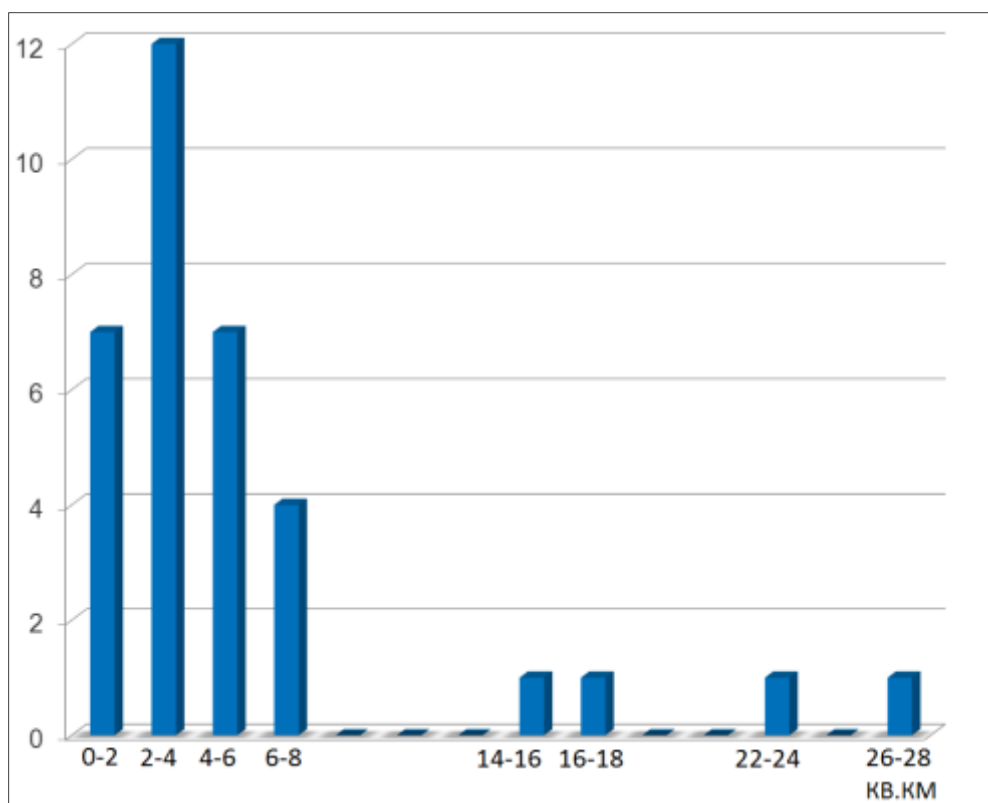


Рисунок 6.20 – Распределение объектов, выявленных в подошвенной части клиноформного комплекса, по их размерности (площади)

В результате, по данным ГИС и отбора керна в первой скважине выделено 9 пластов-коллекторов по 4-8 м, пористость по ГИС – 12-15%, но в керна, признаков углеводородов не отмечено. Вторая скважина тоже оказалась unsuccessful. Таким образом, продуктивность литологических ловушек, связанных с конусами выноса, в клиноформном комплексе не подтвердилась. Бурение на третий объект признано нецелесообразным.

Значительные мощности осадочного чехла, наличие нефтематеринских отложений характеризуют депрессии как активные углеводородные системы. Вероятность миграции УВ по системе микро и макро трещин послужила одним из пунктов обоснования перспектив литологических ловушек в клиноформном комплексе. Факт миграции углеводородов вверх по восстанию пластов доказан наличием залежей в бортовых частях. Однако детальная интерпретация сейсмических данных позволила сделать вывод, что тектонических нарушений с высокой долей вероятности, в погруженной части депрессии нет, следовательно,

нет путей вертикальной миграции. Поэтому литологические ловушки оказались не заполненными.

При выделении и детализации описываемых объектов применялись следующие приемы структурной и динамической интерпретации, составляющие в комплексе объектно-ориентированный подход:

- тщательная пошаговая корректировка интерпретации в зонах спорной корреляции;
- анализ карт временных толщин, для оперативного выявления аккумулятивных объектов;
- анализ многочисленных карт различных динамических атрибутов в постоянных и переменных интервалах с использованием приемов комбинации наиболее независимых атрибутов;
- анализ срезов (пропорциональных и погоризонтных) по исходному кубу сейсмических данных и кубам разнообразных трансформаций;
- использование методов классификации по форме трассы в целевом интервале;
- спектральная декомпозиция,
- оптимизация цветовых палеток.

6.3. Шлейфы склонов

Множественные источники сноса формируют у подножия склонов шлейфы, состоящие преимущественно из обломочного материала, перенесенного потоками или перемещенного под действием силы тяжести. Морфологически, верхняя граница подобных образований, как правило, совпадает с вогнутым перегибом склона. Описывая современные морские глубоководные обстановки, Х.Рединг выделяет три обобщенные модели склоновых шлейфов по особенностям строения осадочной толщи и морфологическим элементам:

нормальный обломочный шлейф; шлейф, связанный с разломами; карбонатный шлейф [74]. Формирование шлейфов склонов в континентальных и переходных обстановках во многом носит аналогичный характер. В морских обстановках шлейфы склонов представляют собой пологонаклонные поверхности; маскируют области между шельфом и дном котловины, окружая как маленькие бассейны на шельфе, так и крупные океанические котловины; встречаются на флангах океанических хребтов, изолированных подводных гор и плато. Ширина склоновых шлейфов изменяется от менее 1 км до более 200 км, угол наклона от 2° до 7° , изредка превышает 10° .

Интерпретация шлейфов по сейсмическим данным строится, в основном, на геологической концепции и описании керна. Образования, как правило, не контрастны и не имеют оригинальной формы, как оползни или конусы выноса. Диагностикой могут послужить косвенные признаки: множественные источники сноса, наличие выступов в палеорельефе, общие представления об истории геологического развития региона.

Интерпретация шлейфов склонов подробно рассмотрена при описании сейсмостратиграфического комплекса (ССК 1), ассоциированного с нижнемиоценовыми отложениями Паннонского бассейна в разделе 4.2.2.

Фация «шлейфы склонов» присутствует и в отложениях ССК 2. На рисунке 6.21 демонстрируется концептуальная модель склоновых образований для отложений раннебаденского возраста в северной части депрессии Драва (Хорватия).

На рисунке 6.22 приводится пример интерпретации подобных образований в целевом интервале баденских отложений по данным карты классификации формы трассы в пределах одной из площадей Банатского грабена.

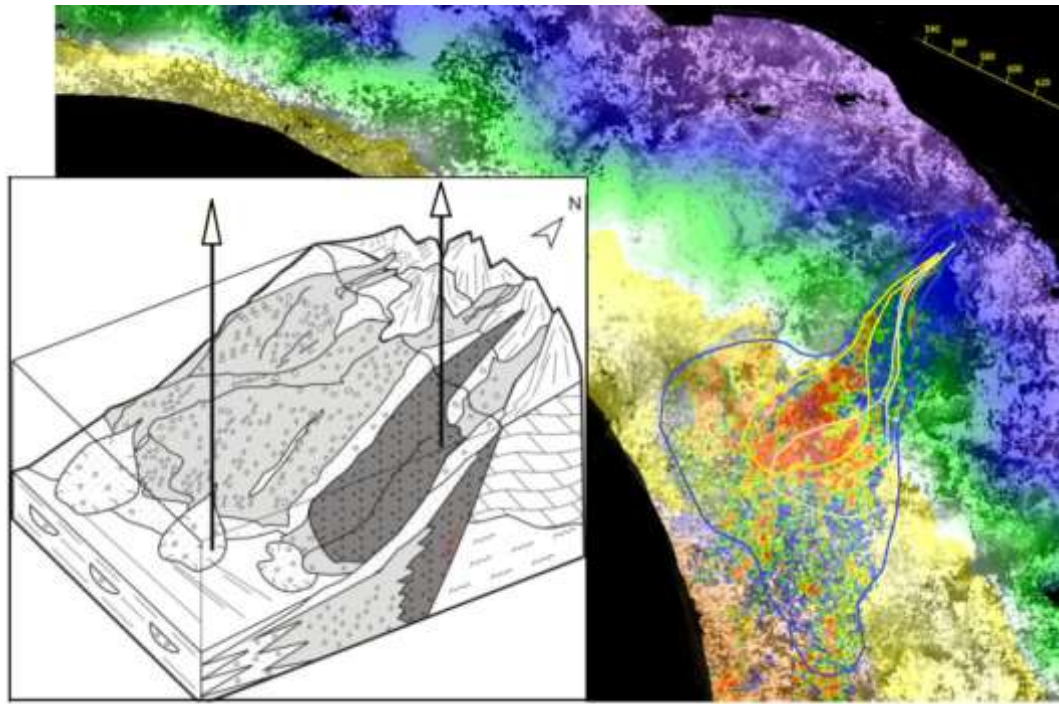


Рисунок 6.21 - Сопоставление концептуальной модели и интерпретации сейсмических данных

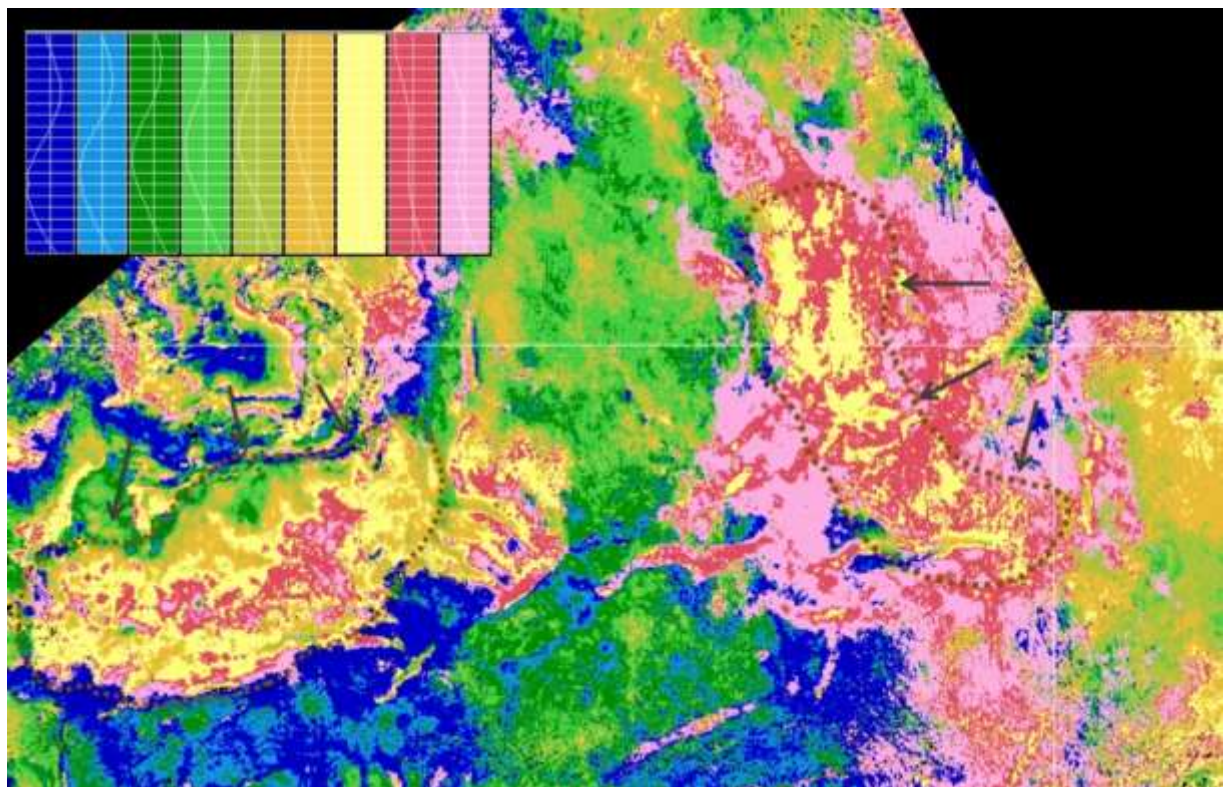


Рисунок 6.22 – Площадное распространение фации «шлейфы склонов» на основе карты классификации по форме трассы в целевом интервале (желтый и красный оттенки)

ГЛАВА 7 ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПАЛЕОКАНАЛОВ

7.1. Типизация палеоканалов в толще понт-плиоценовых отложений озерно-аллювиальной равнины

На основе сейсмофациального анализа, выполненного в интервале, сопоставимом с отложениями понт-плиоценового возраста, установлено наличие разнообразных форм речных систем [83, 96, 179, 186, 202, 228]. По сейсмическим данным определено доминирующее субмеридиональное направление русел. На рисунке 7.1 демонстрируется коллаж из разновременных слайсов, отображающий общую региональную схему.

Можно предположить существование разветвленных рек, где многочисленные русла разделены намывными островами, сложенными в основном песчаным материалом. На рисунке 7.2 приводится пример интерпретации разветвленной речной системы, выполненной в автоматическом режиме по кубу амплитуд.

В отдельных временных интервалах широко развиты меандрирующие русла, отмечаются локальные участки ограниченного меандрирования, которые могут быть связаны как со стабилизацией тектонического режима, так и с процессами воздымания территории. В последнем случае меандрирование подпадает под определение «вынужденное». Пример отображения пояса меандрирования на погоризонтном слайсе показан на рисунке 7.3.

Фрагментарно присутствуют и спрямленные участки русел.

Такое многообразие форм миграционно-многоярусных речных систем отвечает общим представлениям о геологической истории региона.

В течение позднего понта и плиоцена продолжалась тектоническая активность, как в центральной части бассейна, так и на его периферии. В совокупности с глобальными вариациями климата тектонические процессы повлияли на питание рек и густоту речной сети (особенно для горных районов),

на эрозионные процессы (при воздымании блоков), на морфологию речных долин и их изменение, направление русел.

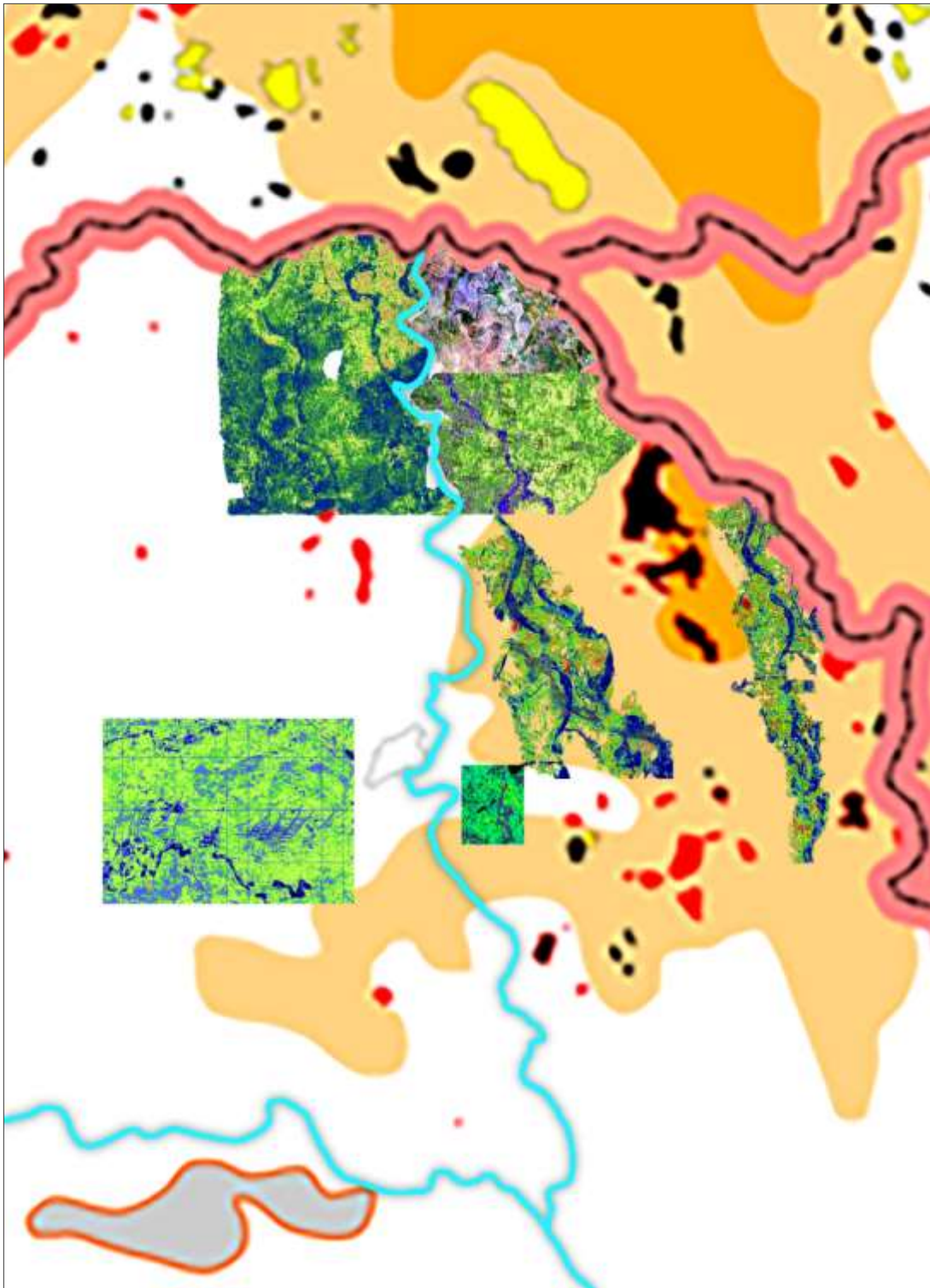


Рисунок 7.1 – Коллаж из погоризонтных слайсов, демонстрирующий два ключевых направления речных систем: субмеридиональное и субширотное

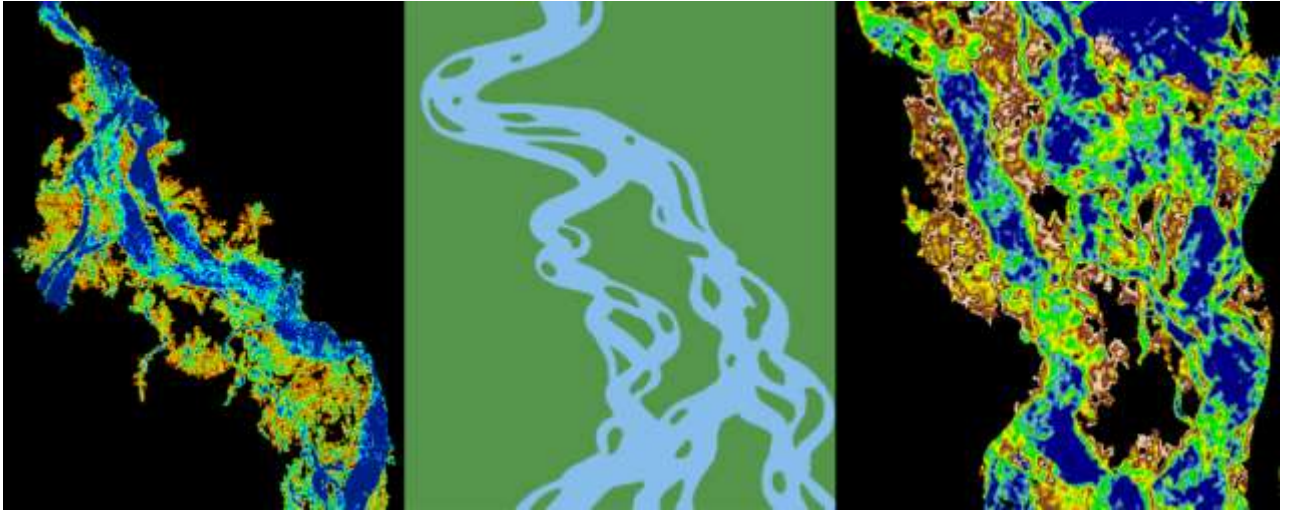


Рисунок 7.2 - Пример интерпретации разветвленной речной системы, выполненной в автоматическом режиме по кубу амплитуд [93]

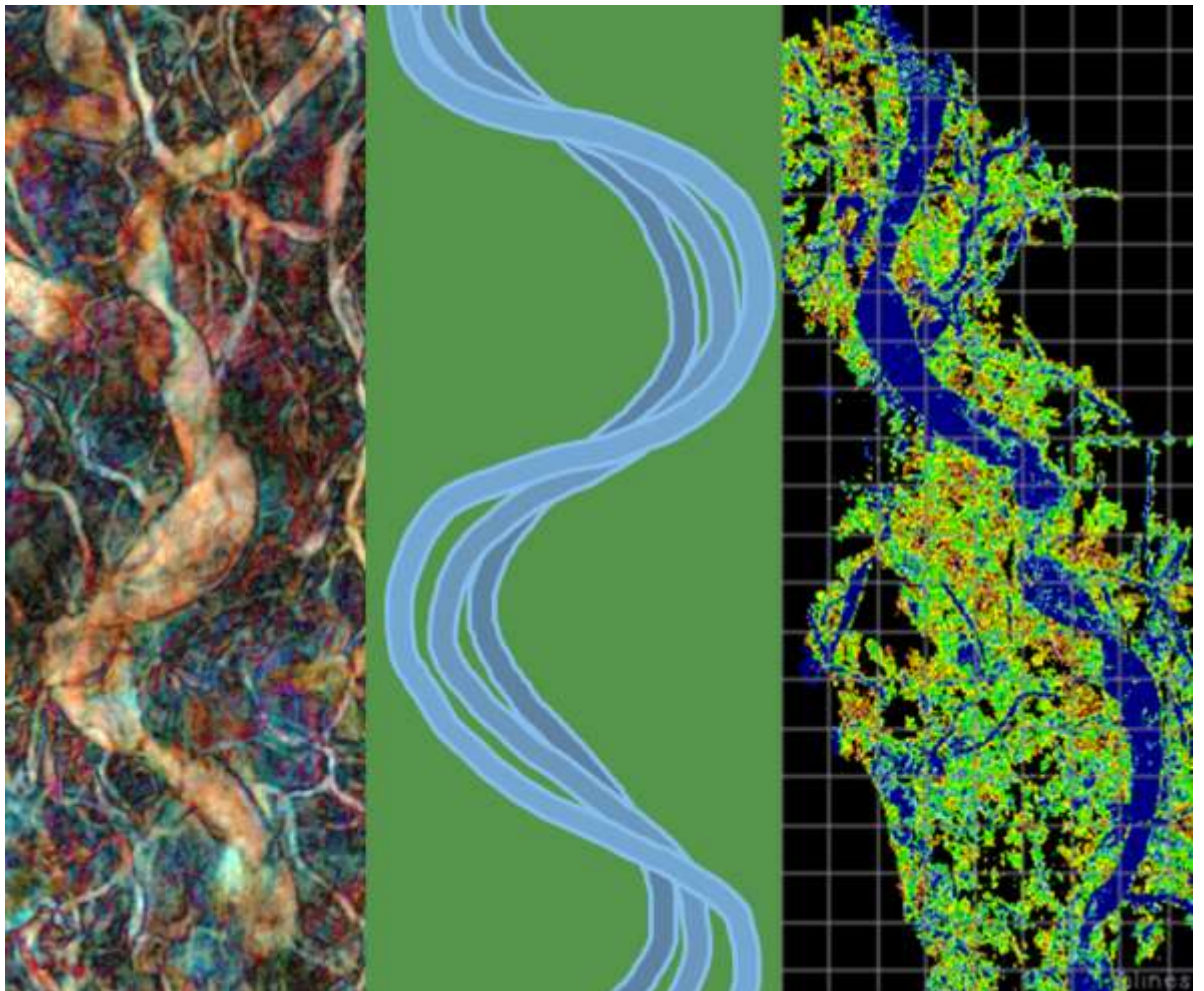


Рисунок 7.3 - Отображение пояса меандрирования на погоризонтном слайсе [93]

В результате тектонических процессов были сформированы структурно-тектонические ловушки в толще неогеновых отложений, и в отдельных случаях запущен процесс вертикальной миграции углеводородов. Аллювиальные песчаные тела понт-плиоценового возраста, находящиеся вблизи каналов миграции, оказались хорошим резервуаром и вместили в себя флюид. Не исключается, что существуют локальные скопления биогенного газа. Анализ множественных факторов, включая изучение природы сейсмических аномалий, позволяет подобрать ключ к вычленению малых месторождений на фоне многочисленных литологических изменений.

Аллювиальные отложения встречаются в разновозрастных геологических формациях по всему миру. Многообразие их современных аналогов позволяет активно использовать метод «актуализма» Чарлза Лайеля и проецировать наши знания об особенностях современного речного седиментогенеза, о морфологии рек, закономерностях их развития во времени и в пространстве на события, запечатленные в геологической истории [1].

По заключению многих исследователей русла древних рек и связанные с ними песчаные тела аллювиального генезиса являются надежными литологическими ловушками [137]. Условия их формирования определяют наличие и коллекторов, и покрышек. Коллекторами, в большинстве своем, являются русловые песчано-галечниковые образования, покрышками - глинистые отложения озер и пойм. Локальное распространение первых формирует ограниченное пространство, пригодное для вмещения углеводородного флюида, поэтому основная задача комплексной интерпретации сейсмической и скважинной информации: выявить и закартировать русловые фации речных систем.

Изучение русловых объектов сейсморазведкой сталкивается с различными ограничениями, прежде всего, связанными с вертикальной и латеральной разрешающей способностью дистанционного геофизического метода. Для речного седиментогенеза характерно многообразие фациальных обстановок при незначительной мощности геологических тел (от первых метров до двух десятков

метров). Аллювиальные системы отличаются крайней неоднородностью строения в силу того, что речные русла непрерывно трансформируются, претерпевая различные флуктуации. Изменения в вертикальной плоскости связаны с процессами глубинной эрозии и аккумуляции. Горизонтальные или латеральные изменения – с воздействием боковой эрозии. Продольные – с формированием и передвижением наносов (перекаты, осередки).

В настоящее время среди нефтяников наиболее распространена типизация речных систем по форме русел (морфологическая). Это обусловлено важностью архитектуры речных систем для поиска резервуаров углеводородов [37, 136, 198, 199, 219, 232]. Выделяется четыре типа рек с одиночным руслом – спрямленные и меандрирующие реки; с многорукавным руслом - ветвящиеся (блуждающие русла) и анастомозирующие реки. Следует отметить, что в геоморфологии существуют и более развернутые классификации, например, американского гидролога Д. Росгена, пользуясь которой можно выделить до 94 типов рек [215].

Для сейсмической интерпретации категория «формы» объекта также имеет первостепенное значение, и в случае интерпретации палеорусел позволяет выгодно подчеркнуть преимущества площадного геофизического метода.

Ключевые особенности строения речных систем основных типов, с акцентом на морфологию аллювиальных тел и их геометрических параметрах приводится далее.

Спрямленные реки. Преимущественно развиты в предгорных областях и формируются за счет донной эрозии речного потока. Прямолинейные речные русла встречаются редко, имеют преимущественно деградирующий характер, они обычно короткие и чаще всего переходят в участки многорукавных русел. Типичны русла осередкового, ленточно-рядового и побочного типа, слабоизвилистые (коэффициент извилистости близок к 1). Для них часто трудно отличить русловые отложения от пойменных, которые местами вообще отсутствуют, или представляют собой узкие полосы дна долин, сложенные обычно грубообломочным материалом.

Ветвящиеся реки (с блуждающим руслом или сплетенные). В продольных межгорных впадинах с уменьшением скорости течения реки русло дробится на рукава и протоки, становится разветвленным (многорукавным). Ответвления реки (рукава), отделенные от основного русла небольшими многочисленными островами, мало отличаются от основного русла. Они имеют слабую до умеренной степень извилистости и сложены разнообразными по строению, зернистости и окатанности отложениями. Вдоль берегов развиты прибрежные отмели. Анализ современных аналогов ветвящихся рек показал, что их отложения состоят из вертикально и латерально слившихся индивидуальных канальных и баровых тел, формирующих мощные (десятки метров) и латерально выдержанные (протяженность десятки километров) песчаные тела. Поэтому отношение параметров ширина/мощность у таких речных систем значительно выше, чем у меандрирующих рек. В продольных межгорных впадинах пойма рек становится шире, однако сложена все еще грубообломочным и песчаным материалом. Зачастую сложно выделить преобладающий тип эрозии, так как интегрально проявлена и донная и боковая эрозии.

Меандрирующие реки. Русла меандрирующих рек имеют отчетливо извилистый характер. Извилины русел, именуемые меандрами, непрерывно изменяются и смещаются (свободное и ограниченное меандрирование), формируя сильно извилистое русло, а вместе с ним и долину реки не эрозионной, а аккумулятивной деятельностью потока. В долине каждой реки как результат бокового смещения (боковая эрозия) русла формируются двучленные аллювиальные накопления, состоящие из грубых русловых и тонкозернистых пойменных осадков, что отличает их от рек с твердым донным стоком. Меандрирующие реки обычно образуют широкие (до нескольких км) песчаные пояса (риббоны), сложенные латерально аккрецированными индивидуальными барами-косами. Типичные параметры для изолированных меандрирующих поясов: мощность от 5.0 до 15-20 м; ширина – от 1.0 до 5 км. Для песчаных кос (аккреционный комплекс) фиксируется отношение длина/ширина/толщина как 190/90/1. Во время паводка происходит усиленная поперечная циркуляция и

наибольший подмыв вогнутого берега. При этом выносятся максимальное количество аллювия в сторону выпуклого берега, образуются прирусловые валы. Прирусловые валы рек имеют обычно высоту 0.5-1.0 м (у крупных рек редко до 5 м), и поэтому не могут четко фиксироваться сейсмическими исследованиями, как хорошо выраженные вдольбереговые валы турбидитовых каналов. У сформированных в периоды сильных паводков и обращенных также в сторону выпуклого берега конусов прорыва (кревассов), сложенных пойменным аллювием, мощность обычно 0.5 – 1.0 м, реже до 3 м; длина (ширина) может превышать мощность в 2000 раз, обычно соотношение 1000:1. Характерны сегментные поймы. Образование их связано с меандрированием реки и расчленением поймы на ряд участков – сегментов, расположенных по обеим сторонам русла. При большой затопляемости пойм наблюдается незавершенное меандрирование. Иная картина для рек вынужденного (врезанного) меандрирования за счет донной эрозии, которая наблюдается при продолжительном устойчивом воздымании территории. Меандры таких рек длительное время неизменны и формируют русла различной степени извилистости от умеренной до сильной. Вследствие постоянного врезания русла, пойменные отложения не выражены.

Анастомозирующие реки развиты в равнинных условиях и характеризуются наличием извилистых нерегулярно соединяющихся и разъединяющихся русел, разделенных стабилизировавшимися островами, покрытыми плотной растительностью. Такие реки транспортируют тонкий взвешенный материал и переносят небольшое количество осадков. Русла длительное время не меняют своего положения, поэтому наблюдается только вертикальное «многоэтажное» сочленение. Также как и прямолинейные реки, анастомозирующие речные русла не играют существенной роли в формировании песчаных пород-коллекторов.

На основании представленной классификации, можно сделать выводы, что в сейсмическом изображении проявляются речные системы ветвящегося и меандрирующего типа, наименее выражены анастомозирующие реки.

Экспресс-интерпретация сейсмических данных позволяет достаточно быстро определиться с аналогом речной системы. Вторая итерация интерпретации и последующий сейсмофациальный анализ выполняются уже с учетом выбранного аналога. Выбор аналога позволяет достраивать, предполагать существование отдельных элементов системы. Такой подход обязательно должен учитывать не только общее видение концептуальной модели, но и физические ограничения связанные с вертикальной и латеральной разрешенностью сейсмического метода.

Статистика свидетельствует, что ширина современных русел варьируется от первых десятков до нескольких сотен метров, редко до 2 км. Мощность одиночных каналов даже очень крупных рек не превышает 30 м, в основном это величины до 10-15 м. Поэтому любые аллювиальные отложения мощностью свыше 25 м будут представлять систему из вертикально «сросшихся» русел. Обращает на себя внимание тот факт, что толщины песчаных тел фации песчаных (внешних) пойм на временно заливаемых участках, кривасс и кривассовых глифов составляют первые метры. Эти отложения не являются акустически контрастными по отношению к вмещающим терригенным породам и, по всей видимости, возможность обнаружения этих элементов концептуальной модели в сейсмических данных стремится к нулю.

Для получения четкого сейсмического изображения необходимо соблюдение двух важных условий. Первое – акустическая контрастность объекта в волновом поле, второе – соответствие геометрических параметров вертикальной и латеральной разрешающей способности сейсмического метода. В сейсмическом изображении палеорусло может проявляться в изменении конфигурации сейсмотрассы в соответствующем интервале исследований, в изменении амплитуды, в появлении дополнительных осей синфазности. Примеры приводятся на рисунках 7.4, 7.5. Однако, наиболее реалистично, при работе с сейсмическими данными МОГТ 3D, палеорусла проявляются на погоризонтных, пропорциональных и временных/глубинных слайсах ($T \text{ const}/ N \text{ const}$), как по амплитудному кубу, так и по его атрибутивным модификациям. Продемонстрировано на рисунке 7.6.

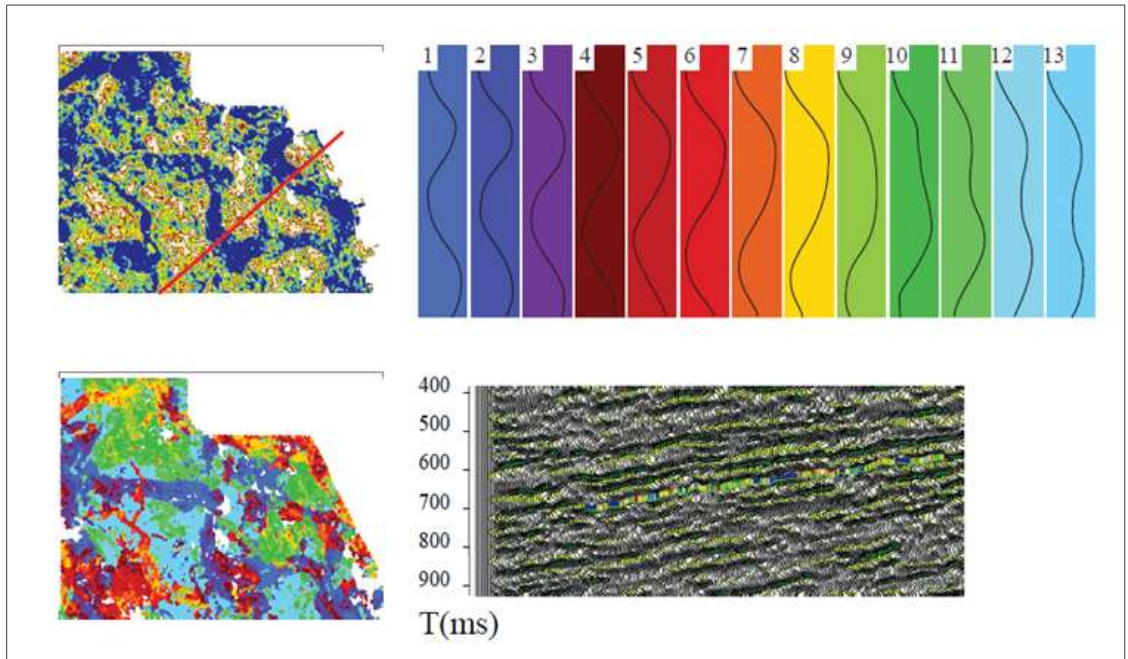


Рисунок 7.4 - Отображение палеорусла на седиментационном слайсе, выполненном по кубу амплитуд и на картах классификаций целевого интервала по форме трассы [93]

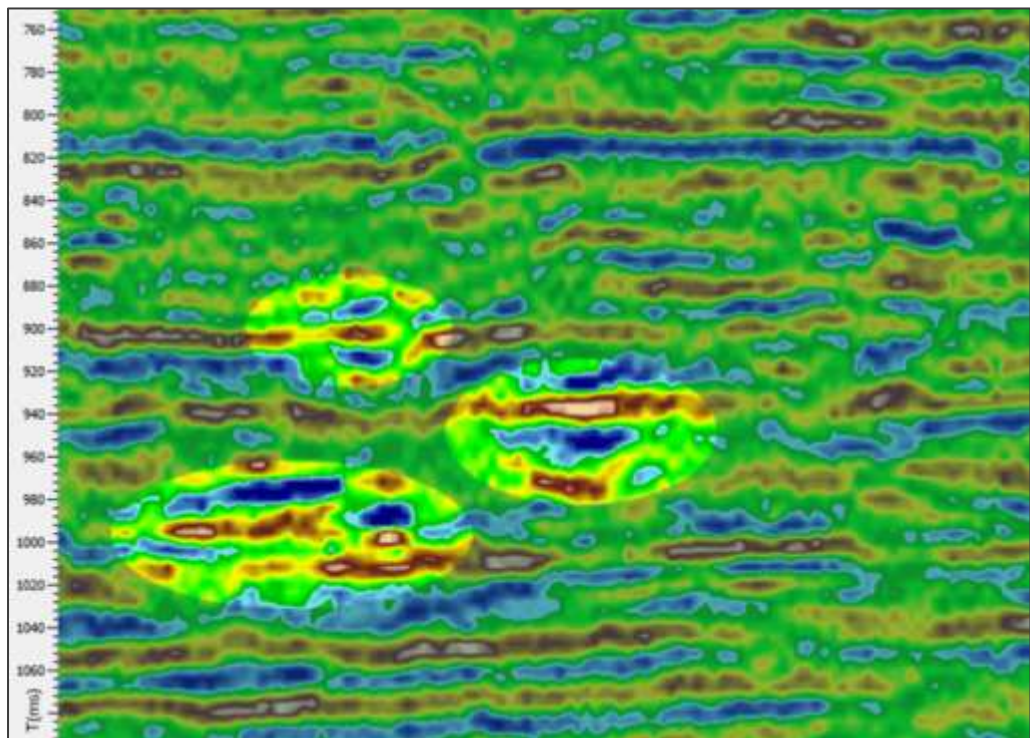


Рисунок 7.5 - Отображение русловых объектов на вертикальных сечениях по амплитудному кубу (понт-плиоценовый комплекс Паннонского бассейна) [93]

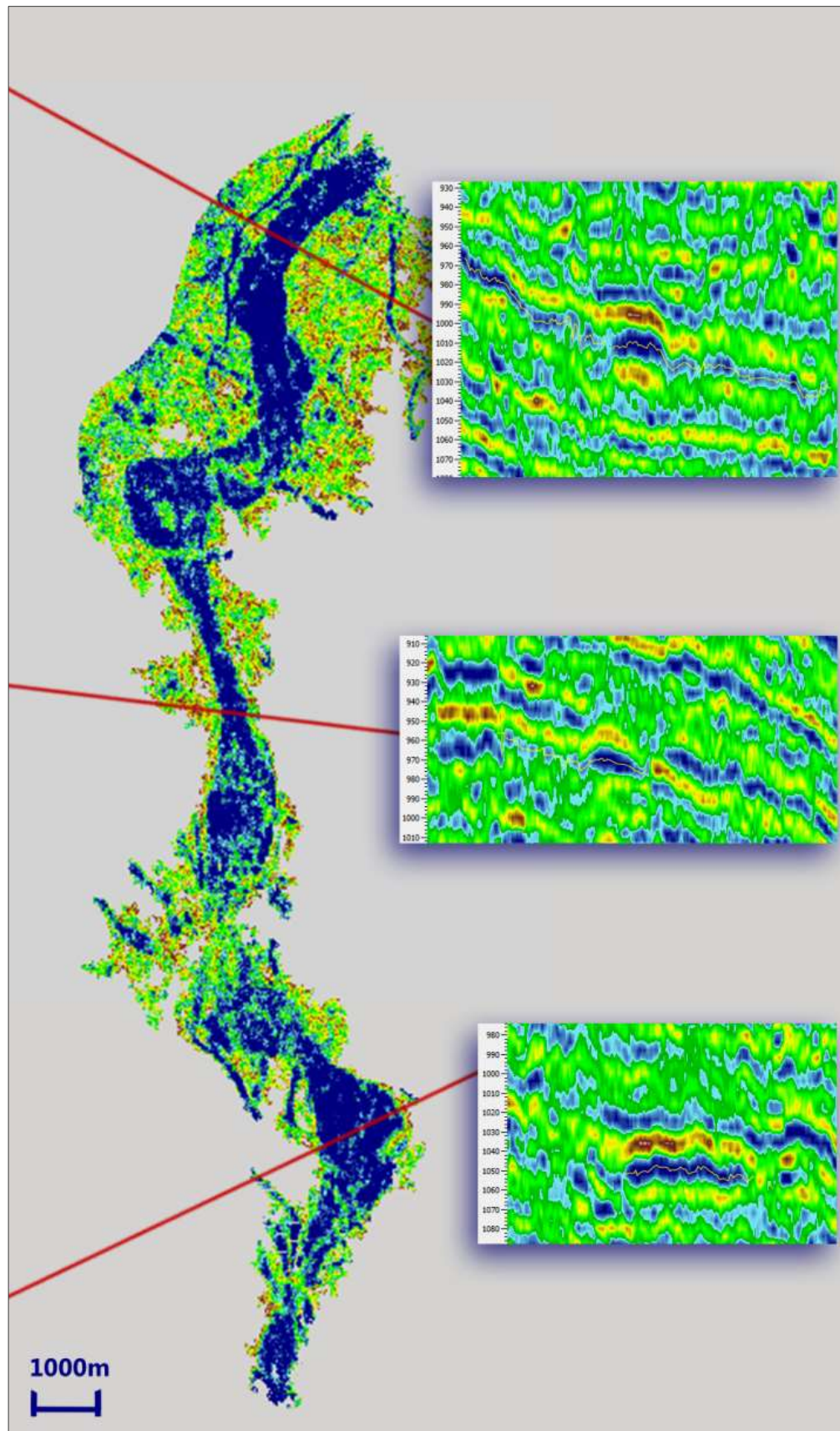


Рисунок 7.6 - Результаты площадной корреляции палеорусловой системы по амплитудному кубу и ее отображение на разных вертикальных сечениях (понт-плиоценовый комплекс Паннонского бассейна) [93]

Для извлечения максимального количества геологической информации из массива сейсмических данных можно эффективно использовать различные классификации волнового поля. Если физические размеры русла позволяют «увидеть» его на сейсмическом разрезе, то можно рекомендовать использовать алгоритмы классификаций по форме трассы. В том случае, если объект обнаруживает себя только на погоризонтных слайсах, лучше использовать алгоритмы объемной классификации по дискретным значениям в целевом интервале с последующей нарезкой слайсов. Для этого же варианта эффективно применять подходы спектральной декомпозиции.

На рисунке 7.7 цветом отображены рекомендуемые приемы анализа сейсмического изображения в зависимости от степени неоднородности среды. В данном случае известная схема N.Tyler and R.J. Finlay (1991) [226], иллюстрирующая литологическую макронеоднородность, творчески трансформирована автором диссертации с добавлением цветовой палетки, показывающей возможность применения различных технологий сейсмофациального анализа. При этом допускается, что обозначенные на схеме объекты акустически контрастны и сопоставимы с вертикальной и латеральной разрешающей способностью сейсмического метода. Зеленый цвет обозначает возможность применения любых подходов: атрибутивный анализ, выделение «geobody», всевозможные классификации, спектральную декомпозицию. Смещение в сторону желтых оттенков свидетельствует об уменьшении эффективности использования классификаций по форме трассы. В этом случае результат могут обеспечить классификации набора карт различных атрибутов и/или пропорциональных (погоризонтных) срезов, объемные классификации значений дискретов с последующим анализом слайсов, спектральная декомпозиция. Красный цвет соответствует области применения, в основном, только спектральной декомпозиции.

Приведенная краткая характеристика основных типов речных систем ориентирована на возможности диагностики геологических тел сейсмическими исследованиями и оперативной интерпретации их аллювиальной природы.

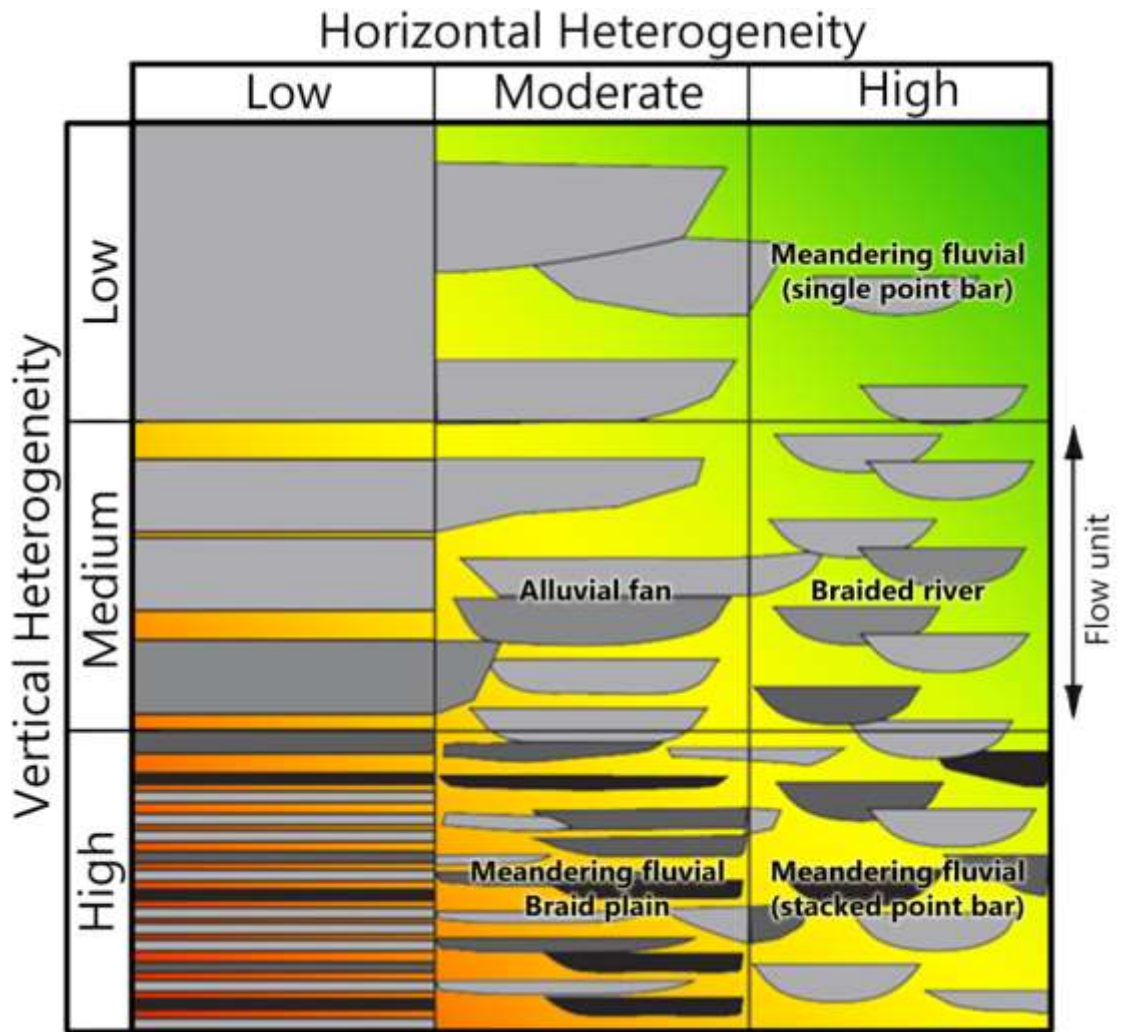


Рисунок 7.7 - Области применимости приемов сейсмофациального анализа в зависимости от неоднородности геологической среды/геологических объектов, сопоставимых с разрешающей способности сейсмического метода

Условные обозначения: зеленый цвет – классификации всех типов, атрибутивный анализ, спектральная декомпозиция, выделение “geobody”, желтый – классификации карт различных атрибутов и/или пропорциональных (погоризонтных) срезов, слайсы по кубам объемных классификаций значений дискретов, спектральная декомпозиция; красный – спектральная декомпозиция

Использование сейсмофациального анализа, даже при наличии минимального количества скважинных данных, гарантирует получение информации о пространственном расположении объекта и об отдельных его морфологических характеристиках. Последние помогают в той или иной мере восстановить палеогеографическую обстановку среды осадконакопления, так как каждой речной системе соответствует определенная архитектура. Углубленная

интерпретация сейсмических данных возможна только с привлечением результатов литолого-фациального анализа керн. По отдельным элементам архитектуры комплексный анализ сейсмической и скважинной информации позволяет спрогнозировать пространственное расположение участков с наилучшими фильтрационно-емкостными свойствами, базируясь на седиментационных моделях речных систем. Привлечение в работу зависимостей, установленных между характеристиками потока и размерами русел (ширина русла, шаг, радиус и стрела прогиба излучины) для современных рек позволяет более уверенно проводить палеогеографические реконструкции непосредственно континентальных обстановок седиментации. Однако достоверность конечного геологического результата во многом зависит от качества и детальности исходной интерпретации сейсмических данных.

7.2. Параметризация синусоидальности палеоканалов для фациальных реконструкций и объектного моделирования

Подходы к моделированию русловых отложений определяются особенностями их условно линейных форм. В современном программном обеспечении существует достаточно богатый арсенал стохастических алгоритмов для воспроизведения в литологической модели оригинальной формы подобных объектов. Внедрение методов стохастического моделирования началось в конце 80-х в Норвегии и Франции, в начале 90-х был выпущен первый программный продукт, а в настоящее время технологии стохастического моделирования получили широкое внедрение в производственный процесс создания трехмерных геологических моделей [36, 218].

Использование стохастических подходов рекомендуется на разведочном этапе, когда уже начинает формироваться концептуальная геологическая модель, но еще существует высокая вариативность в распределении свойств по причине недостаточного количества исходных данных.

Стохастические подходы условно можно разделить на 2 группы. К первой группе относятся пиксельные методы. Наиболее активно используется в практике алгоритм SIS (последовательное индикаторное стохастическое моделирование). Однако воспроизвести линейный объект в модели с помощью этого алгоритма, при неравномерном распределении скважин и их ограниченном количестве практически невозможно. Необходимо обязательное привлечение тренда, передающего форму объекта [52, 90, 92, 161, 201, 211, 116,117]. В качестве тренда можно использовать как литофациальную карту, вручную созданную геологом, так и информацию, полученную из сейсмических данных. Это же относится к менее популярному алгоритму - «усеченное гауссовское стохастическое моделирование». К пиксельным методам также относятся алгоритмы многоточечной геостатистики. Для работы этой группы алгоритмов тренд необходим изначально, так как на его основе формируется «training-image», то есть обучающее изображение, на основе которого в модели воспроизводится форма моделируемого объекта.

Вторая группа – это методы объектного моделирования, наиболее эффективные на этапе ресурсной оценки. К сильным сторонам объектного моделирования можно отнести его реалистичность, наличие современных аналогов, получение в результате моделирования оформленных объектов вместо мозаичных полей и, наконец, большинство экспертов утверждает, что объектное моделирование это лучшее решение для меандрирующих русел. Результаты объектного моделирования, как правило, выглядят визуально привлекательно и понятно для специалистов смежных дисциплин.

Меандрирующие речные системы характеризуются сложной извилистой геометрией русел, которая провоцирует создавать специальные подходы для моделирования русловых систем. Например, алгоритм Fluvsim (Gocad) разработан для моделирования аллювиальной системы [158, 159]. Алгоритм позволяет моделировать отдельное русло, несколько русел или долину реки в целом, включая прирусловые валы, пойму и некоторые другие элементы. Метод строится на алгоритме имитационного аннилинга. Ячейки сетки первоначально

произвольно индексируются в соответствии с информацией о фациях и пропорциях. Затем производится последующая генерация сеток, так, что одно зафиксированное свойство уже не изменяется, но другое свойство, например, длина русла, доводится до удовлетворения условий моделирования. Еще одним алгоритмом для объектного моделирования является метод BOOLX (Gocad), названный по имени основателя математической логики Дж. Буля [230]. Алгоритмически метод реализован через два этапа. Этап №1 – размещение объектов в соответствии с заданными пропорциями (процесс на основе булевой математики). Этап №2 – моделирование на основе алгоритма MCMC (Monte-Carlo Markov-Chain) выбор объекта, принятие решения: оставить – удалить, повторение процесса до выполнения всех заданных условий. При использовании алгоритма, как и в предыдущем варианте алгоритма Fluvsim необходимо обозначить такие параметры, как длина объекта, ширина, мощность, параметры синусоидальности (для русел).

С одной стороны, объектное моделирование традиционно используется на этапе ресурсной оценки территории, когда у специалиста уже сформировалась концептуальная модель, но нет детальной информации. С другой стороны, применение алгоритмов объектного моделирования подразумевает наличие априорных знаний о моделируемом объекте.

Источником этих знаний могут выступать современные аналоги, подобранные на основе общих геологических представлений о строении моделируемого объекта, а также сейсмические данные по сопредельным участкам.

Приемы сейсмофациального анализа позволяют специалистам интерпретировать геологические события и оценивать размеры изучаемых объектов по:

- слайсам различных атрибутов сейсмического волнового поля, на которых границы объектов или литологических разностей проявляются особенно четко;

- картам, полученным в результате классификации волнового поля в пределах целевого интервала исследований по форме трассы или по значениям в дискретах массива сейсмических данных;
- картам, полученным в результате спектральной декомпозиции с применением технологии RGB смешивания.

Активное внедрение в производственный процесс технологий трехмерного геологического моделирования на основе сеточной модели совпало по времени с внедрением сейсмических исследований МОГТ 3D. Параллельное развитие трехмерных подходов способствовало их взаимной интеграции и повышению эффективности общего результата в изучении месторождений.

В проведенном исследовании тестовая настройка с определением численных параметров меандрирования выполнялась с использованием данных по 5 сейсмическим съемкам, общей площадью около 2000 км². В интервале понт-плиоценовых отложений были проинтерпретированы палеоизохронные поверхности и выбраны для изучения отдельные слайсы с наиболее четко выраженными меандрирующими палеоканалами. Всего - 11 объектов. Пример фактического материала приводится на рисунке 7.8.

По каждому из выбранных русловых объектов были выполнены замеры амплитуды, полупериода, периода, ширины пояса руслоформирования (меандрирования). Выборка составила 56 значений. На основании статистического анализа получены результаты, представленные в таблице 7. Погрешность измерений сопоставима с латеральной разрешающей способностью сейсмических исследований. Бимодальность отдельных распределений не коррелируется с особенностью объектов какой то конкретной площади.

Вторым важным источником информации для объектного моделирования являются морфологические зависимости, установленные для современных речных систем. Комплексирование сейсмофациального и литофациального анализа позволяет определиться с типом палеоречной системы и использовать современные данные для расчета недостающих параметров, таких как ширина и глубина русла (мощность руслового аллювия для палеорек).

Типичные параметры для современных изолированных поясов меандрирования сводятся к следующим значениям: мощность от 5.0 до 15-20 м; ширина – от 1.0 до 5 км. Статистика свидетельствует, что ширина современных русел варьируется от первых десятков до нескольких сотен метров, редко до 2 км.

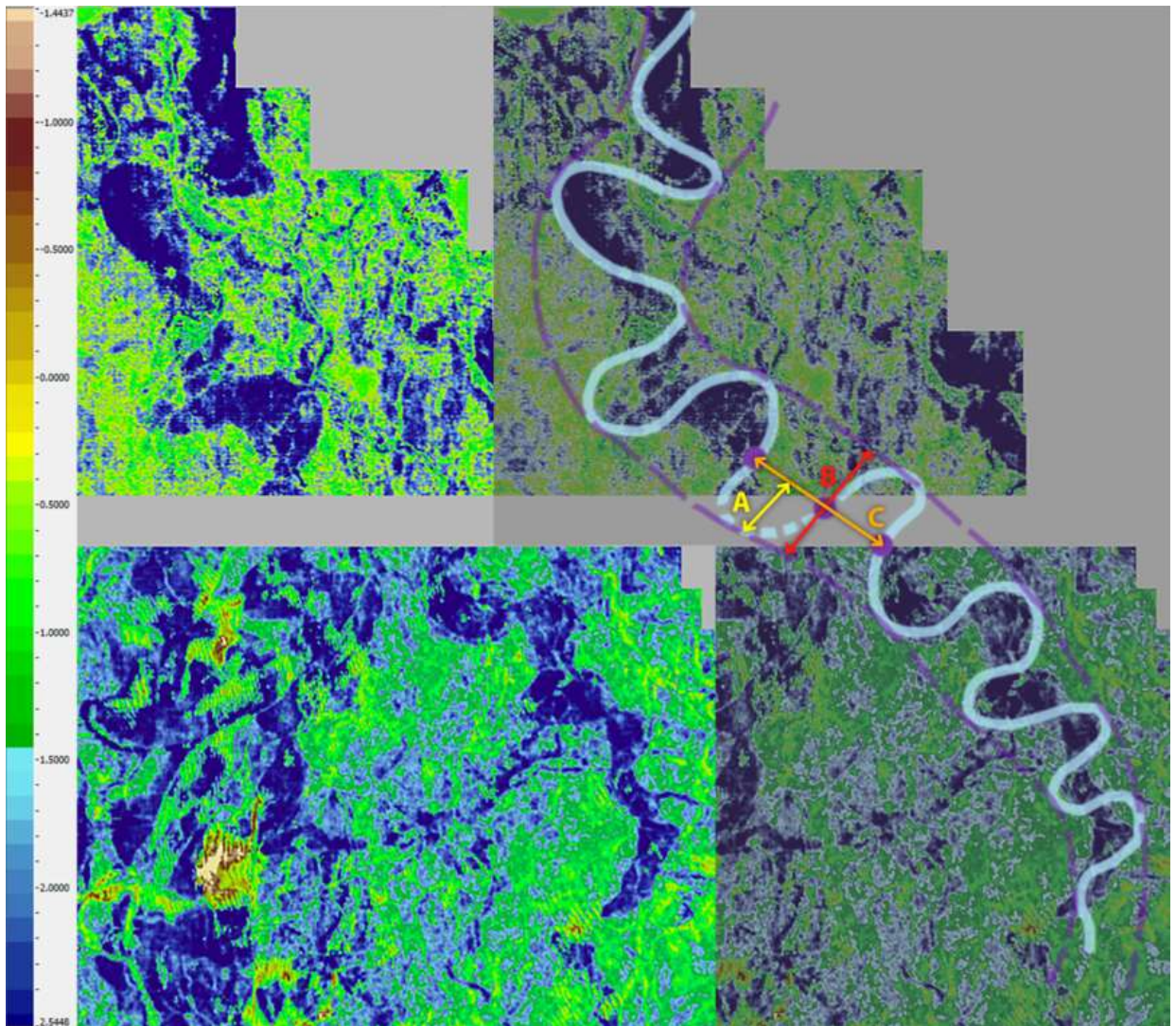


Рисунок 7.8 - Пример сейсмического слайса с изображением меандрирующего русла [89]

Базовые параметры: А - амплитуда синусоиды (высота излучины), В - общая ширина пояса руслоформирования, С - период синусоиды (длина излучины) или С/2-полупериод (шаг излучины). Площадь визуализированного фрагмента около 700 кв.км.

На рисунке приводится шкала со значениями амплитуд

Таблица 7

Численные характеристики меандрирования

№	Параметр	Индекс	Min	Max	Среднее значение	Наиболее часто встречающиеся значения
1	2	3	4	5	6	7
1	Амплитуда (высота излучины), м	A	400	2000	1200	680-820 960-1800
2	Ширина пояса руслоформирования, м	B	1100	4800	2400	1700-2600
3	Полупериод (шаг излучины), м	C/2	900	4000	2100	1400 – 1800 2000 - 2200
4	Период (длина излучины), м	C	2000	7000	4400	2600 - 4800

Следовательно, если в палеоварианте по сейсмическим данным интерпретируется объект «запредельной» ширины, то с высокой долей вероятности, мы имеем результат отображения в волновом поле мультигоризонтального причленения русел типа «лента».

Для тестовой выборки удалось по трендам изменения соотношения полупериода к амплитуде излучины сгруппировать объекты по принадлежности к определенным типам речных систем. Так, рост амплитуды с сокращением шага излучин свидетельствует о переходе от рек с блуждающими руслами к меандрирующим в результате падения скорости потока и уменьшения уклона.

Русла с отношением шага излучины к ее амплитуде в 2-2.5 обычно классифицируются как извилистые, а не меандрирующие. Процесс меандрирования русла есть увеличение этого начального изгиба по мере последовательного причленения к выпуклому берегу русла грядовых русловых форм, их зарастания, стабилизации и включения в пойменный массив.

Учитывая соотношение радиуса (в нашем допущении - амплитуды) излучины (A) к ширине русла (d) для данного типа рек как $A = 4...5d$, расчетная ширина русла будет составлять 80...275 м, в среднем 165 м.

Ширина русел свободно меандрирующих рек характеризуется иным соотношением $A = 3...4d$, и в тестовой выборке варьирует от 100 до 625 м, среднее

значение - 320 м. Для рек данного типа характерно увеличение амплитуды с ростом длины меандры за счет возрастания водности.

При стабилизации рельефообразующих процессов и неизменной, либо слабо падающей скорости потока, будет наблюдаться увеличение амплитуды, а шаг меандр останется постоянным. Такие реки имеют промежуточное значение ширины русла в среднем 182 м, вариации в интервале 90-330 м.

Опираясь на закономерность, установленную Collinson (1978 г.) для расчета пояса меандрирования (В) по средней мощности меандровой отмели (аккреционного комплекса), можно решить обратную задачу и вычислить предполагаемую толщину песчаных тел:

$$B=64.6 \cdot h^{1.53},$$

где h – средняя мощность меандровой отмели [154].

Расчеты показали, что толщина песчаных тел может варьировать в пределах 6.4 – 16.6 м, наиболее распространены 8.4 – 11.2 м. Следует учитывать, что мощность одиночных каналов даже очень крупных рек не превышает 30 м, в основном это величины до 10 - 15 м. Поэтому любые аллювиальные отложения мощностью свыше 25 м, вероятно, будут представлять систему мультивертикального причленения русел.

Парный коэффициент корреляции полупериода (шага) и периода равен 0,82, что свидетельствует о возможности использования симметричных (по оси x) синусоидальных меандр. Следует учитывать и тот факт, что малые реки имеют меньший радиус излучин при одинаковом уклоне в сравнении с большими реками.

Пример объектного моделирования русла синусоидальной формы на основе заданных параметров приводится на рисунке 7.9.

Нужно отметить, что само по себе воспроизведение формы русла не означает моделирование распределения коллектора. В пределах русел меандрирующих речных систем, характерных для относительно равнинных

областей, с малым градиентом уклона местности и развитым растительным покровом, происходит накопление достаточно мелкозернистого материала. В старицах отмечается преимущественно глинистое осадконакопление. Хорошие коллектора, как правило, приурочены к песчаным косам (аккреционным комплексам), сформированным за счет бокового наращивания – меандровым отмелям или аккреционным комплексам. Для этих образований характерны высокая неоднородность и сложная сигмовидная морфология. Их изучение сейсмическими методами достаточно затруднительно, вследствие ограничений в латеральной и вертикальной разрешенности, так же как и параметров ширины и глубины меандрирующего русла. Тем не менее, общая модель расположения русла, может помочь специалисту провести анализ пространственной приуроченности к этому объекту участков с улучшенными коллекторскими свойствами и оценить их размеры.

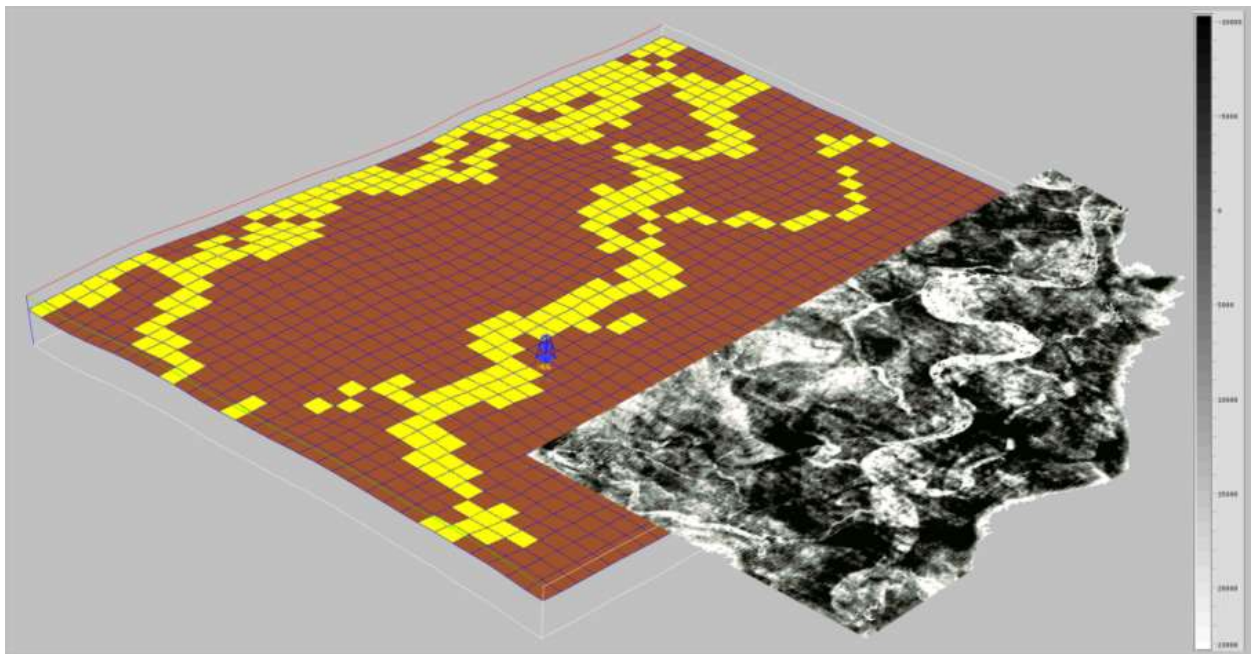


Рисунок 7.9 - Сопоставление результатов объектного моделирования с трендом - сейсмическим погоризонтным слайсом (на рисунке приводится шкала значений амплитуд)
На сечении геологической модели желтым цветом обозначен коллектор, коричневым – неколлектор, сетка модели 100x100 м (Паннонский бассейн)

Параметрическое описание геологического события имеет важное значение не только для понимания его масштабов, но и возможности палеореконструкций. Численные характеристики, подтвержденные представительной выборкой по аналогам, позволяют более обоснованно использовать алгоритмы объектного моделирования и, как следствие, более уверенно оценивать ресурсный потенциал изучаемой территории.

Значения параметров палеорусел, полученные в результате проведенного исследования сопоставимы с современными аналогами, что в очередной раз подтверждает правомерность использования последних для общего анализа геологических процессов и явлений более ранних геологических периодов (в частности, кайнозойского).

Выполненная типизация изучаемых рек понт-плиоценового возраста и известные эмпирические соотношения их морфологических параметров позволяют вполне реалистично оценить все задаваемые параметры для объектного геологического моделирования и спрогнозировать параметры перспективных литологических ловушек.

Представленные в настоящей работе результаты убеждают в целесообразности продолжения исследований в направлении поиска и разработки методов расчета морфометрических параметров русел под задачи объектного моделирования, в том числе и на основе морфометрических зависимостей, установленных для современных рек.

7.3. Способ численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных

Способ относится к области углубленной геологической интерпретации сейсмических данных и рекомендован к использованию для геологической интерпретации палеоканалов. Патент находится в стадии оформления. Используя объектно-ориентированные интерпретационные подходы можно добиться детальной визуализации объекта, но, зачастую, сейсмогеологические условия позволяют выявлять только отдельные фрагменты целостной системы. В связи с этим актуальным является методика реконструкции среды осадконакопления, в данном случае палеорусловой системы по численным параметрам морфологии ее элементов.

В существующих программных комплексах по интерпретации сейсмических данных и геологическому моделированию ведущих компаний подобное решение пока отсутствует.

В современном программном обеспечении известны примеры автоматизированного морфометрического анализа современных рек. Например, в работе В.В. Хромых и О.В. Хромых «Морфометрический анализ долинных геосистем Нижнего Притомья» (Томский государственный университет, кафедра Географии, 4(47)/2008) рассмотрен пример автоматизированного морфометрического анализа ландшафтов долины нижней Томи на основе цифровой модели рельефа [133, 134]. Предложена методика расчёта средних уклонов геосистем с использованием ГИС-технологий, в том числе инструментов дополнительных модулей ArcGIS 3D Analyst и Spatial Analyst. По карте крутизны склонов рассчитывается зональная статистика для долинных геосистем ранга урочищ, определяется средний уклон каждого урочища, устанавливаются закономерности в распределении средних уклонов в зависимости от абсолютной высоты участков речной долины. То есть на основе измеряемых параметров, восстанавливаются параметры зависимые, характерные для долины речной

системы. Указанный способ применяется к современным системам, однако общее видение процесса можно рассматривать как аналог.

Технической задачей подхода, предлагаемого автором диссертации, является прогноз по косвенным признакам, устанавливаемым на основе объектно-ориентированной интерпретации, следующих параметров:

- морфологического типа палеореки;
- численных характеристик морфометрических параметров геологического объекта (палеоканала);
- численных характеристик морфометрических параметров потенциальной ловушки (коллектора).

Цель численной оценки – обеспечить качественный прогноз геометрических параметров предполагаемой залежи в пределах объекта, который проявляется в сейсмических данных фрагментарно в силу ограничения разрешающей способности геофизического метода; возможен выход на прогноз коллекторских свойств в совокупности с анализом обстановок седиментации и распространения фациальных зон.

Сущность подхода заключается в комплексировании объектно-ориентированной интерпретации и оценки параметров русловых палеопроцессов через аналогичные факторы и параметры их проявления в современных речных системах.

Основой подхода являются следующие положения:

1. Морфодинамический тип современного русла и размеры основных его морфологических элементов устанавливаются на основе независимых факторов: расчетный расход воды, уклон дна долины, ширина днища долины. На основе этих факторов рассчитываются величина извилистости русла, гидравлические сопротивления, ширина русловой части пойменно-руслового комплекса (при наличии поймы,). Для палеорусел большинство этих параметров не доступны для непосредственных замеров и могут быть вычислены только по косвенным признакам.

2. Размеры речных русел - это зависимые величины с весьма устойчивыми значениями для конкретного типа руслового процесса, типа водного питания и размера реки. В России насчитывается более 2,5 млн. больших, средних и малых рек, среди них крупные и крупнейшие составляют первые проценты. Информация представлена в таблице 8.

Таблица 8

Численные характеристики современных рек

№	Размер реки	Протяженность, км	W/H (W – ширина русла в пойменных бровках, H – глубина, м)
1	2	3	4
1	Крупные и крупнейшие	> 1500	> 1000
2	Средние и крупные	200-1500	>10-20
3	Малые	<200	Невелики, до 10, W и H соизмеримы

3. Возможности использования морфометрических и гидроморфологических зависимостей и метода аналогии значительно возрастают благодаря представлениям о дискретности и структурности русловых форм. При использовании зависимостей для каждого типа русловых процессов в отдельности, точность определения характеристик повышается. Классификация русел по типу извилистости приводится в таблице 9.

4. Каждому водотоку присущи определенный, зависящий от водоносности и быстроты течения предельный радиус кривизны излучин и ширина пояса меандрирования. В качестве ограничения применения зависимостей следует помнить, что реальная форма русла не имеет геометрического совершенства.

Таблица 9

Классификация русел по типу извилистости

№	Типы извилистости русел	Значения коэффициента извилистости
1	2	3
1	Относительно прямолинейные	<1.1
2	Очень слабо извилистые	1.10-1.20
3	Слабо извилистые	1.21-1.40
4	Умеренно извилистые	1.41-1.60
5	Извилистые	1.61-1.80
6	Сильно извилистые	1.81-2.00
7	Чрезвычайно извилистые	>2.00

По результатам анализа литературного материала были установлены следующие характеристики извилистости и особенностей морфометрии для различных морфологических типов речных систем, приведенные в таблице 10.

Учитывая размер реки и тип руслового процесса, опираясь на установленные эмпирические зависимости, возможно применить следующий пошаговый алгоритм, представленный на рисунке 7.10.

1. Картирование палеорула (шнуркового объекта) посредством выполнения объектно-ориентированной интерпретации, направленной на максимально полное и корректное проявления палеоканала в сейсмических данных.

2. Фиксирование формы канала в виде криволинейной линии. Анализ формы излучины по сейсмообразу. Как показано на рисунке 7.11, в плане излучины могут иметь различную форму. У равнинных рек чаще всего сегментные излучины, образованные дугами круга. Значительно

распространены синусоидальные (преимущественно на полугорных реках) и омеговидные излучины (на малых равнинных реках).

Таблица 10

Типы речных систем и их характеристики

№	Морфологический тип речной системы	Тип меандрирования	$K_{изв}$	Размер рек	Кол-во рек	Морфология излучин
1	2	3	4	5	6	7
1	Спрямоленные реки		1-1,2		15	
2	Разветвленные (с блуждающим руслом)		1,1-1,4		10	
3	Меандрирующие	Свободное	1,5-3	Крупнейшие	57	Большие углы разворота, сундучные, омеговидные, сложные
			1,7-3,5	Средние и большие		
			Больше 2	Малые широкопойменные		
		Ограниченное	1,4-2		5	Сегментные, синусоидальные
		Незавершенное	1,1-1,7		8	Не достигают больших углов разворота, сегментные
		Вынужденное			2	Сегментные, синусоидальные, омеговидные
4	Аностомозирующие		1,4-1,7		3	

У омеговидных излучин шпора пережата у основания крыльев, где образуется шейка излучины. Реже встречаются сундучные и заваленные излучины. Нередки сложные излучины, имеющие вторичные изгибы.

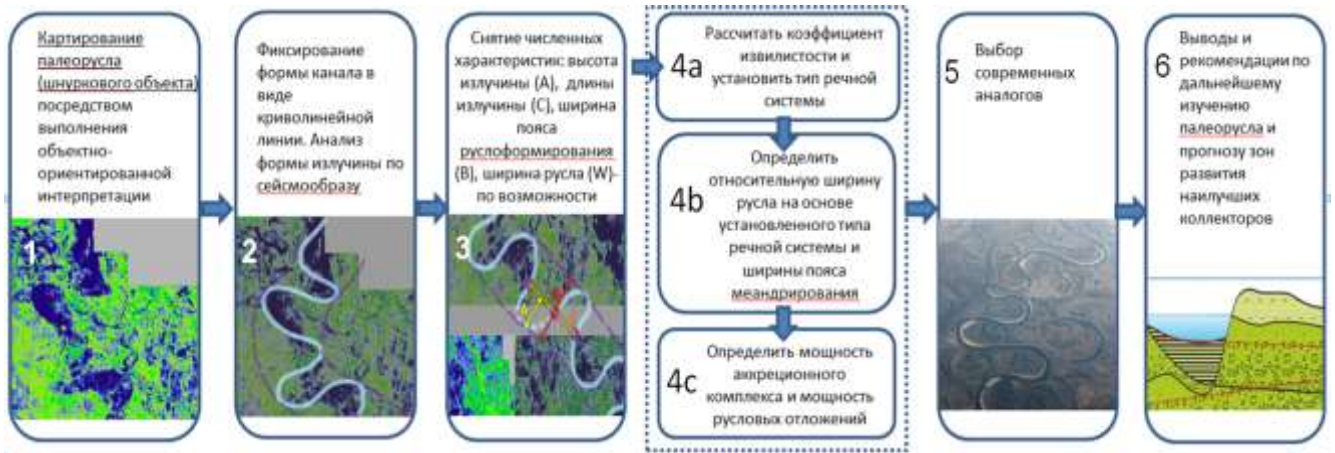


Рисунок 7.10 - Алгоритм процесса численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных

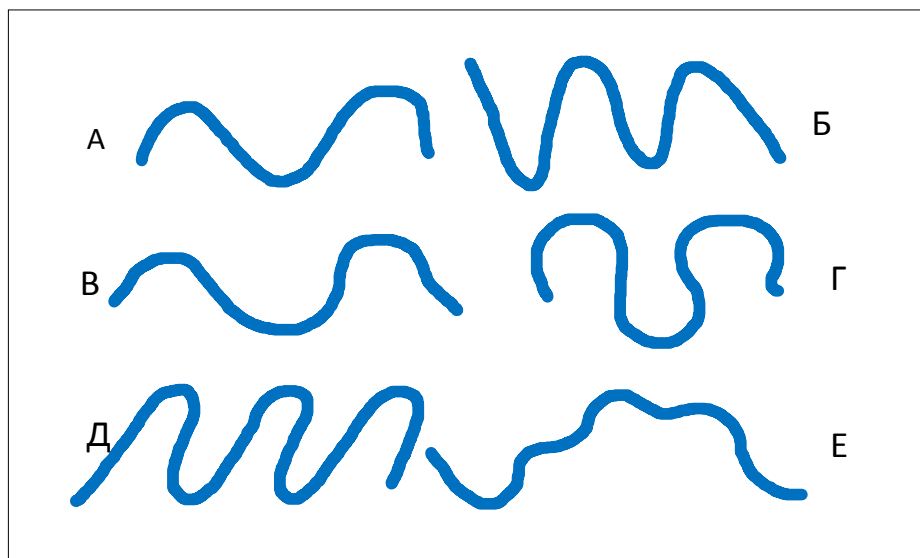


Рисунок 7.11 - Типы излучин: сегментные излучины (А), синусоидальные (Б), сундучные (В), омеговидные (Г), заваленные (Д) излучины, сложные излучины (Е)

3. Измеряемые численные характеристики представлены в таблице 11. Возможен вариант оцифровки кривой и автоматический расчет указанных параметров.

Таблица 11

Измеряемые параметры
по данным объектно-ориентированной интерпретации

№	Показатель	Индекс	Пояснение
1	2	3	4
1	Амплитуда (высота излучины), м	A	Кратчайшее расстояние от вершины колена излучины до прямой, соединяющей точки перегиба этой излучины
2	Период (длина излучины), м	C	Проекция полной излучины (два колена) на продольную ось долины
3	Полупериод (шаг излучины), м	D	Расстояние по прямой между двумя точками перегиба осевой линии русла или проекция излучины (одно колено) на продольную ось долины
4	Радиус кривизны	R _c	
5	Ширина пояса русло-формирования (меандрирования), м.	B	Расстояние между линиями, огибающими вершины излучин или удвоенная величина стрелы прогиба
6	Угол разворота излучины, град.		Угол, образованный касательными, проведенными через точки перегиба или равный сумме углов: $a_p = a_{вх} + a_{вых}$.

4. Расчет параметров, характеризующих палеорусло через измеренные численные характеристики рекомендуется выполняться в следующей последовательности.

4а. Определение типа речной системы по коэффициенту извилистости с учетом формы меандр. В качестве дополнительного параметра можно

использовать отношение шага излучины D к ее амплитуде: русла с высотой излучины (A) равной 2-2.5 обычно классифицируются как извилистые, а не меандрирующие.

4б. Расчёт среднего значения ширины русла по значению ширины пояса руслоформирования (Усачев В.Ф. и др., 1985). Расчетные параметры приводятся в таблице 12. Характеристика русел в соответствии с типом меандрирования – в таблице 13 [124].

Таблица 12

Расчетные параметры

№	Показатель	Индекс	Пояснение
1	2	3	4
1	Ширина русла, м	W	
2	Мощность аккреционного комплекса, м	h	Средняя мощность меандровой отмели
3	Мощность русловых отложений, м	H	Средняя мощность руслового тела
4	Коэффициент извилистости	$K_{из}$	Отношение длины излучины, измеренной по оси русла, к ее проекции на продольную ось долины

Таблица 13

Характеристика русел в соответствии с типом процесса

№	Тип процесса	B/W	Характеристика русла
1	2	3	4
1	Свободное меандрирование Меандрирующая река	8,9	Однорукавное, свободно меандрирующее с наличием излучин, иногда асимметричных, находящихся на разных стадиях развития; на заболоченных

№	Тип процесса	B/W	Характеристика русла
1	2	3	4
			поймах возможна гипертрофированная форма излучин
2	Незавершенное меандрирование	5,7	Двухрукавное меандрирующее, излучины часто спрямляются на ранних стадиях развития и имеют разную степень разворота
3	Пойменная многорукавность Анастомозирующая река	5,6	Многоручавное, разделенное пойменными островами, часто затруднительно выделить главного рукава, возможно развитие рукавов по самостоятельному типу процесса
4	Ограниченное меандрирование	3,4	Однорукавное, слабо меандрирующее, правильно извилистое при неизменной ширине долины; при изменении ширины долины изменяются размеры и форма сползающих излучин
5	Побочный тип Прямолинейная река	1,2	Однорукавное, относительно прямолинейное и устойчивое в плане
6	Русловая многорукавность Разветвленная река	1,0	Многоручавное, широкое, распластанное, неустойчивое в плане

W - ширина русла, B - ширина пояса руслоформирования.

4с. Расчет мощности аккреционного комплекса и мощности русловых отложений можно используя следующие зависимости:

– для объектов, охарактеризованных как незавершенное меандрирование рекомендуется использовать зависимости авторов Здоровенко (2011) [38], Смищенко (1982) и др.[118];

– для свободно меандрирующих рек рекомендуется использовать зависимости Collinson (1978) [154], Гиндельмана (1982) и др. [17].

Это может служить оценкой погрешности определения расчетной толщины русловых тел (Н).

5. Обращение к библиотеке образов, соотносимых с рассчитанными параметрами для установленного типа русловой системы. Выбор современных аналогов по типу руслового процесса и размеру реки.

6. Формирование выводов и рекомендаций по дальнейшему изучению палеоруслу и прогнозу зон развития наилучших коллекторов.

Разработанный способ численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных прост в использовании, является эффективным и понятным для специалистов, реализация подхода возможно на базе любого специализированного программного обеспечения.

7.4. Палеоруслу как индикатор сдвиговых дислокаций

В настоящий момент в регионе Паннонского бассейна большое внимание уделяется сдвиговым дислокациям. Их наличие в регионе было установлено в начале 90-х годов [216, 217]. Определяющей региональной дислокацией является Средневенгерская разломная зона на границе плит Тиссия и ALCARA.

По данным региональной модели выделены 6 региональных сдвиговых зон: Моравская, Северномайевичка, Фрушкогорская, Бачка, Батина-Бекеш, Загреб-Деречка. Между зонами региональных деформаций формировались горизонтальные сдвиги II и III порядков. Их наличие представляется как важный поисковых критериев при картировании потенциальных объектов. Так, например, наиболее крупные месторождения (Велебит, Турья) пространственно увязаны со сдвиговыми дислокациями.

Однако есть и скептически настроенные специалисты в оценке роли сдвиговых дислокаций для региона и их масштабности [Jiříček (1985, 2002)].

Детальное изучение объектов, таких как палеоканалы, может быть использовано для интерпретации кинематики разломов, и, следовательно, геодинамических механизмов развития бассейна. Если толща, вмещающая палеоканал, нарушается более молодой тектоникой, то интерпретация протяженного, но локального события в отдельных тектонических блоках является надежным индикатором палеоизохронности интерпретируемой поверхности. Например, если из пяти блоков в трех прослеживается палеоканал, а в двух других нет, то высока вероятность того, что в этих двух блоках неправильная идентификация горизонта. В случае результативного выявления палеоканала в каждом из тектонических блоков можно подчеркнуть информацию не только о среде осадконакопления, но и о кинематике разломов.

В работе R.Prochác, M.Perézlényi сделан вывод, что палеоканалы, пересекающие основные разломные системы, выявленные в осадках паннонского, сарматского и баденского возрастов, пересекают разломы без смещения по латерали [108]. На рисунке 7.12 приводится подобный пример. Палеоканал, выявленный в пределах трех блоков проинтерпретирован в интервале, сопоставимым с интервалом развития баденских отложений. На слайсе отчетливо видно, что разломы пересекают палеоканал, при этом не происходит смещения объекта по латерали. Это наблюдение, по мнению авторов, исключает верхнебаденские и более молодые горизонтальные смещения вдоль этих разломов и доказывает, что в течение раскрытия Центрального Моравского бассейна, по крайней мере с позднего бадена, сдвиговые тектонические процессы не играли существенной роли.

Опираясь на интересный факт автор диссертационной работы обратился к фактическому материалу в пределах Банатского грабена.

Наиболее ярким примером объекта, расположенного по мнению большинства специалистов в зоне регионального субширотного сдвига постпаннонского возраста, является месторождения Турия [84, 88, 91, 99]. Диагностические признаки субширотного сдвига в виде кулис-разломов достаточно четко проявляются на слайсах по атрибуту «когерентность»,

представленных на рисунке 7.13. Однако, на рисунке 7.14, достаточно отчетливо видно, что шнурковое тело, пересекающее кулисы «цветковой структуры» визуализируется без смещения.

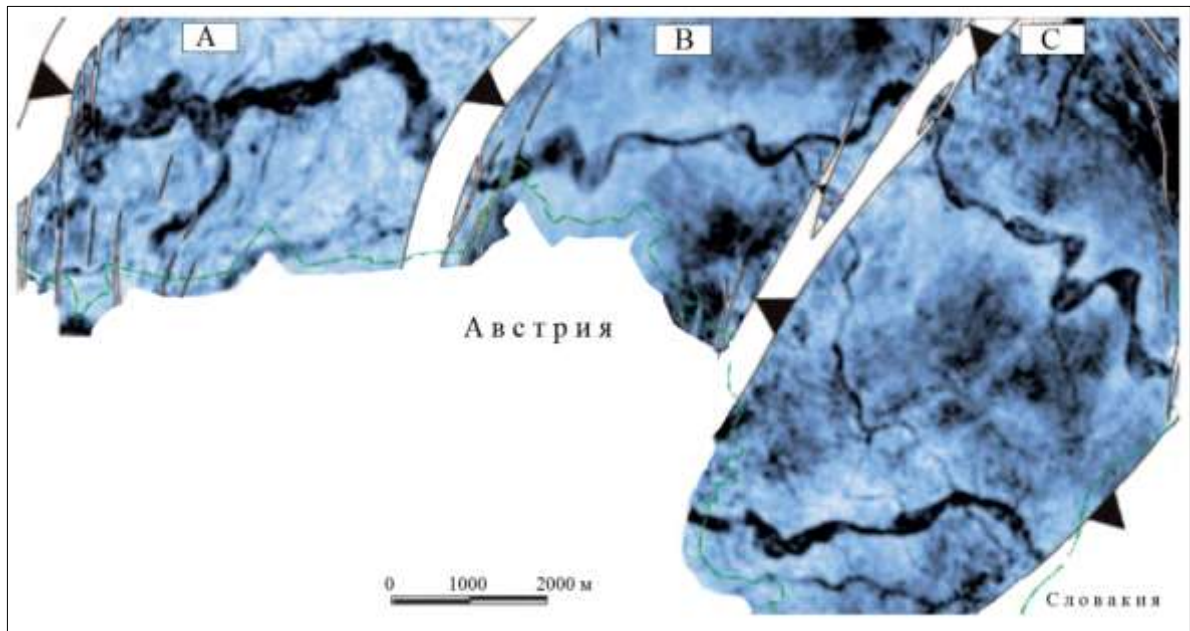


Рисунок 7.12 - Палеоруло, проходящее от блока Мистельбах (А) через Центральную Моравскую депрессию (В) к горсту Годонин-Гбелы (С) на горизонтальном слайсе по кубу атрибута «среднеквадратическое значение амплитуды» [108]

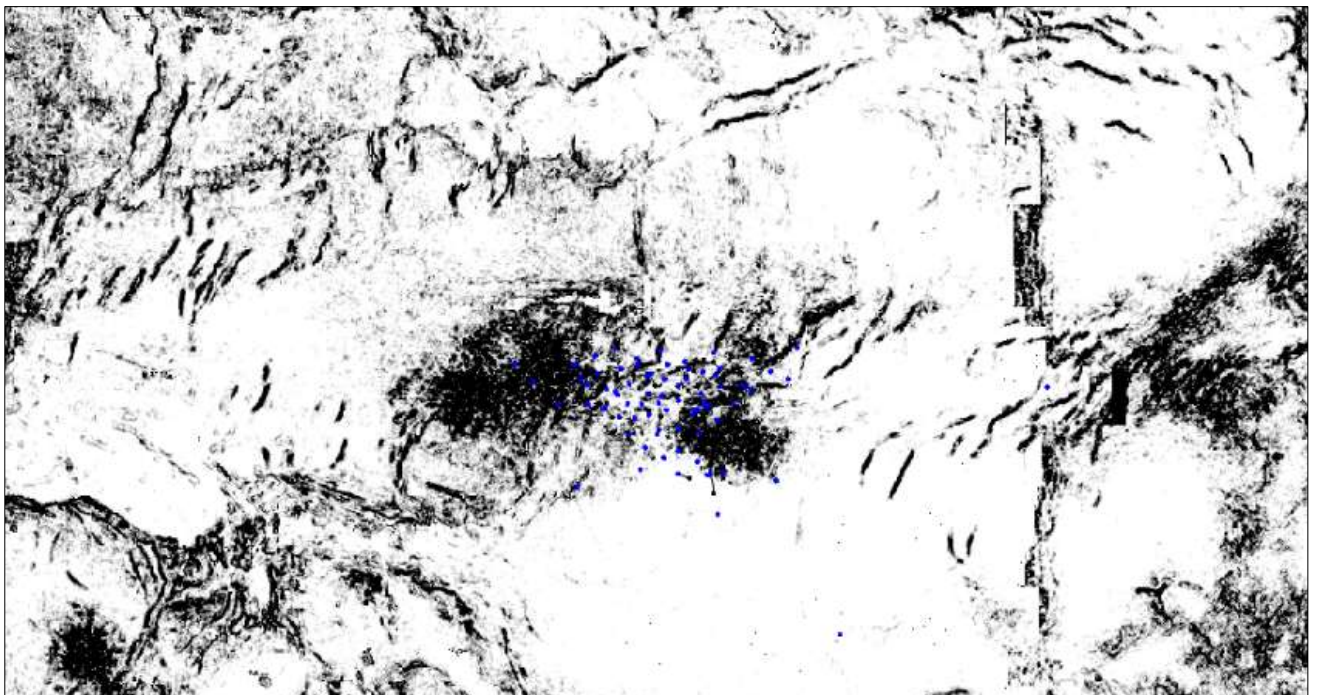


Рисунок 7.13 - Срез по кубу когерентности с кулисами сдвиговых дислокаций

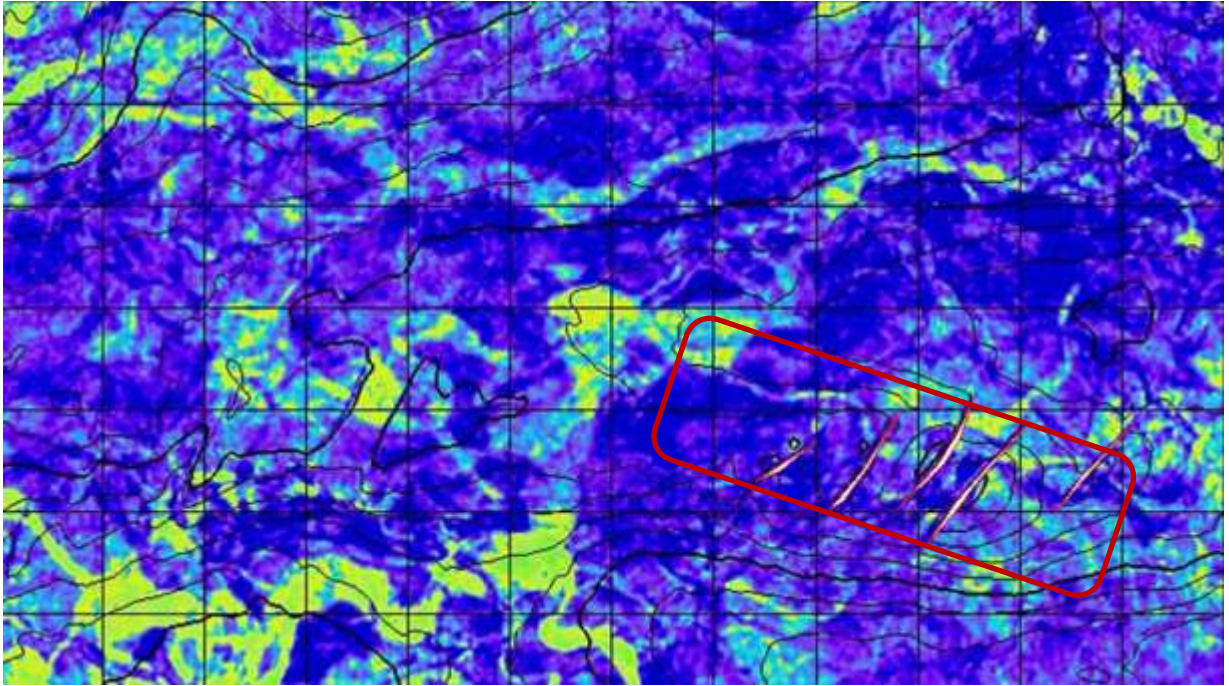


Рисунок 7.14 - Погоризонтные слайсы в толще плиоценовых отложений (вблизи месторождения Турия)

В пределах другой площади МОГТ 3D первоначально интерпретировался сдвиговый характер тектонических деформаций. На слайсах по амплитудному кубу, показанных на рисунке 7.15, хорошо проявлена линия регионального разлома, за которой сильно изменяется качество данных. На слайсах по спектральной декомпозиции можно наблюдать, что палеоканал не затронут сдвиговыми процессами.

Несмотря на то, что примеры носят локальный характер, и не являются основанием для далеко идущих выводов, обозначенные проблемы наглядно демонстрируют еще один практический аспект объектно-ориентированного подхода – использование его для кинематического анализа тектонических движений. Следует заметить, что для кинематического анализа можно использовать не только палеоканалы, но и любые другие цельные геологические объекты.

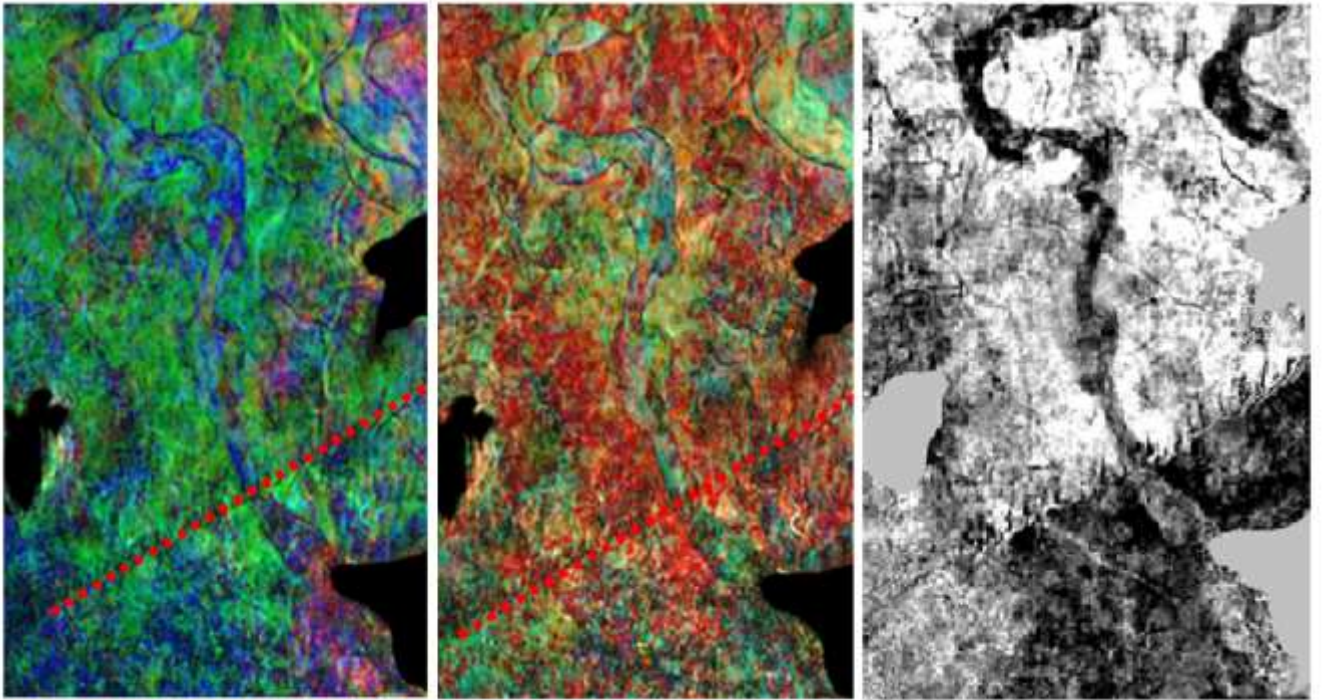


Рисунок 7.15 - Погоризонтные слайсы в толще плиоценовых отложений (вблизи месторождения Велебит)

ГЛАВА 8. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СЕРИИ УНАСЛЕДОВАННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО- ОРИЕНТИРОВАННОГО ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО ПОДХОДА

При оценке перспектив нефтегазоносности крупных осадочных бассейнов палеогеографические реконструкции являются необходимым этапом исследований и фундаментальной основой для выделения и картирования потенциальных коллекторских толщ, пород флюидоупоров, материнских отложений.

Идентификация геологического события является основанием не только для восстановления обстановки седиментации, но и для реконструкции истории геологического развития ближайшего пространственного окружения, в том числе, опосредованно, и для реконструкции тектонических процессов. В этой связи объектно-ориентированные интерпретационные подходы раскрываются еще с одной значимой практической стороны [81].

Площадь исследований расположена в пределах склона Дремлянской депрессии, расположенной в пределах южного окончания Банатского грабена. Донеогеновое основание представлено породами палеозойского, юрского и палеогенового возрастов. Неогеновый разрез сложен отложениями миоцена (нижний миоцен, средний миоцен (баден, сармат), верхний миоцен (панон, нижний и верхний понт)) и плиоцена. Особенностью депрессии является ее почти правильная округлая форма. Размеры в плане составляют 13.0 x 14.0 км. Вся изучаемая толща пород сильно дислоцирована. Тектонические нарушения образуют радиальные и дуговые линеаменты, подчеркивающие форму депрессии. Южнее расположена еще одна депрессия подобной формы (Марковачка депрессия). Можно предположить, что и Дремлянская депрессия, и Марковачка являются так называемыми астроблемами, то есть структурами, возникшими в результате столкновения Земли с небесными объектами. Интересен тот факт, что в Европе известны подобные образования, датируемые именно миоценовым возрастом. Это знаменитый кратер Риз, внутри которого

расположен город Нордлингер (Германия, восточная Бавария). Считается, что кратер сформировался в результате удара и взрыва гигантского метеорита около 15 млн лет назад, котловина в поперечнике достигает 20 км. В 40 км юго-западнее от него расположен кратер Штайнхайм (Штенхейм). На продолжении этой линии находится еще 2 более мелких подобных объекта. Однако, исследования Дремлянской депрессии не подтверждают наличие следов переплавки материалов, нет и характерных валов в строении краевых частей впадины, являющихся одним из диагностических признаков астроблем. Таким образом, высока вероятность того, что правильная округлая форма является суммарным эффектом разнонаправленных напряжений вполне земного происхождения.

Анализ сейсмического изображения проводился в определенных интервалах, соответствующих основным сейсмостратиграфическим комплексам. Выбор наиболее информативных интервалов выполнялся путем предварительного анализа погоризонтных слайсов и пропорциональных срезов, детального визуального анализа всевозможных вертикальных сечений.

Анализ сейсмического изображения в интервале, соответствующем донеогеновому основанию затруднен низким качеством исходных данных. На основе прослеженного горизонта, сопоставимого по стратиграфической привязке с поверхностью донеогенового основания (ОГ PZ) были сформированы целевые интервалы исследования и в широких окнах выполнена классификация по форме трассы. Результаты двух расчетов отображены на рисунке 8.1. Обращает на себя внимание четкое разграничение площади на западную и восточную части на фоне общего мозаичного изображения. Этот факт позволяет сделать предположение о наличии двух отдельных блоков с разной физической основой и, следовательно, о существовании тектонической шовной зоны.

Сделанный вывод подтверждает сопоставление результатов классификации со схемой развития неоальпийской тектоники (Neoalpine tectonic map of Serbia, 1:500 000, M.Marović, M.Toljć, L.Rundić, E.Milivojević)

[195]. К выявленной шовной зоне приурочены несколько небольших нефтегазовых месторождений с залежами в нижнемиоценовых отложениях.

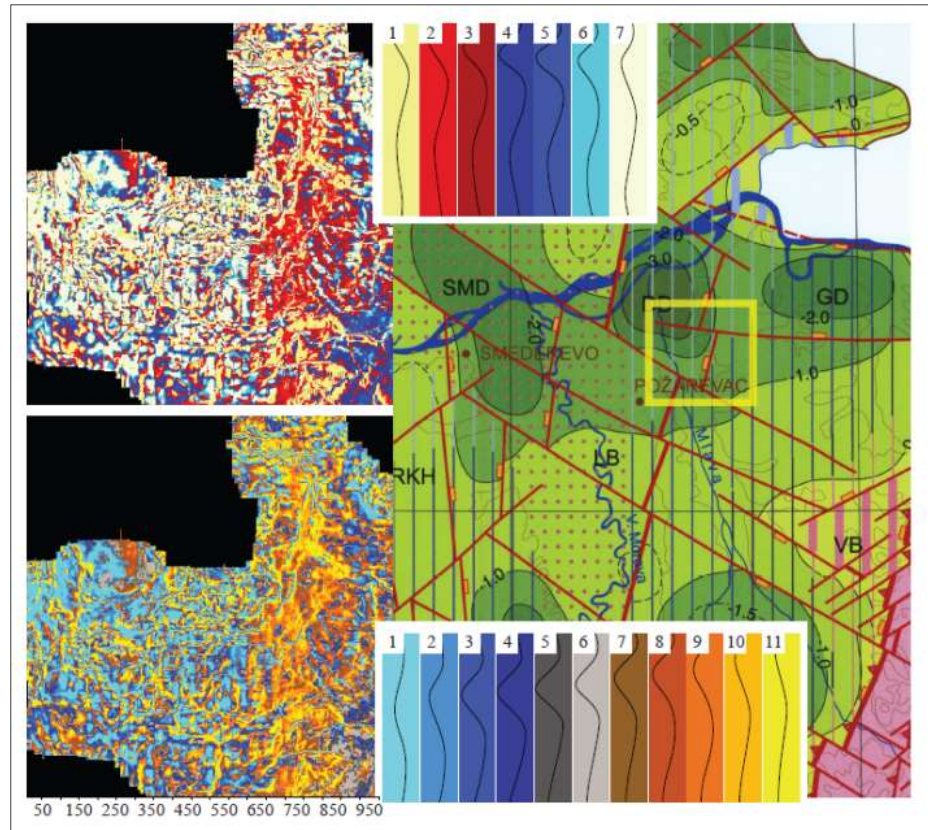


Рисунок 8.1 - Результаты классификации волнового поля по форме трассы в интервале, соответствующем донеогеновому основанию. Сопоставление расположения площади исследований со схемой развития неоальпийской тектоники (Neoalpine tectonic map of Serbia, 1:500 000, M.Marović, M.Toljć, L.Rundić, E.Milivojević) [93].

Донеогеновое основание перекрыто породами нижнемиоценового комплекса, представленными брекчиями, конгломератами, конгломератовыми песчаниками, известняками с примесью терригенных отложений различного гранулометрического состава. Карта толщин нижнемиоценовых отложений свидетельствует об интенсивном заполнении депрессии в этот период на фоне ее общего прогибания. Максимальная толщина по данным скважин составляет более 900 метров, на бортах – менее 50м, до полного выклинивания. Наиболее полный и информативный разрез соотносится с восточным блоком. Возможно, что вследствие продолжающихся активных тектонических движений в течении

ранне миоценового времени западный блок приподнимался. Эти процессы способствовали формированию дополнительных источников сноса с юга и юго-запада. В результате обозначенных процессов нижнемиоценовые отложения в большей степени эродированы в пределах западного блока. Основная концептуальная модель их образования - «шлейфы нарушенных разломами склонов».

Во всех сейсмостратиграфических комплексах обозначенная шовная зона между тектоническими блоками проявляется через определенные геологические события.

Анализ сейсмического изображения на погоризонтных слайсах вблизи поверхности, соответствующей кровли отложений баденского возраста позволяет зафиксировать ряд неявно выраженных аномалий, которые можно проинтерпретировать как отображение субмеридионального направления сноса и локальную аккумуляцию материала в виде конусов выноса.

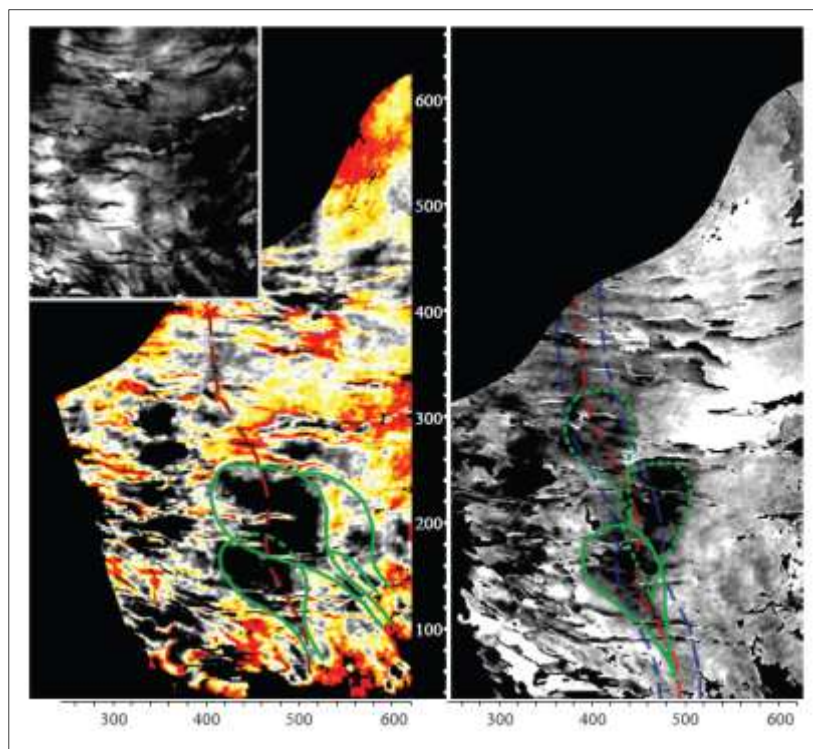


Рисунок 8.2 - Интерпретация погоризонтного слайса в кровле отложений бадена и погоризонтного слайса в перекрывающих отложений (+20 мсек от ОГ Vd) [93]

Ключевое направление трассируется вдоль шовной тектонической зоны и является основным для транзита поступающего материала на протяжении и баденского, и сарматского времени. На рисунке 8.2 представлена интерпретация погоризонтного слайса, расположенного на 20 мсек выше поверхности, сопоставимой с кровлей отложений бадена.

В интервале, сопоставимом с сарматскими отложениями, в пределах шовной зоны отмечается наличие каналов и проявляется новое локальное направление сноса материала с юго-запада на северо-восток. Смена геологических событий происходила, по-видимому, достаточно быстро, их интерпретация во многом зависит от разрешенности сейсмических данных и детальности корреляции. Практически каждая фаза сейсмической записи содержит новую информацию. Однако, тонкое переслаивание терригенных отложений, наличие каналов, локальных оползней и наложенная на все это тектоника не позволяют получить четких сейсмических откликов, поэтому возникают трудности с идентификацией палеоизохронных поверхностей. Возможно, в этом интервале разреза некоторые разломы являются конседиментационными, что также затрудняет корреляцию горизонтов, то есть их идентификацию в соседних тектонических блоках.

Рисунок 8.3 иллюстрирует интерпретацию отдельного палеоканала во временном интервале, соответствующем сарматским отложениям. Палеоканал четко фиксирует границу тектонических блоков донеогенового основания.

Выше по разрезу обращает на себя внимание ярко выраженная амплитудная аномалия, границы которой совпадают с границами описываемых выше геологических событий. По данным ГИС в этом интервале отмечается переслаивание разной мощности пластов мергелей и песчаников. Форма аномалии в плане передает суммарный эффект от ряда событий, так как отмечается наличие как минимум трех подводящих каналов. Информация проиллюстрирована на рисунке 8.4.

Совпадение в пределах слайса нескольких перекрывающих друг друга событий демонстрирует невозможность их дифференциации в сейсмическом

временном кубе, вследствие ограничений разрешающей способности сейсмических исследований.

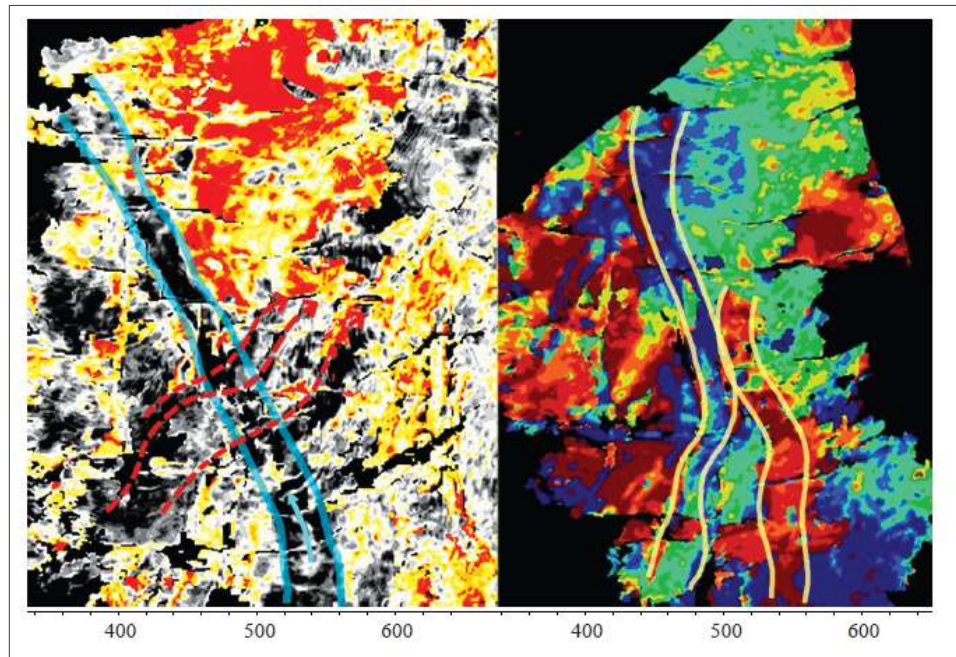


Рисунок 8.3 - Интерпретация седиментационного слайса в интервале, соответствующем сарматским отложениям, выделение палеоканала, соответствующего шовной зоне на границе двух тектонических блоков [93]

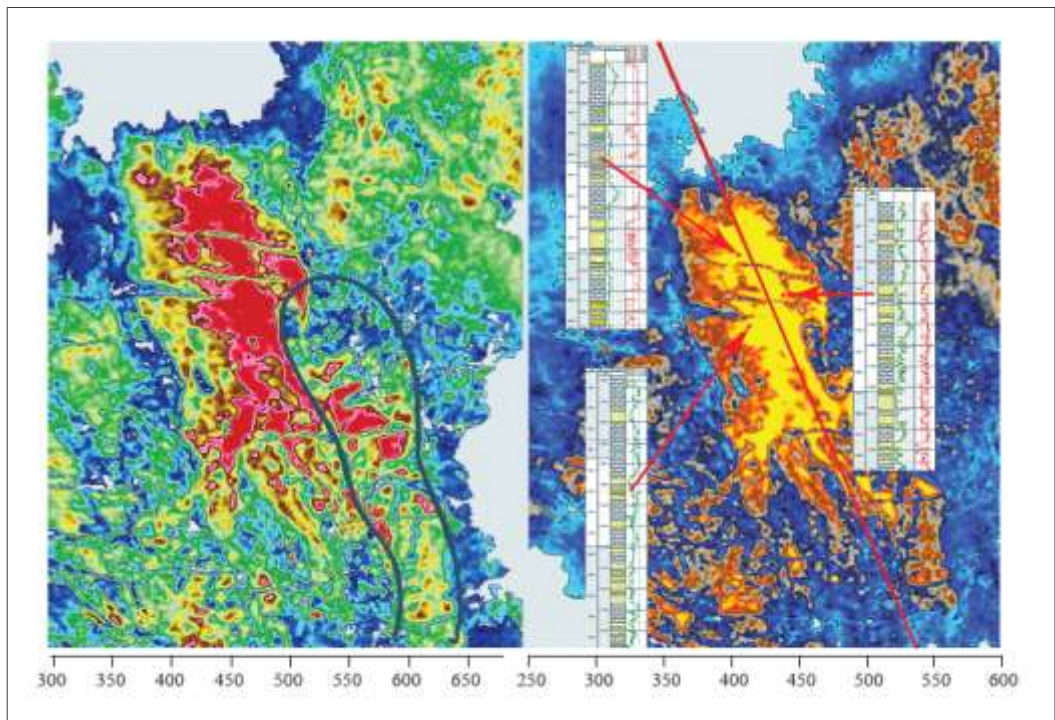


Рисунок 8.4 - Картирование амплитудной аномалии в интервале, соответствующим сарматским отложениям [93]

Отложения, соответствующие реперному горизонту, перекрываются такой же толщей переслаивания мергелей и песчаников, мощностью около 100-150 м до стратиграфической кровли сарматских отложений. Эта толща вмещает крупное геологическое событие, которое можно проинтерпретировать как направленный обломочный (гравитационный) поток, происходивший в тех же пространственных координатах. Как показано на рисунке 8.5, сейсмическая картина этого интервала на разрезе резко отличается хаотичным распределением отдельных «обрывков» осей синфазности в интервале, ограниченном опорными, латерально выдержанными (в пределах этого участка) отражающими горизонтами. Особенности сейсмического изображения позволяют этому событию проявляться как в картах классификации, так и на слайдах, и при визуализации результатов спектральной декомпозиции (RGB).

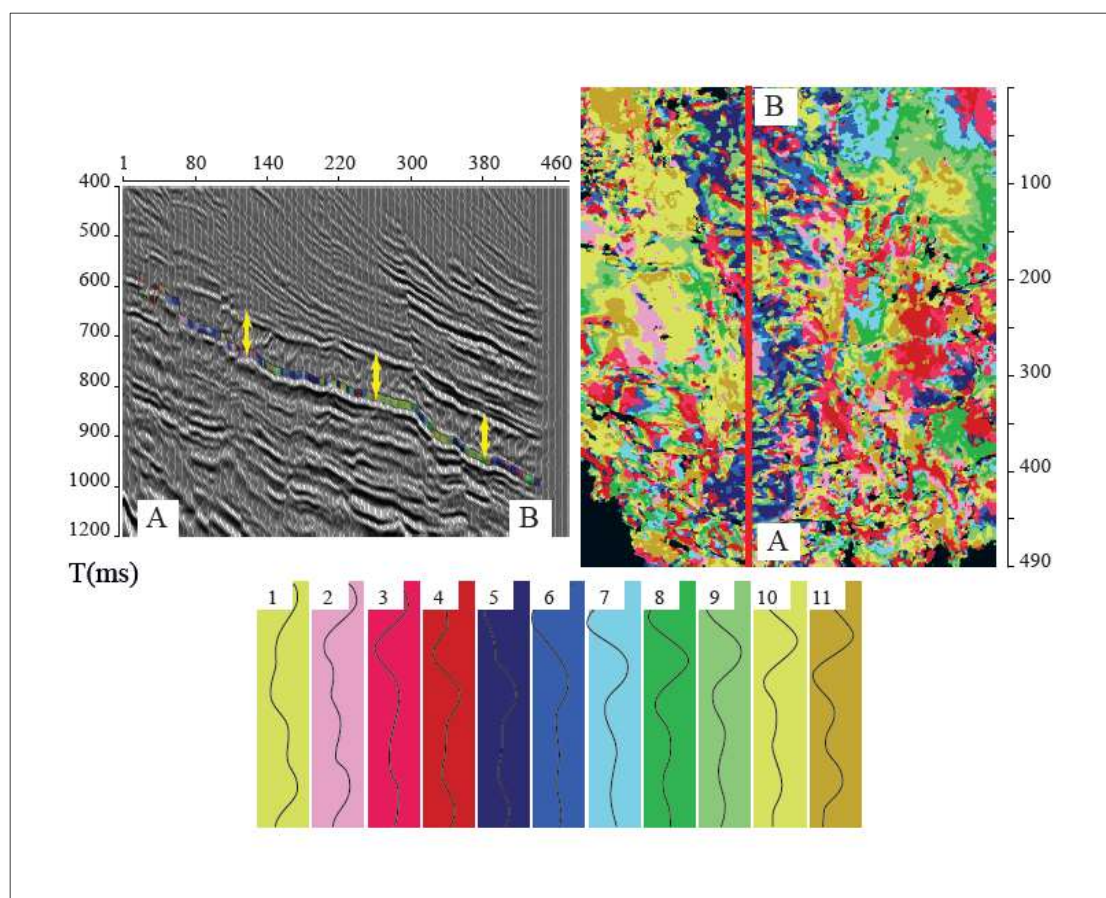


Рисунок 8.5 - Проявление оползневого объекта в кровле сарматских отложений на временном сечении и по результатам классификации целевого интервала [93]

От других подобных событий, попавших в поле зрения интерпретатора, его отличает форма и относительно крупные масштабы. Длина объекта в субмеридиональном направлении составляет около 7 км, форма грушевидная, вытянутая, ширина от 1 до 3 км. Оползневые процессы в пределах молодых неконсолидированных осадков являются весьма характерным явлением. Но наличие достаточно масштабного направленного оползневого потока может свидетельствовать об активизации в этот момент тектонических процессов. Во всем регионе Банатского грабена, на южном окончании которого находится Дремлянская депрессия, можно найти еще 2-3 подобных ярких примера.

Выше по разрезу, оползневые отложения перекрыты толщей паннона и мощным клиноформным комплексом. На рисунке 8.6 представлен сейсмический разрез, отображающий строение клиноформного комплекса (Дремлянская депрессия).

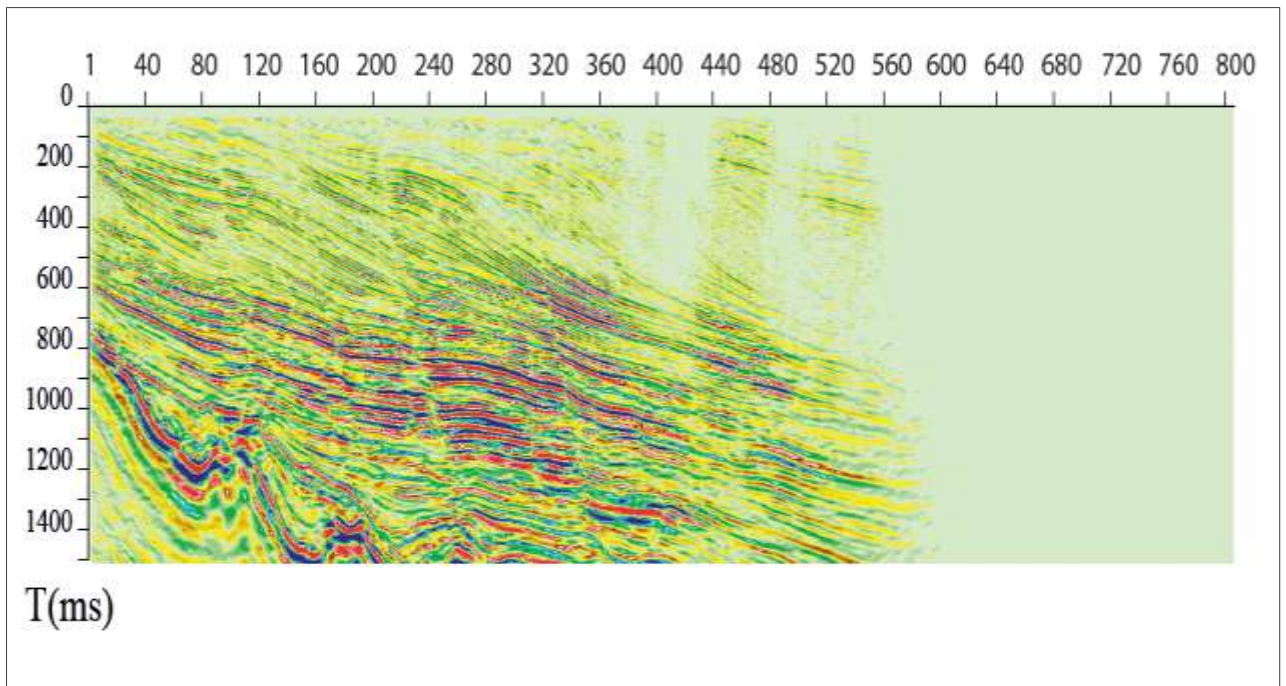


Рисунок 8.6 - Сейсмический разрез, отображающий строение клиноформного комплекса (Дремлянская депрессия) [93]

Вся толща неогеновых отложений в разные этапы подвергалась интенсивному тектоническому воздействию. Интерпретация разломов

позволила выделить как минимум три разновозрастные генерации. Приуроченность нескольких небольших нефтегазовых месторождений к этой активной зоне свидетельствует о том, что такой тектонический режим не повлиял на сохранность залежей, а, возможно, наоборот, сыграл положительную роль и поспособствовал миграции углеводородов.

Проактивность отдельных направлений, связанных с блоками фундамента проявляется даже в современных событиях. В пределах той зоны, о которой шла речь, в настоящее время находится субмеридиональное русло реки Млава.

Периодическая реактивация разломов древнего заложения определила не только характер активной тектонической зоны, но и сопутствующих седиментационных событий. Поэтому изучение последних, через особенности сейсмического изображения, способствует более глубокому пониманию тектонического режима в целом и степени унаследованности событийного ряда.

ГЛАВА 9. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕКТНО – ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА НА ПРИОБСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗС НГБ

На Приобском месторождении в пределах южной лицензионной территории, подводные конусы выноса (ПКВ) занимают 42% площади месторождения и вмещают 56% начальных геологических запасов. На рисунке 9.1 приведены сейсмические образы конусов выноса. Объекты, представленные в качестве примеров, выявлены в широком диапазоне глубин, практически во всех, достаточно мощных пластах черкашинской свиты группы АС. Сейсмические данные в изучаемом регионе, в целом, удовлетворительного качества и позволяют достаточно уверенно интерпретировать в разрезе опорные отражающие горизонты. Основные сложности начинаются при прослеживании палеоизохронных поверхностей внутри клиноформного комплекса, особенно в зонах оползания, смятия, развития турбидитов. В этом случае большое значение имеет точность базовой корреляции, так как от нее зависит качество, наглядность и информативность отображения геологического события на погоризонтных и пропорциональных срезах различных динамических и геометрических атрибутов.

Объектно-ориентированный подход продемонстрирован на примере последовательного изучения системы конусов выноса пласта 10.0.1 Приобского месторождения. Интегральная граница их суммарного распределения фиксируется по карте временных толщин через увеличение параметра и «отрисовывается» на различных атрибутах. Закартировать внутреннее строение сложносочлененного седиментационного образования, состоящего из системы лопастей, стало возможным только при получении данных эксплуатационного бурения. Информации по разведочным скважинам оказалось недостаточно.

Вертикальное сечение амплитудного куба на рисунке 9.2 иллюстрирует целевой интервал исследования. Опорные отражающие горизонты

проинтерпретированы в соответствии с принципами «фазовой корреляции», их стратиграфическая принадлежность зафиксирована по скважинным данным и соответствует подошве и кровле клиноциклита.

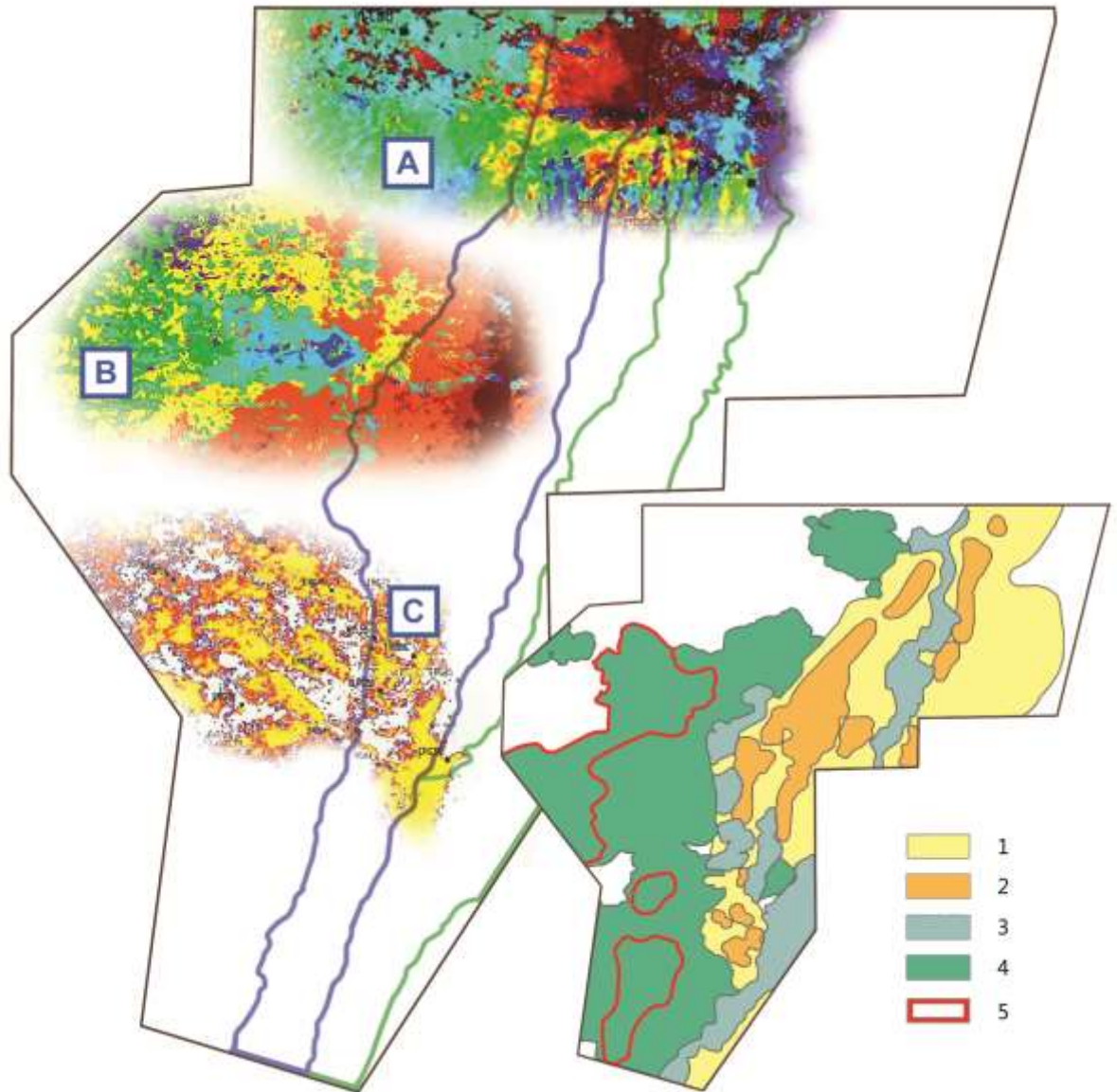


Рисунок 9.1 - Сейсмические образы конусов выноса [93].

Условные обозначения: А – изображение конуса выноса в комплексе отложений АС12 на карте сейсмофаций, полученной путем классификации трасс в целевом интервале. В – изображение конуса выноса в пласте АС10.1-3 на карте сейсмофаций, полученной путем классификации трасс в целевом интервале. С - изображение конуса выноса в пласте АС10.0.1 на горизонтальном срезе по амплитудному кубу. Линиями зеленого цвета обозначена зона склона пластов группы АС12. Линиями синего цвета обозначена зона склона пластов группы АС10. 1-зона мелководного шельфа; 2- депоцентры толщин мелководного шельфа; 3- зоны склона, 4 - зоны ПКВ, 5- дистальные зоны ПКВ

Сейсмическое изображение в пределах клиноциклита характеризуется отсутствием регулярных отражений, хаотичными обрывками осей синфазности и в целом носит «зашумленный» характер.

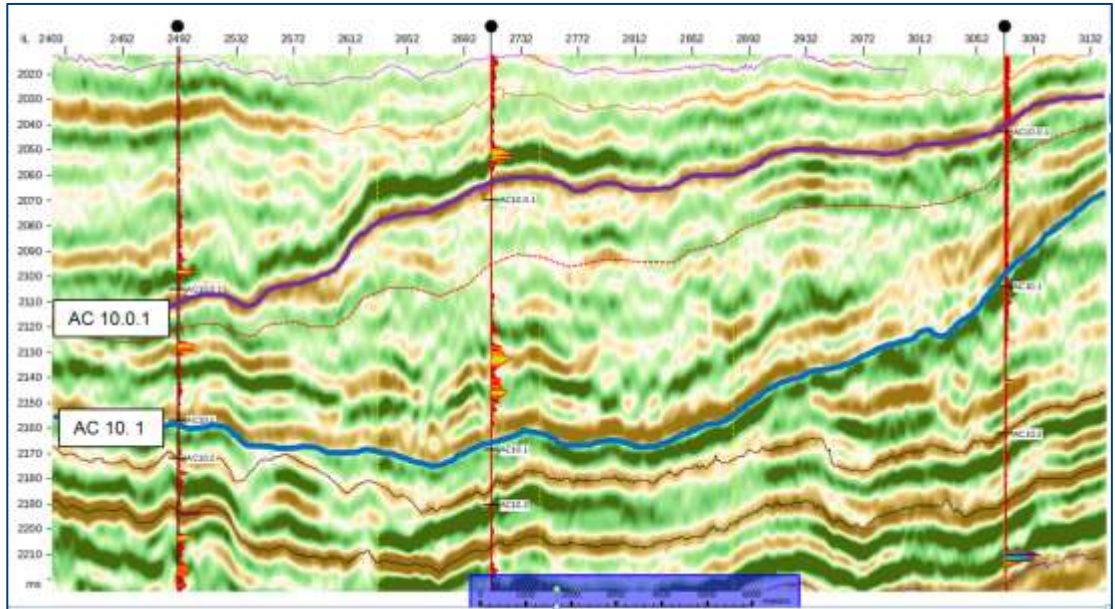


Рисунок 9.2 - Временной сейсмический разрез по исходному амплитудному кубу, опорные горизонты выделены утолщенными линиями голубого и фиолетового цвета

В соответствии с общей концептуальной моделью клиноформного комплекса, толща сформирована склоновыми процессами, которые предполагают образование оползней и конусов выноса. Поиск в сейсмическом изображении клиноциклита откликов от соответствующих объектов предполагает следующие варианты решений: прослеживание промежуточных (вспомогательных) границ; расчёт пропорциональных срезов между отражающими горизонтами, сопоставимыми с кровлей и подошвой комплекса; извлечение из объема данных амплитудно выраженных фрагментов и т.д. В данном примере, для рекогносцировки, в интервале клиноциклита была выполнена классификация амплитудного куба по форме трассы. На рисунке 9.3 продемонстрирована результирующая карта классификации, на которой можно оконтурить зону развития конусов выноса (классы оранжевого, желтого и

светлозеленого цвета к западу от линии бровки). В процессе работы тестировались различные варианты.

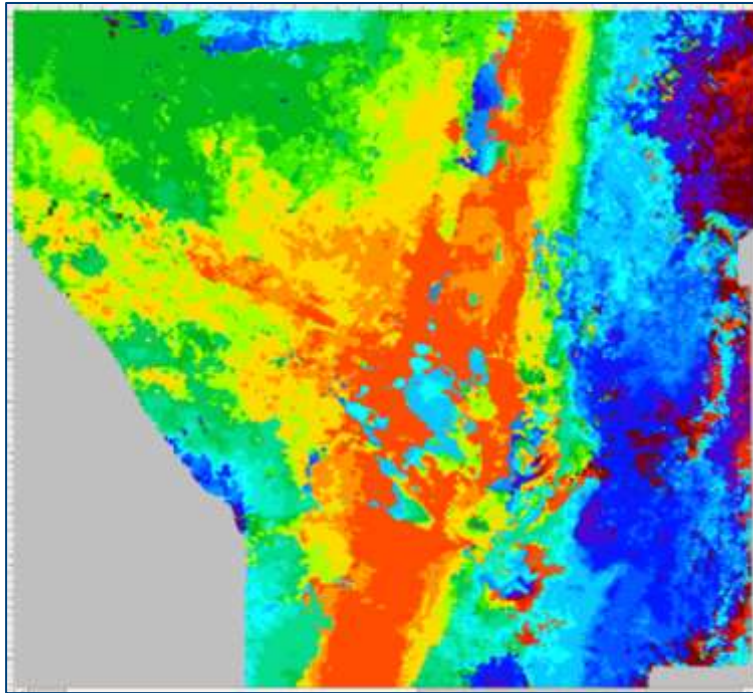


Рисунок 9.3 - Карта классификации по форме трассы в интервале АС 10.0.1 – АС 10.1

На рисунке 9.4 приводится карта классификации по форме трассы интервала в 50 мсек выше подошвы клиноциклита, на которой подчеркивается изгиб бровки шельфа, характерный для зон основной транспортировки материала и проявляются новые элементы в общей, пока еще мозаичной картине. Вся дальнейшая интерпретация фокусируется на этот сегмент с целью детализации локальных объектов.

Комплексный анализ скважинной и сейсмической информации позволил прокоррелировать по кубу «сейсмофаций» (полученному путем объемной классификации исходного амплитудного куба) условный отражающий горизонт, ассоциированный в фондоформенной части с подошвой предположительно песчаных отложений (по одной из скважин). Это позволило отсеять фоновую информацию в подошве клиноциклита и сузить целевой интервал исследования, как показано на рисунке 9.5.

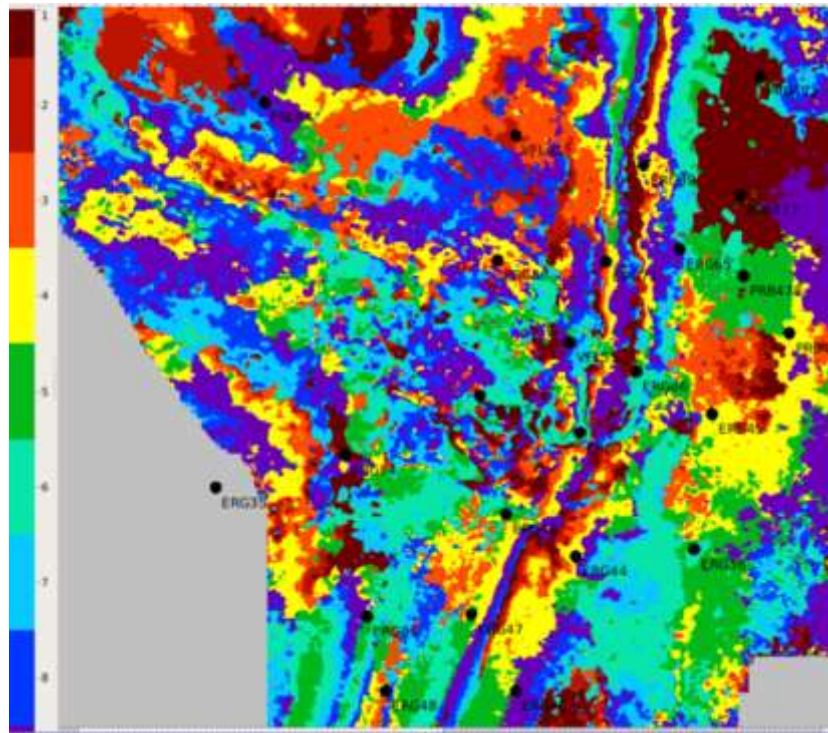


Рисунок 9.4 - Карта классификации по форме трассы в интервале АС 10.1+50 мс

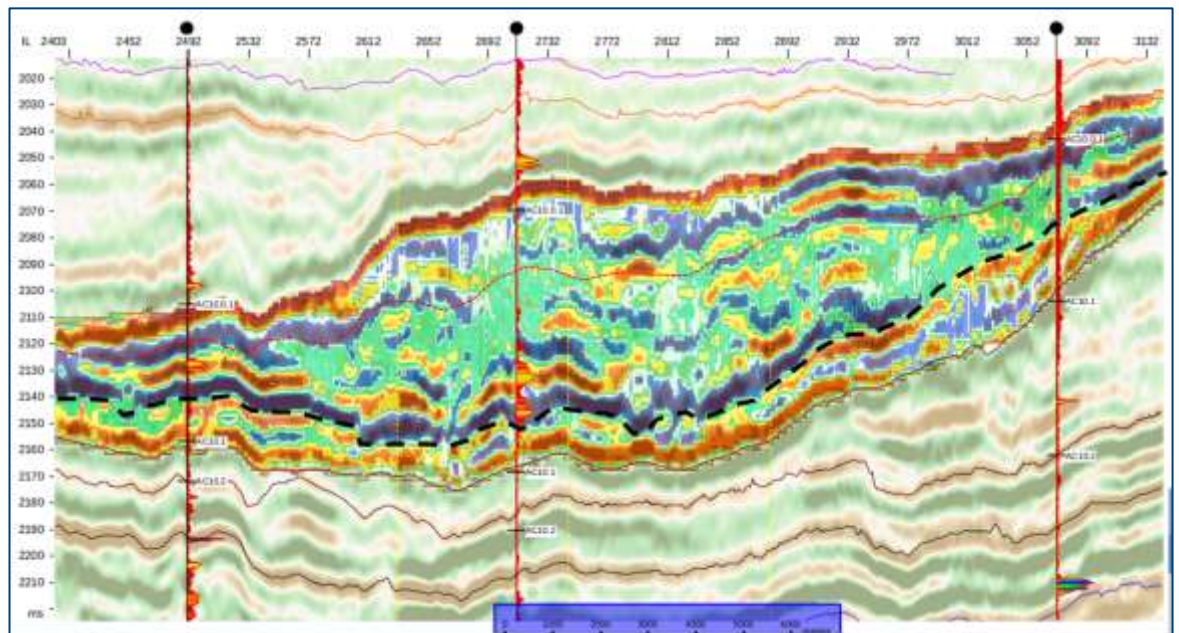


Рисунок 9.5 - Вертикальное сечение по кубу классификации совмещенное с временным разрезом с нанесением дополнительных горизонтов, позволяющих ограничить целевой интервал исследований

Каждый из подобных приемов позволяет повысить информативность последующих шагов, например расчёт пропорциональных срезов в пределах уточненных границ. Последовательный анализ пропорциональных срезов позволил еще более уточнить область интересов. На рисунке 9.5 нанесена линия пропорционального среза, на уровне которого в распределении амплитуд впервые относительно кровли проявились формы характерные для лопастей конусов выноса.

Результатирующее изображение, демонстрирующее эффективность объектно-ориентированных подходов приводится на рисунке 9.6.

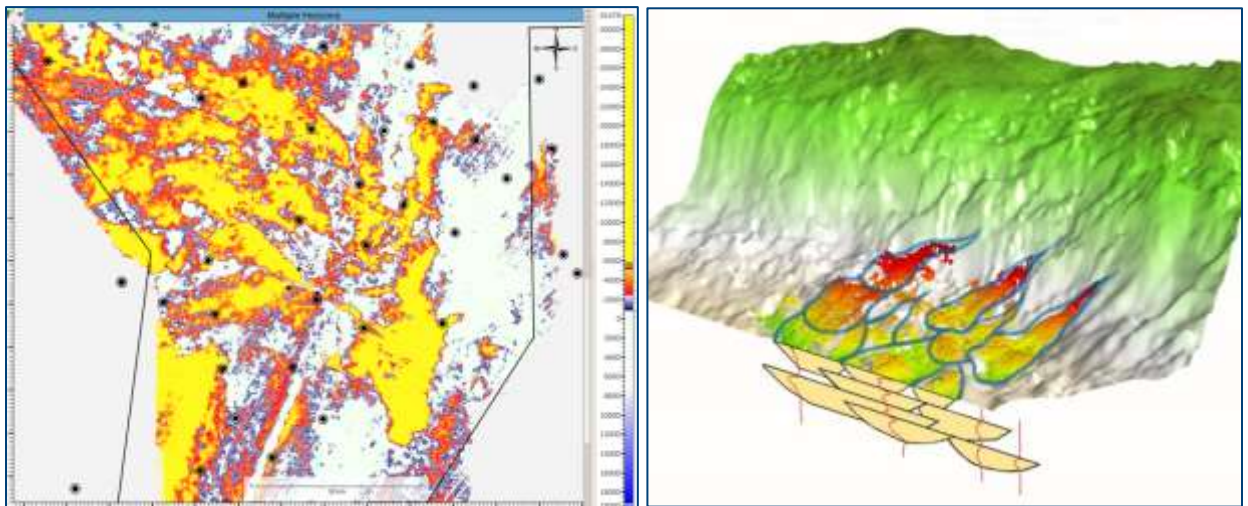


Рисунок 9.6 - Наиболее информативный горизонтальный срез и принципиальная схема строения конуса выноса [93]

Таким образом, удалось не только обозначить интегральную границу ПКВ, но и выделить внутренние элементы предполагаемой системы лопастей, являющихся связанными микроциклами. Суммарные размеры системы около 14 км на 25 км. Средние размеры «единичного» объекта 3,5км*7,5км. Объект подтвержден бурением более чем 100 скважин.

По результатам сейсмогеологического анализа морфологии ПКВ пластов АС10-12 Приобского месторождения, необходимо отметить их различие по форме и особенностям внутреннего строения, что находит корреляцию с рельефом подстилающей поверхности и градиентом склона.

Наиболее контрастный объект связан с комплексом АС12. Формирование комплекса АС12 проходило в условиях достаточно скомпенсированного рельефа, относительно пологого склона, а так же градиентного приемного бассейна с разницей глубин до 120 м при погружении в западном направлении. Размеры приемного бассейна в широтном направлении (вдоль поступления осадочного материала) оцениваются в 30-40 км, о чем можно сделать вывод, анализируя сейсмические данные. Формы ПКВ для пластов группы АС12 различные: от округлых (радиальных) компенсирующего типа, до субрадиальных (имеющих видимую направленность выноса). Первые (радиальные) практически не дифференцированы по площади, для них характерно отсутствие явных площадных изменений качества коллектора в зависимости от удаленности от источника сноса (проксимальная, средняя, дистальная зоны не выделяются). Особенностью вторых (субрадиальных), со сложными формами и выбором направления аккумуляции в соответствии с рельефом подстилающей поверхности, является наличие удаленных (дистальных) зон ПКВ, преимущественно компенсационного характера формирования, что существенно помогает при прогнозировании качества и мощности продуктивных отложений. На разрезах амплитудного куба, продемонстрированных на рисунке 9.7, объект проявляется увеличением временных толщин за счет появления в интервале пласта дополнительного высокоамплитудного отражения.

На сечениях кубов сейсмофаций, показанных на рисунке 9.8, описывающих объект по критичным направлениям, можно наблюдать элементы сейсмического изображения, характеризующие сложносочлененное внутреннее строение конуса выноса. В плане, на погоризонтных срезах, объект характеризуется достаточно контрастными границами, его размеры около 6-7 км в поперечнике и 10-11 км в направлении транспортировки материала. Результаты сейсмофациального анализа подтверждены бурением более чем 50 скважин, средняя эффективная мощность коллекторов в пределах объекта составляет 18 м.

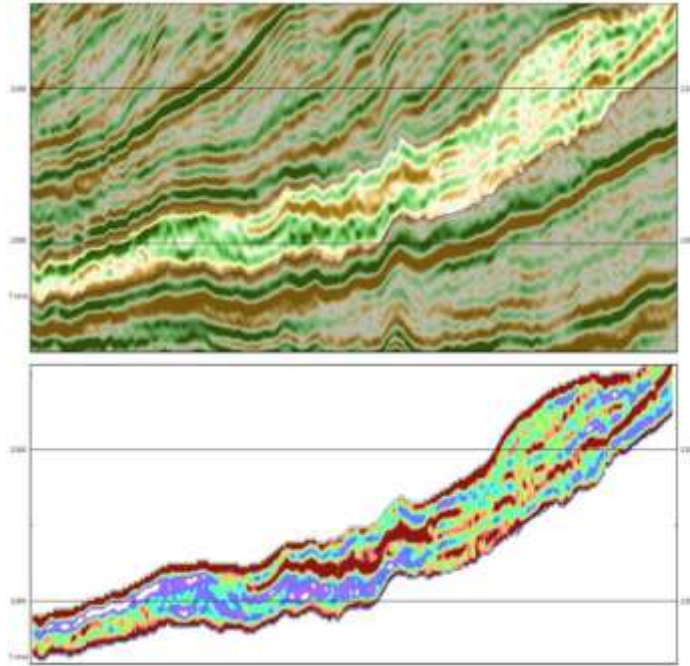


Рисунок 9.7 - Отображение конуса выноса на вертикальных сечениях по амплитудному кубу и кубу сейсмических фаций (комплекс АС12) [93]

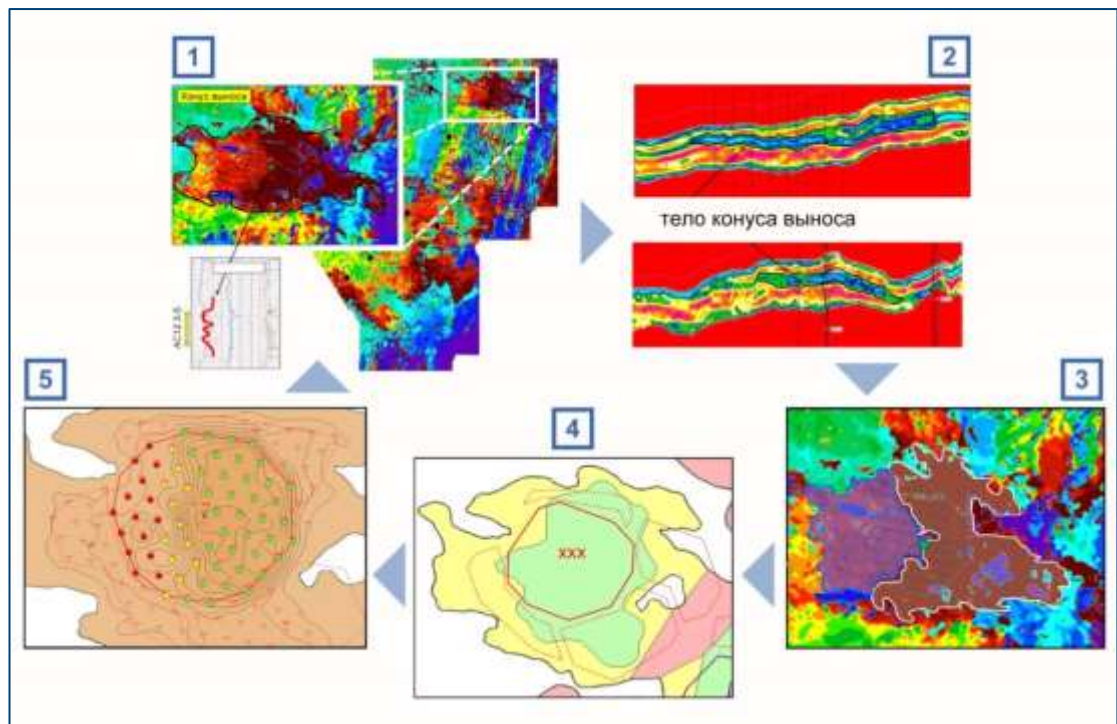


Рисунок 9.8 - Пример применения результатов сейсмофациального анализа для мониторинга эксплуатационного бурения (объект АС12)

Условные обозначения: 1- карта сейсмофаций, полученная путем классификации трасс в целевом интервале; 2- разрезы по критичным направлениям куба сейсмофаций, полученного в целевом интервале путем классификации по форме трассы; 3- фрагмент карты классификаций в целевом интервале; 4- линия глинизации и деление выделенного объекта на приоритетные зоны; 5 - фрагмент прогнозной карты эффективных толщин с фондом скважин эксплуатационного бурения

Морфология палеорельефа на конец времени формирования пластов группы АС12 выглядит более контрастно. Именно она послужила одним из ключевых факторов в формировании фациальных комплексов отложений АС10. Достаточно выраженное локальное погружение в западной части площади определило направление и область аккумуляции осадков. В сравнении с пластами группы АС 12, пласты группы АС10 характеризуются улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами, что естественным образом сказывается на показателях работы скважин; прослеживается закономерное уменьшение пористости коллектора в дистальных частях комплекса ПКВ. Из-за локализации всей системы в относительно ограниченном бассейне (западный приемный бассейн), удастся проследить, по данным каротажных диаграмм, смену типа разреза от осевой к краевым частям ПКВ.

В осевой части ПКВ по данным каротажной диаграммы отчетливо выделяется наибольший набор «сегментов», характеризующих периодический характер выносных явлений. К краевым частям ПКВ количество «сегментов» сокращается вплоть до полного выклинивания. Данная закономерность используется как критерий при анализе поступающих данных ГИС новых скважин. При сопоставлении скважинной информации с данными сейсмоки, так же наблюдается общий тренд уменьшения к краевым частям временной мощности интервала, отождествляемого с песчаным образованием.

В пласте АС10.4 конус выноса уверенно картируется по атрибутам, несмотря на малую мощность целевого интервала. Размер объекта 2-2,5 км на 7,5-8 км. На временных разрезах интервал, включающий конус выноса, проявляется в увеличении временных толщин суммарно с вышележащим пластом АС10.1-3. Объект представляет собой систему, включающую оползневые образования. В пределах ПКВ нефтенасыщенный коллектор вскрыт более чем 50 скважинами, среднее значение эффективной мощности – 9 метров. Сопоставление визуализированного конуса выноса на карте сейсмофаций, полученной путем классификации трасс в целевом интервале, с картой эффективных толщин приведено на рисунке 9.9.

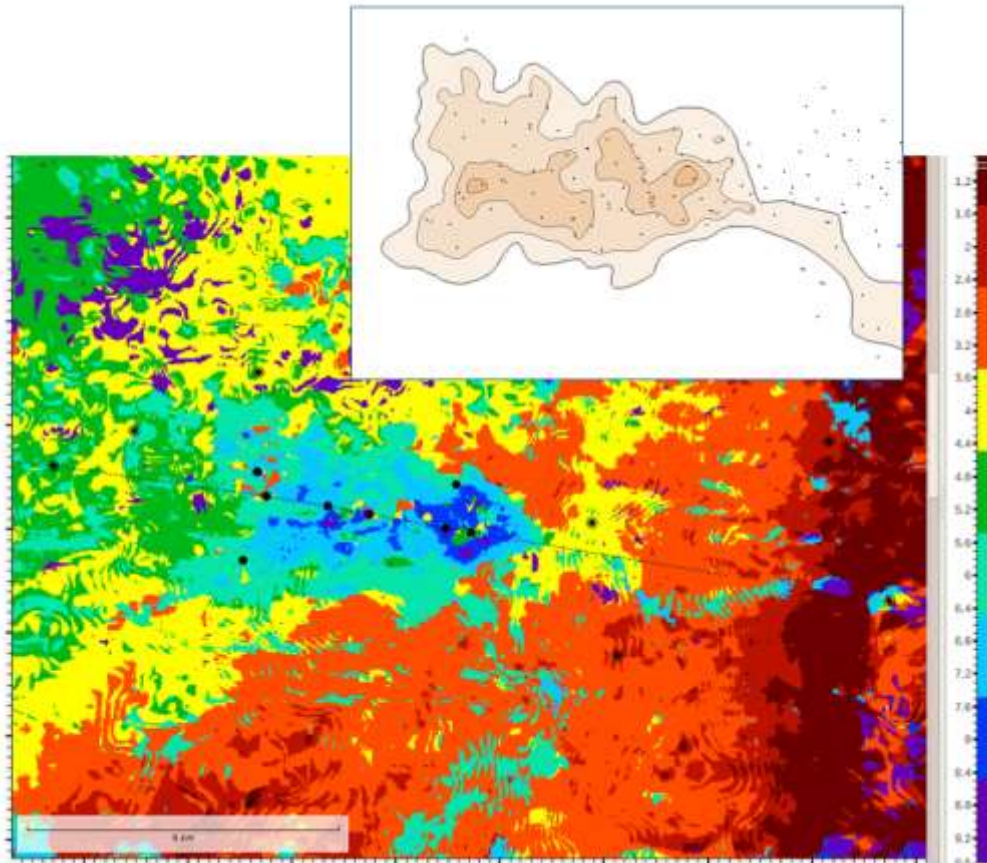


Рисунок 9.9 - Отображение конуса выноса в пласте АС10.1-3 на карте сейсмофаций, полученной путем классификации трасс в целевом интервале и сопоставление с картой эффективных толщин

В пласте АС10.1-3 выделяется система конусов разной степени сложности. Характерный рисунок сейсмического изображения в целевом интервале выражается в прекращении четко выраженной фазы и появлении интерференционного шума. В целевом интервале объект проявляется через локальное увеличение временных толщин при общей тенденции к их уменьшению в фондоформной части клиноформы. Анализ сейсмофациальной карты позволяет сделать заключение о дугообразном направлении сноса, отличном от достаточно прямолинейного, характерного для остальных описываемых объектов. Несмотря на сложность строения ПКВ, состоящего из отдельных элементов, интегральные границы площади его распространения выделяются достаточно уверенно. Вся система в плане имеет размеры около 12 км на 18 км. Мощность от 1-5 м до 30-35 м. Анализ всей сейсмогеологической информации позволяет предположить, что важную роль в формировании ПКВ

сыграли оползневые процессы, которые сформировали гипсометрию подстилающей поверхности и обозначили, таким образом, зону приоритетного накопления осадков.

Объектно – ориентированные интерпретационные подходы в комплексе с анализом ГИС и керновыми исследованиями сыграли большое значение при планировании разработки Приобского месторождения. Понимание закономерностей латеральной и вертикальной изменчивости геологического строения позволило адресно планировать системы вытеснения, обеспечивая максимальный КИН в выделенных районах. Для пластов АС10.0.1 и АС10.1-3 удалось сгруппировать скважины с различными характеристиками вытеснения, полученными при керновых исследованиях и условно закартировать границы сходных зон ПКВ [77, 94].

Палеооползни, выявленные при интерпретации сейсмических данных в интервале черкашинской свиты достаточно мощные, захватывают интервал, вмещающий несколько потенциально продуктивных пластов. В плане (на сейсмических срезах) характеризуются узнаваемой вытянутой формой с типичным соотношением размеров: существенное превышение длины над шириной. По одной из классификаций оползневых процессов их условно можно отнести к так называемым «структурным» или «блоковым» оползням, отличительной особенностью которых является смещение седиментационных масс по склону отдельными блоками с сохранением их внутренней структуры.

Объект 1, представленный на рисунке 9.10, по набору признаков идентифицированный как оползень, обладает следующими характеристиками: локально выраженный, имеет резкие границы с вмещающими отложениями, контуры четкие, форма вытянутая, размеры в плане 3-4 км на 16-20 км. Направление смещения с юго-востока на северо-запад, перпендикулярно «бровке шельфа». Мощность изменяется от 1-5 м в краевых частях до 40-60 м в осевой части тела оползня. По характерной динамике сейсмической записи, можно прогнозировать, смещение основной массы осадков («тела оползня») на 4000-4200 м.

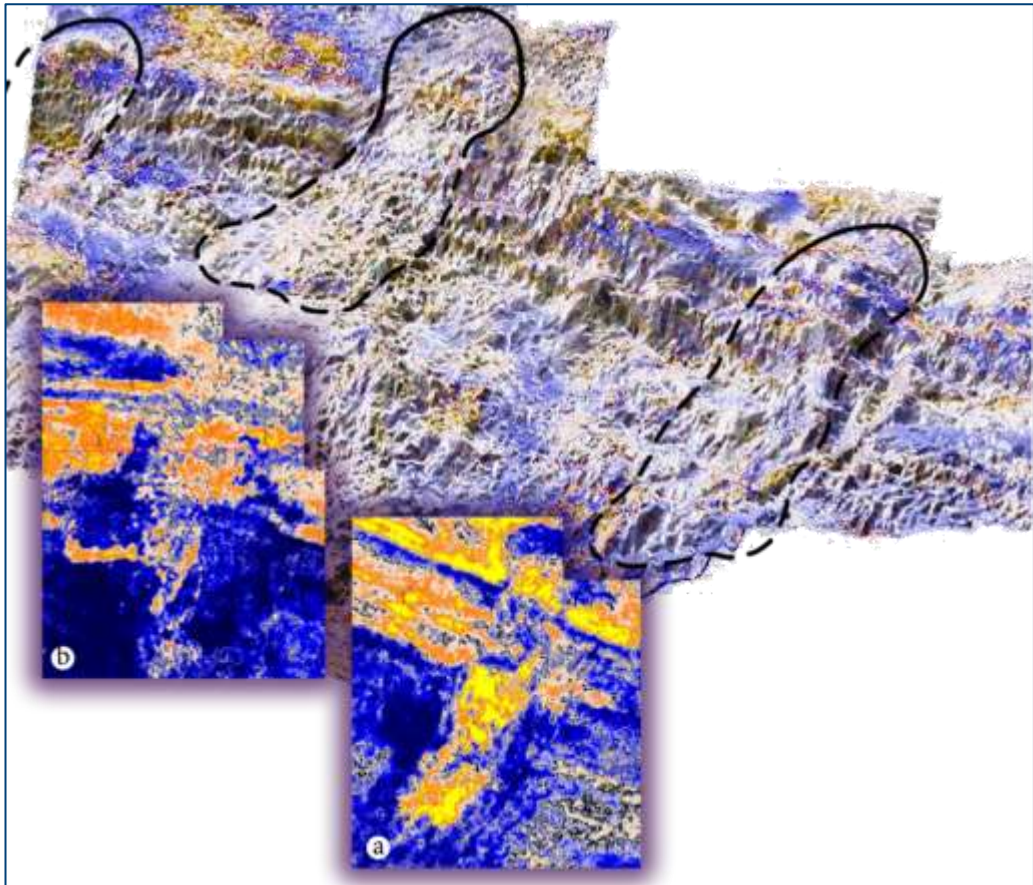


Рисунок 9.10 - Визуализация «серии» палеооползней путем совмещения сейсмического атрибута с объемным изображением поверхности, а – объект 1, б- объект 2 [95]

Оползень захватил два потенциально продуктивных пласта, с разной степенью деструкции их внутреннего строения. Комплексная интерпретация сейсмических и скважинных данных позволила идентифицировать выделенную зону оползневого объекта как перспективную.

На картах сейсмофаций в интервале развития одного из пластов, отчетливо прослеживаются характерные морфологические признаки строения структурного оползня: оползневой цирк, вершина оползня, тело оползня.

В северо-восточном направлении по простиранию «бровки шельфа» на расстоянии около 30-35 км от вышеописанного объекта 1, идентифицирован аналогичный объект 2.

Объект 2 находится в гипсометрически более приподнятой зоне, характеризуется большей мощностью и сложным строением. На вертикальных сечениях сейсмического куба по критичным направлениям (вдоль и поперек

направления оползания) достаточно уверенно проявляется увеличением временных толщин смещенного блока по отношению к статичным толщам (поперечное сечение), разрывом осей синфазности на границах «коридора» сползания (поперечное сечение), смещением осей синфазности по падению (продольное направление). На картах сейсмофаций и различных динамических атрибутов объект опознается менее четко, чем предыдущий. Контрастность границ объекта с вмещающими отложениями изменяется от четких, в области тылового шва, до расплывчатых в зоне разгрузки. Форма вытянутая, размеры в плане 5-7 км на 17-20 км. Общие толщины «тела оползня» изменяются от 5-8 м до 100-130 м. Оползень захватил 2 пласта.

Кроме описанных объектов, на площади отмечаются оползневые смещения меньшего масштаба. На рисунке 9.11 представлен локально выраженный объект: границы с вмещающими отложениями на картах атрибутов достаточно четкие, временная мощность в разрезе увеличенная, форма вытянутая, размеры в плане 1-2 км на 6-8 км. По характерной динамике сейсмической записи, можно предположить, смещение основной массы осадков на 3000-3300 м.

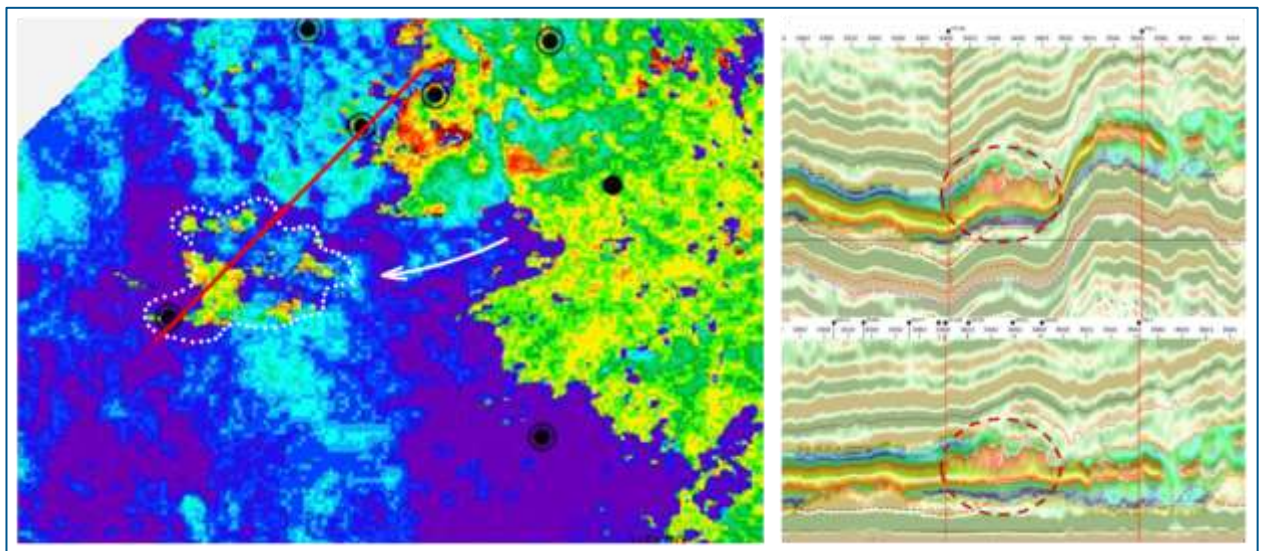


Рисунок 9.11 - Локальный объект оползневого типа: фрагмент карты сейсмофаций в целевом интервале (а), сейсмический разрез вдоль обозначенной линии (б), палеовариант разреза (с) [95]

Сползшие оползневые массы захватили интервал, вмещающий один продуктивный пласт. На картах сейсмофаций в интервале пласта прослеживаются характерные морфологические признаки строения, перечисленные ранее и позволившие идентифицировать объект как палеооползень.

Сохраняется возможность обнаружения и других аналогичных образований в процессе объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа.

Организация сейсмогеологического мониторинга на Приобском месторождении с применением объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа в комплексе с другими методологическими подходами комплексирования геолого-геофизической информации позволила повысить эффективность эксплуатационного бурения до 98% [75 - 79].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, выполненные в процессе подготовки диссертационной работы и изложенные в ней, позволяют сделать следующие важные заключения.

1. Тема поиска новых подходов к интерпретации сейсмических данных по-прежнему остается актуальной, особенно при изучении литологических и комбинированных ловушек. Ведущая роль отводится зарекомендовавшим себя общеметодическим подходам, таким как сеймостратиграфия, секвенс стратиграфия, сеймофациальный анализ. Сейсмические данные включают в себя намного больше информации, по сравнению с той, которая обычно востребована в режиме написания стандартных производственных отчетов. Развиваемый автором диссертации объектно-ориентированный подход основан на допущении, что большинство фрагментов сейсмического изображения потенциально несет в себе геологическую информацию, а их анализ способствует углубленной геологической интерпретации сейсмических материалов. Через объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ обосновывается последовательное развитие приемов и подходов, заложенных в основу сеймостратиграфического анализа, секвенс-стратиграфического анализа и сеймофациального анализа.

Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ включает следующие этапы:

- выявление объекта средствами стандартной интерпретации,
- интерпретация и картирование объекта с применением объектно-ориентированных интерпретационных подходов на основе априорной концептуальной модели,
- параметризация и анализ морфометрических характеристик,
- палеореконструкция условий осадконакопления,
- прогнозирование свойств резервуара,

– геологическое моделирование.

На основе комплексного изучения создается библиотека сейсмических образов, которая позволяет эффективнее проводить последующие исследования в регионе.

2. Приведен обзор современных представлений об эволюции Паннонского бассейна, который многие исследователи называют природной лабораторией. Особенностью бассейна является активный тектонический режим, утончение земной коры (22-30 км на фоне 36 км в окружающих областях, 50-60 км в Карпатах) и повышенный тепловой поток (от 80-100 и до 130 мВт/м²). В структурно-тектоническом строении Паннонского бассейна существует доминирующее северо-восточное, так называемое «Балатонское» направление. Две основные микроплиты, выделяемые в его основании, АЛСАРА и Тисса-Дакийская микроплита, имеют формы вытянутые в северо-восточном направлении, с приблизительным соотношением длины к ширине: 2 к 1. Соответственно, этого же направления придерживается Средневенгерская разломная зона, возникшая на границах микроплит. Северо-восточное простирание имеет зона аномально повышенного теплового потока, простираясь в Закарпатскую впадину. С тепловым потоком коррелируются параметры глубин залегания поверхности Мохо и наиболее активные неотектонические зоны. Общий тренд опознается на картах гравиметрических и магнитометрических исследований. Все фактические данные свидетельствуют о том, что ось ЮЗ – СВ существует, вне зависимости от базовой геологической концепции. Впервые в регионе в процессе обработки первой широкоазимутальной сейсмической съемки были установлены анизотропные явления. Их интерпретация позволила определиться с ключевым направлением ЮЗ-СВ, которое по данным скважин является направлением общего регионального стресса. Наличие регионального стресса ЮЗ-СВ подтверждается на планетарном уровне путем использования приемов космической геодезии; на глобальном уровне через карту стрессов, собранных по точечным

источникам информации; на региональном уровне по карте неотектонических движений и т.д.

3. Проанализированы существующие принципы выделения сейсмостратиграфических комплексов и предложены новые критерии их идентификации на основе особенностей сейсмического изображения. Описание каждого ССК сопровождается иллюстрацией ключевых геологических событий. В основу выделения ССК впервые положены материалы сейсмических съемок МОГТ 3D, выполненных в период с 2011 по 2017 год. Сербский сегмент в Паннонском бассейне в 90-е годы был исключен из активных сейсмогеологических исследований по причине общеизвестных политических событий, поэтому большинство выполненных ранее исследований являются устаревшими в методическом плане или посвящены другим частям бассейна, в основном, территории Венгрии.

4. Выполнен статистический анализ параметров месторождений юго-восточной части Паннонского бассейна. К настоящему моменту в пределах бассейна открыто более 500 залежей, с общими запасами свыше 1 400 миллионов тонн условной нефти. Несмотря на малую размерность подавляющего большинства месторождений, они рентабельны и дальнейшие геологоразведочные работы представляют большой практический интерес. Распределение залежей нефти по возрастам вмещающих толщ демонстрирует их приуроченность преимущественно к основанию палеозойско-мезозойского возраста и синрифтовому комплексу (нижний миоцен, баден, сармат). Корреляции размера залежи с возрастом вмещающей толщи не наблюдается. В основном, для региона характерны малоразмерные залежи: 94% залежей по площади соответствуют диапазону значений от 0.058 до 2.50 кв.км. Распределение месторождений газа по стратиграфическим единицам демонстрирует их приуроченность к толще отложений нижнего понта. В совокупности, 60% месторождений газа сосредоточено в верхнем миоцене.

Анализ статистических данных по бассейну позволяет сделать вывод, что наиболее вероятный размер открытий нефтяных месторождений составляет

менее 140-270 тыс. тонн. Наибольшая вероятность открытий предполагается на глубинах 1500 – 2000 метров и глубже 2500 м. По газовым месторождениям разброс по глубинам достаточно большой, предположительно от 500 до 4000 м. Наиболее вероятный размер открытий менее 200 x10⁶ м³.

Литологические ловушки преимущественно приурочены к отложениям понта и плиоцена. Их доля в статистике потенциальных объектов составляет 65-75%, подтверждаемость - 20-30%. В процессе вероятностной оценки, к литологическим ловушкам применяются более низкие коэффициенты вероятности наличия ловушки и ее наполняемости.

По мере поступления информации о новых потенциальных объектах на основании интерпретации сейсморазведочных данных МОГТ 3D составлена вероятностная схема нефтегазоносности региона. В настоящий момент разработанная схема нефтегазоносности региона является основой для планирования геолого-разведочных работ и общей стратегии компании в регионе на ближайшие годы.

5. Классифицированы амплитудные аномалии, являющиеся одной из специфических особенностей региональных сейсмических данных. Статистический анализ позволил установить, что в амплитудных аномалиях проявляются 35% месторождений. Следовательно, исторически сложившийся «надежный поисковый критерий» не является таковым. Для сопоставления, в Западной Сибири приводится значение в 20%. Впервые для региона выполнен анализ приуроченности сейсмических аномалий к сейсмофациальным зонам в отложениях понта и плиоцена. В соответствии с геологическим строением понт-плиоценовых отложений, выделены пять категорий обстановок осадконакопления: озерно-аллювиальная равнина, фронтальная часть дельтового комплекса, продельта и склон с характерными гравитационными процессами, подножие склона, подводная равнина понтийского моря-озера. Для вычленения амплитудных аномалий, не приуроченных к существующим месторождениям или уже выявленным объектам, был разработан метод «сканирования пространства» на основе существующих технологических

решений в одном из интерпретационных пакетов. Сопоставление распределения аномалий в каждой из сейсмофациальных зон позволило сделать заключение, что наибольший риск в выявлении потенциальных объектов на основе критерия существования амплитудной аномалии, связан с объектами, приуроченными к склоновой части. Результаты бурения подтверждают сделанные выводы.

Амплитудные аномалии, не связанные с наличием газовых залежей и обусловленные литологическими причинами создают предпосылки для результативного сейсмофациального анализа. В диссертации проанализированы формы аномалий, выявленные по результатам интерпретации и геологические объекты, с которыми эти аномалии ассоциированы; установлено, что комплексный геолого-геофизический анализ позволяет обеспечить повышение эффективности разбуривания объектов, выявленных на основе картирования амплитудных аномалий. После завершения научно-исследовательского проекта по изучению аномалий в 2017 году были пробурены две успешные скважины на объекты «яркое пятно».

6. В качестве нового методического подхода для интерпретации сейсмических данных предложен объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ, основанный на допущении, что практически каждый фрагмент сейсмического изображения потенциально может нести в себе определенную геологическую информацию. Объектно-ориентированный подход допускает условно-фазовую корреляцию (фазовые переходы), с целью формирования целостной картины геологического объекта. Специалисты по Западной Сибири отмечают, что подобные подходы являются единственно возможными для картирования сложнопостроенных ловушек и залежей углеводородов в ачимовской толще и клиноформных шельфовых отложениях неокома. Подход предполагает скурпулезную работу по экстрагированию объекта из общего сейсмического изображения с многократными итерациями для достижения наилучшего результата. Наилучший эффект достигается на этапе сейсмогеологического мониторинга эксплуатационного бурения, когда

специалист работает на пределе разрешающей способности метода и постоянно имеет интерактивную обратную связь с результатами бурения.

Разработаны приемы объектно-ориентированной интерпретации на основе существующих инструментов в программном обеспечении. Первое направление включает приемы работы, направленные на выявление и локализацию объекта(ов) через идентификацию палеоизохронных поверхностей. В этом случае ключевая задача заключается в определении палеоизохронных поверхностей с последующей локализацией объекта. Второе направление предполагает детальную интерпретацию уже установленного объекта, аномально проявленного в сейсмическом изображении: палеоизохронную поверхность восстанавливают экстраполяцией от объекта, для того, чтобы, по возможности, понять общую картину среды осадконакопления. И в том, и в другом случае задача сводится к корректному определению условно одномоментных событий. Объектно-ориентированная интерпретация позволяет определиться с формой объекта, диспозицией по отношению к соседним объектам, приуроченностью к конкретной обстановке осадконакопления, чтобы на следующем этапе оперативно подключить скважинную информацию для более детального седиментационного анализа.

7. Выявлены сейсмические образы, характерные для отдельных геологических событий в отложениях понта и плиоцена, позволяющие идентифицировать эти события на новых поисковых площадях. Активное развитие оползневых процессов в позднем миоцене было обусловлено высокими скоростями осадконакопления и медленными поступательными тектоническими движения отрицательного знака. На сейсмических разрезах выявлено три типичных сейсмообраза: первый и второй типажи проявляются в виде концентрических дуг, возможно отображают деляпсивную и детрузивную части оползня. Встречаются как одиночные объекты, так и многоэтажные, комплексные. Третий сейсмообраз характеризует локальные объекты вытянутой формы в направлении оползания. Форма, предположительно, указывает на более высокую степень пластичности процесса. Подобный тип,

вероятно, можно отнести к оползневым потокам. Приемы объектно-ориентированной интерпретации позволяют детально картировать оползневые объекты. В настоящий момент по Паннонскому бассейну нет информации об обнаружении месторождений, приуроченных к оползневым образованиям.

Сейсмообраз, связанный с конусами выноса является достаточно характерным и сопоставимым с объектами в других регионах. Особенностью сейсмогеологических условий является возможность изучения целостной системы: шельф – склон – подножие. Составлена схема заполнения котловины моря-озера на основе информации по сейсмическим слайсам. Для одной из разведочных площадей выполнен параметрический анализ закартированных лопастей. На основе анализа сделан вывод, что наиболее реальный размер геологического события находится в диапазоне значений от 1 до 8 кв.км. Объекты, площадью выше этих значений, возможно, представляют собой серию лопастей или не существуют. Если обратиться к статистике по всем месторождениям региона, то 94% залежей по площади соответствуют значениям до 2.5 кв.км.

Шлейфы склонов не имеют четко выраженного сейсмического образа. Интерпретация выполняется, в основном, на основе концептуальной модели.

8. На основе объектно-ориентированной интерпретации составлена схема речных систем существовавших в плиоцене; выполнена типизация палеоканалов. В течение позднего миоцена и плиоцена в регионе продолжалась тектоническая активность, как в центральной части бассейна, так и на его периферии. В совокупности с глобальными вариациями климата тектонические процессы повлияли на питание рек и густоту речной сети (особенно для горных районов), на эрозионные процессы (при воздымании блоков), на морфологию речных долин и их изменение, направление русел. Отмечается активное развитие разветвленных и меандрирующих рек. Детально описаны приемы интерпретации, разработанные для объектно-ориентированного сейсмогеологического анализа палеоканалов.

Выполнена параметризация палеоканалов синусоидальной формы. Выборка составила 56 значений. Среднее значение амплитуды излучины составило 1200 м, ширина пояса руслоформирования – 2400 м, шаг излучины – 2100 м. В тестовой выборке объекты были сгруппированы по трендам изменения соотношения полупериода к амплитуде излучины по принадлежности к определенным типам речных систем. На основе зависимостей между шириной пояса меандрирования и мощностью меандровой отмели рассчитаны прогнозные мощности песчаных тел: 6.4 – 16.6 м. Предложенный подход параметрического описания геологического события имеет важное значение не только для понимания его масштабов, но и возможности палеореконструкций. Численные характеристики, подтвержденные представительной выборкой по аналогам, позволяют более обоснованно использовать алгоритмы объектного моделирования и, как следствие, более уверенно оценивать ресурсный потенциал изучаемой территории.

Значения параметров палеорусел, полученные в результате проведенного исследования сопоставимы с современными аналогами, что в очередной раз подтверждает правомерность использования последних для общего анализа геологических процессов и явлений более ранних геологических периодов (кайнозойского). Выполненная типизация изучаемых рек понт-плиоценового возраста и известные эмпирические соотношения их морфологических параметров позволяют вполне реалистично оценить все задаваемые параметры для объектного геологического моделирования и спрогнозировать параметры перспективных литологических ловушек.

9. Разработан способ численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных. Способ относится к области углубленной геологической интерпретации сейсмических, патент находится в стадии оформления. Используя объектно-ориентированные интерпретационные подходы можно добиться детальной визуализации объекта,

но, зачастую, сейсмогеологические условия позволяют выявлять только отдельные фрагменты целостной системы. В связи с этим актуальным является методика реконструкции среды осадконакопления, в данном случае палеорусловой системы по численным параметрам морфологии ее элементов. Цель численной оценки – обеспечить качественный прогноз геометрических параметров предполагаемой залежи в пределах объекта, который проявляется в сейсмических данных фрагментарно в силу ограничения разрешающей способности геофизического метода; возможен выход на прогноз коллекторских свойств в совокупности с анализом обстановок седиментации и распространения фациальных зон.

Сущность подхода заключается в комплексировании объектно-ориентированной интерпретации и оценке параметров русловых палеопроцессов через аналогичные факторы и параметры их проявления в современных речных системах. Разработанный способ численной оценки морфометрических параметров русловых тел (палеоканалов) по результатам объектно-ориентированной интерпретации сейсмических данных прост в использовании, является эффективным и понятным для специалистов, реализация подхода возможно на базе любого специализированного программного обеспечения.

10. Затронут вопрос использования объектно-ориентированной интерпретации для кинематического анализа тектонических движений. Следует отметить, что для кинематического анализа можно использовать не только палеоканалы, но и любые другие целостные геологические объекты. Несмотря на то, что приведенные примеры носят локальный характер, и не являются основанием для далеко идущих выводов, обозначенные проблемы наглядно демонстрируют еще один практический аспект объектно-ориентированного подхода.

11. Объектно-ориентированный сейсмогеологический анализ в пределах локальной площади позволяет выполнять поэтапную реконструкцию унаследованных геологических событий. При оценке перспектив

нефтегазоносности крупных осадочных бассейнов палеогеографические реконструкции являются необходимым этапом исследований и фундаментальной основой для выделения и картирования потенциальных коллекторских толщ, пород флюидоупоров, материнских отложений. Идентификация геологического события является основанием не только для восстановления обстановки седиментации, но и для реконструкции истории геологического развития ближайшего пространственного окружения, в том числе, опосредованно, и для реконструкции тектонических процессов. В этой связи объектно-ориентированные интерпретационные подходы раскрываются еще с одной значимой практической стороны.

12. Примеры применения объектно-ориентированного анализа в процессе сейсмогеологического мониторинга разработки Приобского месторождения позволяют убедиться в эффективности разработанного методического подхода для разных регионов. Успешность эксплуатационного бурения на месторождении в настоящий момент составляет 98-99%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, В.П. О рамочных границах применения принципа актуализма в седиментологии / В.П.Алексеев, Э.О.Амон // Методологические проблемы литологических исследований в России: материалы 6-го Всероссийского литологического совещания. Казань. - 2011. - Том I. - С.25-28.
2. Алексин, А.Г. Поиски залежей нефти и газа в ловушках неантиклинального типа / А.Г.Алексин, В.Т.Хромов, Н.В.Мелик-Пашаева. - М.: Недра, 1985. - 200 с.
3. Барабошкин, Е.Ю. Практическая седиментология (терригенные коллектора) / Е.Ю.Барабошкин. - Томск: Томский политехнический университет, 2007. - 154 с.
4. Басов, И.А. Океанская и климатическая эволюция в миоцене / И.А.Басов // Природа. - 1999. - N 5. - С.19-24.
5. Белоусов, В.В. Геотектоника / В.В. Белоусов. - М.: МГУ, 1976. - 334 с.
6. Бижу-Дюваль, Б. Седиментационная геология / Б.Бижу-Дюваль. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. - 704 с.
7. Богатырев, И. Опробование технологии полно-азимутальной угловой миграции EarthStudy360® при исследовании донеогенового основания на одном из месторождений Республики Сербия / И.Богатырев, Д.Семинов, Т.Ольнева, А.Иноземцев // Технологии сейсморазведки. - 2017. - N 1. - С.63-71.
8. Бронгулеев, В.В. Современные движения земной коры, новейшая тектоника и физические поля Карпато-Балканского региона. Корреляционный анализ / В.В.Бронгулеев, А.Ф.Грачев, И.В.Калашникова, В.А.Магницкий // Физика Земли. - 1984. - N 7. - С.3-12.
9. Бурштейн, Л.М. Сырьевая база нефтяной и газовой промышленности Западной Сибири: прогноз невыявленных ресурсов, закономерности их локализации, вероятная структура, динамика выявления / Л.М.Бурштейн, В.Р.Лившиц, И.В.Жилина, Л.С.Грекова // Тезисы докладов научно-

практической конференции «Актуальные проблемы поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа». - М.: Изд-во ИГиРГИ, 2004. - С.89-90.

10. Буторин, А.В. Возможности использования результатов спектральной инверсии при интерпретации сейсмических данных / А.В.Буторин, Ф.В.Краснов // Геофизика. - 2017. - N 4. - С.2-8.

11. Буторин, А.В. Изучение спектральных характеристик волнового поля на примере модельных данных по результатам вейвлет-преобразования / А.В.Буторин // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.61-67.

12. Буторин, А.В. Сравнительный анализ методов спектральной инверсии волнового поля на примере модельных трасс / А.В.Буторин, Ф.В.Краснов // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.68-76.

13. Волков, В.А. К вопросу о механизме образования неокомских клиноформ Западной Сибири [Электронный ресурс] / В.А.Волков // Вестник недропользования Ханты-Мансийского автономного округа Югры. - 2013. - N 26. - С.15-21.

14. Воскресенский, Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов / Ю.Н. Воскресенский. - М.: РГУ нефти и газа, 2001. - 68 с.

15. Вранькович, А. Методические приемы изучения распределения аномалий волнового поля и их природы в интервале понт-плиоценовых отложений с целью повышения эффективности ГРП / А.Вранькович, Т.Ольнева, И.Дулич, К.Ежов, Я.Совиль, А.Родионов, О.Попов // Геофизика. - 2017. - N 4. - С.19-26.

16. Высоцкий, И.В. Нефтегазоносные бассейны зарубежных стран / И.В.Высоцкий, В.И.Высоцкий, В.Б.Оленин. - М.: Недра, 1990. - 405 с.

17. Гендельман, М.М. Исследование свободного меандрирования речных русел / М.М.Гендельман // Геоморфология. - 1988. - N 3. - С.38-45.

18. Геологический атлас Сербии. Масштаб 1:2000000 / составитель М.Д.Димитриевич. - Белград: Varex, 2002. - 77 с.

19. Геологические явления в сейсмических волновых полях и прогноз неантиклинальных ловушек. - М.: Центральная геофизическая экспедиция, 1991. - 257 с.
20. Гинтов, О.Б. Тектонофизический и палинспастический разрезы Украинских Карпат вдоль геотраверса DOBRE-3 (PANCAKE) / О.Б.Гинтов, И.Н.Бубняк, Ю.М.Вихоть, А.В.Муровская, М.В.Накапелюх, В.Е.Шлапинский // Геофизический журнал. - 2014. - N 3. - С.3-33.
21. Гладенков, Ю.Б. Современное состояние сейсмостратиграфии / Ю.Б.Гладенков, И.Я.Кунин, А.Е.Шлезнигер // Известия АН СССР. Серия геология. - 1984. - N 4. - С.54-62.
22. Глумов, И.Ф. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон. Часть 1 / И.Ф.Глумов, В.Л.Гулев, Б.В.Сенин, С.М.Карнаухов; под общ. ред. Б.В.Сенина. - Москва: Издательский дом Недра, 2014. - 279 с.
23. Гогоненков, Г.Н. Временные указания по методике поисков залежей нефти в ловушках неантиклинального типа / Г.Н.Гогоненков; под общ. ред. А.Г.Алексина, Г.Н. Гогоненкова. - Москва: ИГиРГИ, 1986. - 214 с.
24. Гогоненков, Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой / Г.Н.Гогоненков. - Москва: Недра, 1987. - 221 с.
25. Гольдин, С.В. Контактные изображения и сейсмовидение / С.В.Гольдин // Новосибирск: Тезисы докладов Международной конференции-школы по геометрии и анализу. - 2002. - С.12-13.
26. Гольдин, С.В. Теории интерпретации в сейсморазведке и сейсмологии / С.В.Гольдин. - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. - 357 с.
27. Гончаров, М.А. Введение в тектонофизику / М.А.Гончаров, В.Г.Талицкий, Н.С.Фролова. - М.: КДУ, 2005. - 496 с.
28. Грачев, А.Ф. О связи современных движений земной коры Паннонского бассейна с сейсмичностью / А.Ф.Грачев, В.А.Магницкий, И.В.Калашникова, И.Л.Лапушонок // Физика Земли. - 1989. - N 9. - С.3-8.

29. Грачев, А.Ф. Современные движения земной коры, новейшая тектоника и физические поля Карпато-Балканского региона / А.Ф.Грачев, В.А.Магницкий, И.В.Калашникова // Физика Земли. - 1987. - N 8. - С.3-20.
30. Гривко, И.Л. Алгоритмы безэталонной классификации и количественного прогноза / И.Л.Гривко, М.Б.Лурье // Геофизика. - 2004. - N 4. - С.28-31.
31. Гулари, Ф.Г. Строение и условия образования клиноформ неокомских отложений Западной Сибири (история становления представлений) / Ф.Г.Гулари. - Новосибирск: СНИИГГ и МС, 2003. - 140 с.
32. Деев, Е.В. Отражение быстрых геологических процессов в отложениях и текстурах (на примере разновозрастных комплексов Северной Евразии) / Е.В.Деев, И.Д.Зольников, В.Н.Староверов // Литосфера. - 2012. - N 6. - С.14-35.
33. Дулич, И. Формирование структурно-тектонического каркаса и сейсмофациальной основы для бассейнового моделирования на примере создания региональной модели Паннонского бассейна / И.Дулич, Г.Богичевич, А.Е.Родионов, Т.В.Ольнева // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.27-34.
34. Жемчугова, В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений / В.А.Жемчугова. - М.: ЕАГЕ, 2014. - 232 с.
35. Жильцова, Е.В. Сейсмофациальный анализ среднедевонских отложений южного склона Пугачевского свода / Е.В.Жильцова, А.Е.Артемьев // Приборы и системы разведочной геофизики. - 2014. - N 1. - С.99-110.
36. Закревский, К.Е. Геологическое 3D моделирование / К.Е.Закревский. - Москва: Маска, 2009. - 376 с.
37. Здоровенко, С.Л. Формирование рек с незавершенным меандрированием: морфология, геодинамика и геоэкология: диссертация ... кандидата географических наук: 25.00.36 / Здоровенко Светлана Леонидовна. - Санкт-Петербург, 2011. - 175 с.
38. Зоненшайн, Л.П. Исчезнувший океан Тетис / Л.П.Зоненшайн // История океана Тетис. Москва: ИОАН СССР. - 1987. - С.59-70.

39. Иноземцев А. Технология полноазимутальной угловой миграции и AVAZ инверсии и результаты ее применения в условиях ограничения параметров 3D сейсмической съемки [Электронный ресурс] / А.Иноземцев, Т.Ольнева, А.Сибирцев // Oil & Gas Journal Russia. - 2012. Режим доступа: <http://ogjrussia.com/issues/2012>.
40. Ионов, В.Ю. Оползни на Кавказском шельфе Черного моря и оценка их устойчивости / В.Ю.Ионов, Э.В.Калинин // Методологические проблемы литологических исследований в России: материалы 6-го Всероссийского литологического совещания (Казань, 26-30 сентября 2011 г.). - Казань: Казанский университет. - 2011. - Том I. - С.352-354.
41. Казанцев, Р.А. Гигантский оползень на дне Черного моря / Р.А.Казанцев, В.В.Кругляков // Природа. - 1998. - N 10. - С.86-87.
42. Кац, Я.Г. Основы линеаментной тектоники / Я.Г.Кац, А.И.Полетаев, Э.Ф.Румянцева. – М.: Недра, 1986. - 140 с.
43. Козлов, Е.А. Модели сред в разведочной сейсмологии / Е.А.Козлов. - Тверь: Издательство ГЕРС, 2006. - 480 с.
44. Колесов, В.В. От сейсмической трассы к параметрам пластов - какой путь выбрать? / В.В.Колесов, О.А.Смирнов, Г.А.Захаров, А.С.Недосекин, И.Л.Гривко // Сейсмические технологии. - 2006. - N 4. - С.64-68.
45. Конторович, А.Э. Западно-Сибирская провинция: состояние сырьевой базы, прогнозы развития нефте- и газодобычи, актуальные проблемы недропользования / А.Э.Конторович, А.М.Брехунцов, Л.М.Бурштейн, В.А.Каширцев, В.А.Конторович, А.Г.Коржубаев, А.Р.Курчиков // Тезисы докладов научно-практической конференции «Актуальные проблемы поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа». - М.: Изд-во ИГиРГИ, 2004. - С.11-17.
46. Костич, А. Генеративный углеводородный потенциал третичных отложений Банатской депрессии / А. Костич. - Белград, 2000. - 318 с.
47. Косыгин, Ю.А. Тектоника нефтеносных областей. Том 1 / Ю.А.Косыгин. - М.: Гостоптехиздат, 1958. - 513 с.

48. Крашенинников, Г.Ф. Учение о фациях / Г.Ф.Крашенинников. - М.: Высшая школа, 1971. - 368 с.
49. Кунин, Н.Я. Сейсмостратиграфия в решении проблем поиска и разведки месторождений нефти и газа / Н.Я.Кунин, Е.В.Кучерук: под общ. ред. Н.Я.Кунина, Г.Н. Гогоненкова. - М.: Мир, 1982. - С.19-22.
50. Кутас, Р.И. Модель глубинного строения и тектонического развития литосферы Западной Украины / Р.И.Кутас, С.С.Красовский, М.И.Орлюк, И.К.Пашкевич // Геофизический журнал Института геофизики НАН Украины. - 1996. - N 6. - С.18-30.
51. Кутас, Р.И. Тепловой поток и геотермические модели земной коры Украинских Карпат / Р.И.Кутас // Геофизический журнал Института геофизики НАН Украины. - 2014. - N 6. - С.3-27.
52. Левин, С.Ф. Геологическое моделирование сложнопостроенных сред в программном обеспечении Paradigm™ SKUA® / С.Ф.Левин, Т.В.Ольнева // Научные труды SOCAR. Азербайджан. - 2010. - N 3. - С.56-60.
53. Лисицин, А.П. Закономерности осадкообразования в областях быстрого и сверхбыстрого осадконакопления (лавинной седиментации) в связи с образованием нефти и газа в Мировом океане / А.П.Лисицин // Геология и геофизика. - 2009. - N 4. - С.373-400.
54. Лисицин, А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах / А.П.Лисицин. - М.: Наука, 1988. - 309 с.
55. Логинов, Д.В. Комплексный алгоритм устойчивой кластеризации многомерных данных / Д.В.Логинов, М.С.Белянушкина, Б.Е.Лухминский // Геофизика. - 2007. - N 4. - С.29-34.
56. Ломакин, И.Э. Планетарная линеаментная сеть и возможный механизм ее образования / И.Э.Ломакин, В.И.Анохин, И.В.Шураев // Сборник трудов конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». - 2016. - т.2. - С.514-521.

57. Лыскова, Е.Л. Скоростное строение верхней мантии в области зоны Вранча по данным шумовой поверхностно-шумовой томографии / Е.Л.Лыскова, Т.Б.Яновская // Ученые записки СПбГУ. - 2013. - N 446. - С.3-13.

58. Мазарович, А.О. Подводные оползни на континентальном склоне к западу от Шпицбергена. Экзогенные рельефообразующие процессы: результаты исследований в России и странах СНГ / А.О.Мазарович, Е.П.Мороз // Материалы XXXIV Пленума Геоморфологической комиссии РАН. - 2014. - С.1-5.

59. Малеванная, Е.А. Применение сейсмофациального анализа при изучении распределения коллекторов на примере месторождений Широного Приобья / Е.А.Малеванная, А.С.Финогенова // Нефтяное хозяйство. - 2011. - N 4 - С.33-35.

60. Малышева, С.В. Региональное моделирование бассейнов различных геодинамических типов в связи с прогнозом их нефтегазоносности : автореферат дис. ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.12 / Малышева Светлана Валентиновна. - Санкт-Петербург, 2015. - 26 с.

61. Малярова, Т.Н. «Методика изучения и прогноза коллекторских свойств резервуаров руслового генезиса по данным сейсморазведки 3D и ГИС в условиях Широного Приобья (пласт АС4)» / Т.Н.Малярова, С.Н.Птецов, Н.А.Иванова // Технологии сейсморазведки. - 2004. - N 2. - С.92-99.

62. Методические рекомендации по ведению сейсморазведочных работ с целью поиска и картирования органогенных построек и связанных с ними ловушек нефти и газа / Г.А.Габриэлянц, Э.Б.Мовшович, И.А.Мушин, Э.А.Таратын. - М.: Нефтегеофизика, 1985. - 131 с.

63. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов углеводородов в условиях карбонатных пород с пористостью трещинно-кавернового типа / под редакцией В.Б.Левянта - Москва: ЦГЭ, 2010. - 250 с.

64. Методические рекомендации по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и нефтегазовых месторождений (Часть 1. Геологические модели) - М.: ВНИИОЭНГ, 2003. - 164 с.
65. Милановский, Е.Е. Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса / Е.Е.Милановский, Н.В.Короновский. - М.: Недра, 1973. - 280 с.
66. Монастырева, Н.А. Крупные обвальнo-оползневые дислокации в неокомском клиноформном комплексе Западной Сибири / Н.А.Монастырева, Ю.В.Филиппович // Вестник недропользователя. - 2003. - N 11. - С.15-17.
67. Мунасыпов, Н.З. Компьютерное структурно-тектоническое моделирование в пакете Paradigm™ GeoSec® для контроля качества интерпретации сейсмических данных / Н.З.Мунасыпов, В.А.Балдин, В.В.Макаров, Т.В.Ольнева // Технологии сейсморазведки. - 2010. - N 2. - С.49-54.
68. Невеская, Л.А. История Паратетиса / Л.А.Невеская, А.А.Воронина, А.Л.Чепалыга // 27-й Международный геологический конгресс. Палеоокеанология. - М.: Наука, 1984. - Т.3. - С.91-101.
69. Нежданов, А.А. Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири / А.А.Нежданов, В.А.Пономарев, Н.А.Туренков, С.А.Горбунов. - М.: Издательство Академии Горных наук, 2000. - 247 с.
70. Нежданов, А.А. Сейсмогеологический анализ нефтегазоносных отложений Западной Сибири для целей прогноза и картирования неантиклинальных ловушек и залежей УВ: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук: 25.00.12 / Нежданов Алексей Алексеевич. - Тюмень, 2004. - 54 с.
71. Нефедкина, Т.В. Применимость линеаризованных аппроксимаций коэффициента отражения продольных волн для азимутального анализа амплитуд РР-отражений в анизотропных средах / Т.В.Нефедкина, П.А.Лыхин // Технологии сейсморазведки. - 2016. - N 4. - С.21-32.
72. Николаев, В.А. Методика геодинамического районирования на основе факторного и кластерного анализа: на примере Восточно-Европейской

платформы, Паннонского бассейна и Северной Евразии в целом: автореферат дис. ... д-ра геолого-минералогических наук: 25.00.03 / Николаев Всеволод Алексеевич. - Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. - Москва, 2005. - 37 с.

73. Никульников, А.Ю. Технология интерпретации результатов вейвлет-преобразования сейсмической записи: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.10 / Никульников Алексей Юрьевич. - Москва, 2012. - 27 с.

74. Обстановки осадконакопления и фации: в 2 т / под общ. ред. Х.Рединга. - М.: Мир, 1990. - 384 с.

75. Овечкина, В.Ю. Мониторинг сейсмогеологической модели 3D при эксплуатационном разбуривании месторождения / В.Ю.Овечкина, С.А.Зырянов Ю.В.Филиппович, А.В.Барышников // Нефтяное хозяйство. - 2009. - N 12. - С.19-21.

76. Овечкина, В.Ю. Сейсмогеологический мониторинг бурения. Примеры комплексного подхода к анализу данных для оптимизации разработки // В.Ю.Овечкина, Р.Р.Рафиков // Геофизика. - 2017. - N 4. - С.62-68.

77. Овечкина, В.Ю. Сейсмогеологический мониторинг: цели, задачи, решения // В.Ю.Овечкина, В.В.Каранов, Р.Р.Рафиков // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.35-41.

78. Овечкина, В. Ю. Сейсмические образы литологических ловушек на примере глубоководных конусов выноса / В.Ю.Овечкина, Т.В.Ольнева // Нефтяное хозяйство. - 2014. - N 12. - С.42-44.

79. Овечкина, В. Ю. Сейсмогеологический прогноз распространения коллектора для решения задач мониторинга эксплуатационного бурения / В.Ю.Овечкина, Т.В.Ольнева // Нефтяное хозяйство. - 2012. - N 6. - С.19-21.

80. Олейник, Е.В. Неокомские оползневые явления на Урьевской и Поточной площадях Среднего Приобья / Е.В.Олейник, Г.И.Плавник // Вестник недропользователя. - 2007. - N 17. - С.18-23.

81. Ольнева, Т.В. Восстановление серии унаследованных геологических событий приемами сейсмической стратиграфии и сейсмофациального анализа / Т.В.Ольнева // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.9-14.
82. Ольнева, Т.В. Интерпретация зон геодинамически напряженного состояния по данным сейсмических исследований / Т.В.Ольнева // Недра Поволжья и Прикаспия. - 2006. - Выпуск 45. - С.34-37.
83. Ольнева, Т.В. Комплексное изучение толщи неогеновых отложений Паннонского бассейна на основе сейсмостратиграфических подходов с элементами сейсмофациального анализа / Т.В.Ольнева, Е.А.Жуковская // Записки Горного института. - 2017. - т. 228. - С.631-640.
84. Ольнева, Т.В., Комплексная оценка напряженного состояния геологической среды / Т.В.Ольнева, К.А.Ежов // Недропользование XXI век. - 2017. - N 6. - С.48-51.
85. Ольнева, Т.В. Методы изучения карбонатных сред трещинно-кавернозного типа с примерами на реальных данных / Т.В.Ольнева // Збірник наукових праць УкрДГРІ. - 2010. - N 2-3. - С.289-291.
86. Ольнева, Т.В. Объектно-ориентированная корреляция как новый методический подход в процессе подготовки данных для сейсмофациального анализа / Т.В.Ольнева, В.Ю.Овечкина // Геофизика. - 2016. - N 4. - С.4-8.
87. Ольнева, Т.В. Опыт проведения экспертизы сейсмических данных, привлекаемых к подсчету запасов / Т.В.Ольнева, И.Ю.Хромова // Недропользование XXI век. - 2016. - N 3. - С.16-24.
88. Ольнева, Т.В. Оценка информативности векторных анизотропных карт на основе комплексирования сейсмических, скважинных и региональных данных / Т.В. Ольнева, Д.Г.Семин, И.Ю.Богатырев, К.А.Ежов, А.Н.Иноземцев // Геофизика. - 2017. - N 4. - С.53-61.
89. Ольнева, Т.В. Параметризация синусоидальности палеоканалов для фациальных реконструкций и объектного моделирования / Т.В.Ольнева, Е.А.Жуковская // Геофизика. - 2017. - N 4. - С.41-46.

90. Ольнева, Т. Революционный прорыв в области геологического моделирования – отказ от «пиллар-технологий» в программном приложении SKUA / Т.Ольнева // Сборник тезисов научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений». - Уфа. - 2008. - С.29.

91. Ольнева, Т.В. Роль структурно-тектонического анализа в построении концептуальной геологической модели / Т.В.Ольнева // Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений. Сборник тезисов. - Уфа. - 2008. - С.36.

92. Ольнева, Т.В. Роль трендов в процессе геологического моделирования / Т.В.Ольнева // Математическое моделирование и компьютерные технологии в разработке месторождений. Сборник тезисов. - Уфа. - 2008. - С.30-31.

93. Ольнева, Т.В. Сейсмофациальный анализ. Образы геологических процессов и явлений в сейсмическом изображении / Т.В.Ольнева. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. - 152 с.

94. Ольнева, Т.В. Сейсмвидение геологических процессов и явлений: конусы выноса / Т.В.Ольнева, В.Ю.Овечкина, В.В.Каранов // Геофизика. - 2015. - N 6. - С.8-13.

95. Ольнева, Т.В. Сейсмвидение геологических процессов и явлений: оползни / Т.В.Ольнева, В.Ю.Овечкина // Геофизика. - 2015. - N 4. - С.20-26.

96. Ольнева, Т.В. Сейсмвидение геологических процессов и явлений: русловые отложения континентальных обстановок осадконакопления / Т.В.Ольнева, Е.А.Жуковская // Геофизика. - 2016. - N 2. - С.2-9.

97. Ольнева, Т.В. Сейсмостратиграфический комплекс нижнемиоценовых отложений Паннонского бассейна [Электронный ресурс] / Т.В.Ольнева // Конференция «Геомодель». Тезисы. - 2016. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=86817>.

98. Ольнева, Т.В. Сейсмостратиграфический комплекс среднемиоценовых отложений Паннонского бассейна [Электронный ресурс] / Т.В.Ольнева,

Е.А.Жуковская // Конференция «Геомодель». Тезисы. - 2017. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=90843>.

99. Ольнева, Т.В. Современные технологии изучения тектонического строения геологической среды / Т.В.Ольнева // Збірник наукових праць УкрДГРІ. - 2011. - N 4. - С.148-151.

100. Палеогеография и биогеография бассейнов Паратетиса. Часть I. Поздний эоцен - ранний миоцен / С.В.Попов, М.А.Ахметьев, А.В.Лопатин, Э.М.Бугрова, Е.К.Сычевская, И.Г.Щерба, А.С.Андреева-Григорович, Н.И.Запорожец, И.А.Николаева, М.Л.Копп. - М.: Научный мир, 2009. - 194 с.

101. Парасына, В.С. Применение сейсморазведки при поисках рифовых ловушек в Тимано-Печорской провинции / В.С.Парасына, А.В.Соломатин. - М.: ВИЭМС, 1987. - 54 с.

102. Парасына, В.С. Прогнозирование карбонатных коллекторов по данным сейсморазведки / В.С.Парасына, Ж.П.Попов, С.Л.Федотов. - М.: ВИЭМС, 1989. - 75 с.

103. Позаментьер, Г. Секвенная стратиграфия терригенных отложений. Основные принципы и применение / Г. Позаментьер, Дж.П.Аллен. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. - 436 с.

104. Поливахо, А. Комплексный подход к управлению разработкой нетрадиционного трещиноватого резервуара на примере нефтяного месторождения Паннонского бассейна [Электронный ресурс] / М.Драгосавац, К.Ежов, Е.Харыба, И.Богатырев, Л.Стулов, Т.Ольнева // SPE-187779-RU. - 2017. - Режим доступа: https://www.onepetro.org/search?q=Olneva&peer_reviewed=&published_between=&from_year=&to_year=.

105. Попов, А.Ю. Определение поисковых критериев для проведения геолого-разведочных работ в регионе на основании комплексного изучения месторождения-спутника (регион Северный Банат, республика Сербия) / А.Попов, А.Родионов, Е.Милей, И.Богатырев, А.Гогич, Б.Вучкович, Т.Ольнева // Нефтяное хозяйство. - 2016. - N 1. - С.24-27.

106. Приезжев, И.И. Методика сейсмической инверсии с помощью генетического алгоритма с последующим использованием результатов инверсии при моделировании коллекторских свойств резервуара / И.И.Приезжев, Л.Е.Шмарьян, Е.В.Солоха, // Технологии сейсморазведки. - 2009. - N 2. - С.18-23.

107. Приезжев, И.И. Фациальный анализ по форме сигнала / И.И.Приезжев, Е.В.Солоха, С.Манрал // Геофизика. - 2014. - N 1. - С.63-67.

108. Прошач, Р. Тектоно-осадочные особенности в трехмерных сейсмических данных по Моравской части Венского бассейна / Р.Прошач, М.Перезлений, Б.Сопкова // First Break. - 2012. - том 30, апрель. - С.1-12.

109. Птецов, С.Н. Зоны карста в рифовых системах и их проявление в материалах 3D сейсморазведки, ГИС и бурения [Электронный ресурс] / С.Н.Птецов, Б.П.Богданов, С.Э.Терентьев // Конференция ЕАГО. - Геокрым 2016. - Тезисы. Режим доступа: <http://mooeago.ru/course/view.php?id=10>.

110. Пухарев, В. Применение классификационных алгоритмов при седиментологическом моделировании / В.Пухарев, Е.Потапова, О.Малиновская // Oil&Gas Journal Russia. - 2012. - N 1. - С.55-59.

111. Сапрыкин, Э.В. Сейсмостратиграфический и сейсмофациальный анализ подсолевых отложений Астраханского свода / Э.В.Сапрыкин, Т.В.Ольнева // Недра Поволжья и Прикаспия. - 2004. - Выпуск 38. - С.50-54.

112. Сафонов, А.С., Поиск неантиклинальных ловушек углеводородов методами сейсморазведки / А.С.Сафонов, О.О.Кондратьева, О.В.Федотова. - М.: Научный мир, 2011. - 512 с.

113. Семин, Д.Г. Получение качественного сейсмического изображения в интервале разреза, соответствующем донеогеновому основанию (фундаменту) в пределах разрабатываемого нефтяного месторождения [Электронный ресурс] / Д.Г.Семин, И.Ю.Богатырев, Т.В.Ольнева, А.Н.Иноземцев // тезисы EAGE. Тюмень - 2017. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=87718>.

114. Сейсмическая стратиграфия / Р.Е.Шерифф, А.П.Грегори, П.Р.Вейл, Р.М.Митчем мл. и др. - М.: Мир, 1982. - 846 с.
115. Сейсмостратиграфические исследования в СССР: сборник статей. - М.: Наука, 1990. - 182 с.
116. Смирнов, К. Как извлечь выгоду из неопределенности. Вероятностные подходы при оценке качества данных геолого-геофизических исследований / К.Смирнов, Т.Ольнева, Т.Малярова // Нефтесервис. - 2008. - N 1. - С.48-51.
117. Смирнов, К. Уникальные решения компании Paradigm для построения высокоточных моделей среды / К.Смирнов, Т.Малярова, Т.Ольнева // Oil&GasEURASIA. - 2008. - N 2. - С.36-37.
118. Смищенко, Д.В. Оценка современного гидроморфологического состояния малых рек по материалам космических съемок. / Д.В.Смищенко, Б.Ф.Смищенко // В сб.: Современное состояние малых рек СССР и пути их использования, сохранения и восстановления. Секция русловых процессов ГКНТ. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - С.85-95.
119. Соломатин, А.В. Верхнедевонские барьерные рифы Тимано-Печорской провинции и методы их поисков / А.В.Соломатин, Н.Д.Матвиевская, Б.Я.Вассерман // Труды ВНИГНИ. - 1976. - Выпуск 194. - С.140-150.
120. Сомов, В.И. Современные движения земной коры Карпато-Балканского региона и сопредельных структур / В.И.Сомов, И.Ш.Рахимова. - Киев: Наука Думка, 1983. - 144 с.
121. Сподобаев, А.А. Сейсмические образы седиментационных объектов неокома на одном из месторождений севера Западной Сибири / А.А.Сподобаев, Е.К.Королев // Геофизика. - 2015. - N 6. - С.14-19.
122. Строение земной коры Центральной и юго-восточной Европы по данным взрывной сейсмологии /под ред. В.Б.Соллогуб, Д.Просен, Г.Милицер. - Киев: Наукова думка, 1971. - 288 с.
123. Сынгаевский, П.В. Глубоководные конусы выноса и турбидиты / П.В.Сынгаевский, С.Ф.Хафизов, В.В.Шиманский. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. - 480 с.

124. Усачев, В.Ф. Оценка динамики озерных льдов, снежного покрова и речных разливов дистанционными средствами / В.Ф.Усачев, В.Г.Прокачева, В.В.Бородулин. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 103 с.

125. Устинова, В.Н. Сейсмофациальные модели продуктивных отложений юры Песцового месторождения [Электронный ресурс] / В.Н.Устинова, Н.Н.Стариков // Известия Томского политехнического университета. - 2013. Режим доступа: <https://vdocuments.mx/documents/-5750a9c31a28abcf0cd2bebd.html>.

126. Ухлова, Г.Д. Сейсмофациальный анализ и возможности прогнозирования литотипов пород по данным сейсморазведки / Г.Д.Ухлова, В.В.Соломатин, Л.И.Штифанова, Т.И.Чернышова // VII Всероссийское литологическое совещание. - 2013. - Том 3. - С.227-230.

127. Фенин, Г.И. Аномальные пластовые давления в зонах углеводородонакопления нефтегазоносных бассейнов [Электронный ресурс] / Г.И.Фенин / Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2010. - N 4. Режим доступа: <http://www.ngtp.ru>

128. Фомичев, А.С. Глубина и биопродуктивность баженковского моря / А.С.Фомичев // Горные ведомости. - 2006. - N 5. - С.20-25.

129. Хаин, В.Е. Геотектоника с основами геодинамики: учебник / В.Е.Хаин, М.Г.Ломизе. - М.: Изд-во МГУ, 1995. - 480 с.

130. Хаин, В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс / В.Е.Хаин. - М.: Недра, 1984. - 344 с.

131. Хилтерман, Ф.Дж. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке / Ф.Дж.Хилтерман. - Тверь: ГЕРС, 2010. - 256 с.

132. Хорварт, Ф. Геотермия Венгрии и тектонофизика "красного пятна" Паннонской впадины / Ф.Хорварт, Л.Бадри, П.Оттлик; под редакцией В.Чермак, Л.Рибак // Тепловое поле Европы. - М.: Мир, 1982. - С.176-190.

133. Хромых, В.В. Морфометрический анализ долинных геосистем Нижнего Притомья [Электронный ресурс] / В.В.Хромых, О.В.Хромых // Томский государственный университет, кафедра Географии. - 2008. Режим

доступа:

[https://www.esri-](https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1162&SECTION_ID=34)

[cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1162&SECTION_ID=34.](https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1162&SECTION_ID=34)

134. Хромых, В.В. Морфометрический анализ долины Томи на основе ArcGIS 3D Analyst и Spatial Analyst [Электронный ресурс] / В.В.Хромых, О.В.Хромых // Материалы XII международной конференции пользователей программных продуктов ESRI и Leica Geosystems в России и странах СНГ. - М., 2006. - 1 электрон, опт. диск (CD-ROM).

135. Хуторской, М.Д. Геотермические модели геодинамических обстановок разного типа / М.Д.Хуторской, Б.Г.Поляк // Тектоника. - 2014. - N 1. - С.77-96.

136. Чалов, Р.С. Речные излуины / Р.С.Чалов, А.С.Завадский, А.В.Панин; под общей редакцией Р.С.Чалова. - М.: изд-во МГУ, 2004. - 371 с.

137. Чернова, О.С. Седиментология резервуара / О.С.Чернова. - Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 2004. - 455 с.

138. Чичинина, Т.И. Амплитудный анализ отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах при разведке нефтегазовых резервуаров / Т.И.Чичинина, В.И.Сабинин, В.И.Корсунов, Х.Ронкийо-Харийо // Сейсмические исследования земной коры: сборник докладов международной научной конференции, посвященной 90-летию академика Н.Н.Пузырева. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. - С.196-202.

139. Шиманский, В.В. Закономерности формирования неструктурных ловушек и прогноз зон нефтегазонакопления в юрских и нижнемеловых отложениях Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Шиманский Владимир Валентинович. - Санкт-Петербург, 2003. - 277 с.

140. Шимкус, К.М. Процессы осадконакопления в Средиземном и Черном морях в позднем кайнозое / К.М.Шимкус. - М.: Научный мир, 2005. - 280 с.

141. Шлезингер, А.Е. Региональная сейсмостратиграфия / А.Е.Шлезингер. - М.: Научный мир, 1998. - 138 с.

142. Щукин, И.С. Общая геоморфология для университетов: учебник / И.С.Щукин. - М.: Изд-во МГУ, 1960. - 615 с.

143. Aksin, V. *Geologija Nafta* / V.Aksin. - Novi Sad, 1967. - 800 p.
144. Allen, J.R.L. *Sediments of the modern Niger delta: a summary and review* / J.R.L.Allen // Morgan, J.P. (Ed.) *Deltaic sedimentation (Modern and ancient)*. Society of Economic Paleontologist and Mineralogist. - 1970. - v.15. - P.138-151.
145. *An Eastern Alpine Geology Transect: field trip*. - The Netherlands: EAGE Conferences B.V., 2016. - 21 p.
146. Bada, G. *Subsidence, burial, thermal and maturation history in the Mako Trough: a basin modeling study* / Dr. Gabor Bada, Dr. Péter Dövényi // Report for TXM Oil and Gas Exploration Ltd. SENZUS Consulting Services Ltd. – Budapest, 2008. - 115 p.
147. Badics, B. *Basin-centred gas in the Makó Trough, Hungary: a 3D basin and petroleum system modelling investigation* /B.Badics, A.Uhrin, I.Veto, A.Bartha, C.Sajgó // *Petroleum Geoscience*. - 2011. - v.17. - P.405-416.
148. Balázs, A. *The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin* / A.Balázs, L.Matenco, I.Magyar, F.Horváth, S.Cloetingh // *Tectonics*. - 2016. – v.35. - P.1526-1559.
149. Baldi, K. *Badenian (Middle Miocene) basin development in SW Hungary: subsidence history based on quantitative paleobathymetry of foraminifera* / L.Benkovics, O.Sztano // *Int.J. Earth Sci*. - 2002. - v.91. - P.490-504.
150. Belde, J. *Three-dimensional seismic analysis of sediment waves and related geomorphological features on a carbonate shelf exposed to large amplitude internal waves* / J.Belde, S.Back, L.Reuning // *Browse Basin region, Australia. Sedimentology*. - 2015. - v.62. - P.87-109.
151. Borgh, M. *Constraining forcing factors and relative sea-level fluctuations in semi-enclosed basins: the Late Neogene demise of Lake Pannon* // M. ter Borgh, D.Radivojević, L.Matenco // *Basin Research*. - 2015. - v.27. - P.681-695.
152. Catuneau, O. *Principles of sequence stratigraphy*. Department of Earth and Atmospheric and Sciences / O.Catuneau. - Canada: Elsevier, University of Alberta, 2006. - 662 p.

153. Catuneau, O. A sequence stratigraphy model for the Upper Miocene – Pliocene basin fill of the Pannonian Basin, eastern Hungary / O.Catuneau, D.Granjeon // *Marin and Petroleum Geology*. - 2015. - v.66. - P.117-134.
154. Collinson, J.D. Vertical sequence and sand body shape in alluvial sequences / J.D.Collinson // *Fluvial Sedimentology* (Ed. by A.D.Miall). - Calgary, 1978. - P.577-586.
155. Cover, M.P. Classification of rifted sedimentary basins of the Pannonian Basin System according to the structural genesis, evolutionary history and hydrocarbon maturation zones / M.P.Cover, H.Doust, J.D.v.Wees, G.Bada, S.Cloetingh // *Marin and Petroleum Geology*. - 2009. - P.1-13.
156. Ćorić, S. Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys) / S.Ćorić, D.Pavelić, F.Rögl, O.Mandic, S.Vrabac, R.Avanić, L.Jerković, A.Vranjković // *Geologia Croatica*. - 2009. - v.62/1. - P.31-43.
157. Dercourt, J. Geological evolution of the Tethis belt from Atlantic to the Pamirs since the Lias / J.Dercourt, L.P.Zonenshain, L.E.Ricou // *Tectonophysics*. - 1986. - v.123. - P.241-315.
158. Deutsch, C.V. FLUVSIM: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems / C.V.Deutsch, T.T.Tran // *Computers & Geosciences*. - 2002. - v.28. - P.525-535.
159. Deutsch, C.V. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs / C.V.Deutsch, L.Wang // *Mathematical Geology*. - 1996. - v.28. - P.857-880.
160. Dombrádi, E. Modelling recent deformation of the Pannonian lithosphere: Lithospheric folding and tectonic topography / E.Dombrádi, D.Sokoutis, G.Bada, S.Cloetingh, F.Horváth // *Tectonophysics*. - 2010. - v.484. - P.103-118.
161. Doyen, P.M. Seismic Reservoir Characterization an Earth Modelling Perspective / P.M.Doyen. - The Netherlands: EAGE publication, 2007. - 255 p.
162. Dulić, I. Preliminary study of Miocene-Pliocene progradational series from south-eastern part of Pannonian Basin / I.Dulić, A.Vranjković, G.Bogićević,

M.Pađen, M.Galamboš // Book of Abstracts 5th Croatian Geological Congress. - 2015. - P.60-61.

163. Excursion Guide-book of Croatian Geological Congress: Osijek 23-25.09.2015 / Editors: M.Horvat, L.Galović. - Zagreb, 2015. - 156 p.

164. Ezhov, K. Application of special well logging techniques for geomechanical model improvement in naturally fractured reservoirs [Электронный ресурс] / K.Ezhov, A.Arsibekov, N.Dubinya // SPE. - 2017. Режим доступа: https://www.onepetro.org/search?q=164.%09Ezhov%2C+K.+Application+of+special+well+logging+techniques+for+geomechanical+model+improvement+in+naturally+fractured+reservoirs+&peer_reviewed=&published_between=&from_year=&to_year=&rows=25.

165. Ezhov, K. An Integrated Approach for Unconventional Fractured Reservoir Modeling in Metamorphic Basement [Электронный ресурс] / K.Ezhov, E.Kharyba, I.Bogatyrev, T.Olneva, M.Dragosavac // 80th EAGE Conference and Exhibition. Copenhagen. Abstract. - 2018. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=92688>.

166. Field Trip Guide in the Framework of the XVI Serbian Congress: Donij Milanovac 22-25 May, 2014 / Editor D.Milovanović. - Belgrad: The Serbian Geological Society, 2014. - 50 p.

167. Filippovich, Y. Special aspects of seismic facies analysis in clinoform's complex / Y.Filippovich, O.Zaharova, V.Ananiev, T.Olneva // Proceeding of the XVI SERBIAN GEOLOGICAL CONGRESS. - 2014. - P.641-642.

168. Fodor, L. An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin / L.Fodor, G.Bada, G.Csillag, E.Horvath, Z.Ruszkiczay-Rudiger, K.Palotas, F.Sikhegyi, G.Timar, S.Cloetingh, F.Horvath // Tectonophysics. - 2005. - v.410. - P.15-41.

169. Haas, J. Geology of Hungary / J.Haas. - Berlin: Springer-Verlag, 2012. - 244 p.

170. Horvath, F. Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources / F.Horvath, B.Musitz, A.Balász, A.Végh, A.Uhrin, A.Nádor, B.Koroknai, N.Pap, T.Tóth, G.Warum // *Geothermics*. - 2015. - N 53. - P.328-352.
171. Horvath, F. Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin / F.Horvath // *Tectonophysics*. - 1993. - v.226. - P.333-357.
172. Horvath, F. IBS Pannonian Basin Project: a review of the main results and their bearings on hydrocarbon exploration. In: *The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine Orogen* / F.Horvath, G.Tary // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* - 1999. - v.156. - P.195-213.
173. Horvath, F. The Pannonian basin: a Mediterranean interarc basin / F.Horvath, L.Stegena // *Proc. Int. Symposium of the Structural History of the Mediterranean basins*. - 1977. - P.333-340.
174. Horvath, F. Structural and thermal evolution of the Pannonian basin: an overview Burrus J. Ed. *Thermal modelling in sedimentary basins* / F.Horvath, A.Szalay, P.Dovenyi, J.Rumpler // *Technip*. - Paris, 1986. - P.339-358.
175. Huismans, R.S. The Pannonian basin: Dynamic modeling of the transition from passive to active rifting / R.S.Huismans, Y.Y.Podladchikov, S.Cloetingh // *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*. - 2002. - N 3. - P.41-63.
176. Jarosinski, M. Mechanics of basin inversion: Finite element modeling of the Pannonian Basin System [Электронный ресурс] / M.Jarosinski, F.Beekman, L.Matenco, S.Cloetingh // *Tectonophysics*. - 2009. - 25 p. - journal homepage: www.elsevier.com/locate/tecto.
177. Jelenković, R. Mineral resources of Serbia / R.Jelenković, A.Kostić, D.Životić, M.Ercegovac // *Geologica Carpathica*. - 2008. - v.59. - N 4. - P.345-361.
178. Jovanovich, R. Sedimentology, petrography, tectogenesis and lithostratigraphy of reservoir rocks of petroleum deposit "Pz+Sm" Kikinda-Varoch / R.Jovanovich. - Novi Sad: DIT-Naftagas, 2011. - 122 p.
179. Juhasz, G. Tectonic vs. climatic control in the evolution of fluvio-deltaic systems in a lake basin, Eastern Pannonian Basin / G.Juhasz, G.Pogacsas, I.Magyar, G.Vakarcs // *Sedimentary Geology*. - 2007. - v.202. - P.72-95.

180. Kázmér, M., Birth, life, and death of the Pannonian Lake / M. Kázmér // *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*. - 1990. - v.79 (1-2). - P.171-188.
181. Klein, P. Innovative hybrid algorithm designed to enhance seismic characterization / P.Klein, A.Peloso // *First break*. - 1990. - v.24. - P.97-100.
182. Koren, Z. Full-azimuth Subsurface Angle Domain Wavefield Decomposition and Imaging / Z.Koren, I.Ravve // *Geophysics*. - 2011. - v.76. - N 1. - P1-13.
183. Koren, Z. System and method for full azimuth angle domain imaging in reduced dimensional coordinate systems / Z.Koren, I.Ravve // *Patent: US 20080109168 A1, 05/18/2007*.
184. Kovać, M. Badenian evolution of the Central Paratethys Sea: paleogeography, climat and eustatic sea-level changes / M.Kovać // *Geologica Carpathica*. - 2007. - December. - P.579-606.
185. Kovačić, M. Lacustrine basin to delta evolution in the Zagorje Basin, a Pannonian sub-basin (Late Miocene: Pontian, NW Croatia) / M.Kovačić, J.Županić, Lj.Babić, D.Vrsaljko, M.Miknić, K.Bakrać, I.Hećimović, R.Avanić, M.Brkić // *Facies*. - 2004. - 50/1. - P.19-33.
186. Kukavica, J. Seismic facies analysis of Pliocene fluvial channels: approaches and results / J.Kukavica, J.Tanasković, T.Olneva // *Abstracts book of 5th Croatian Geological Congress*. - 2015. - P.145-146.
187. Lenkey, L. Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics / L.Lenkey, P.Dovenyi, F.Horvath, S.Cloetingh // *GU Stephan Mueller Special Publication Series*. - 2002. - 3. - P.29-40.
188. Leever, K. The evolution of the Danube gateway between Central and Eastern Paratethys (SE Europe): Insight from numerical modelling of the causes and effects of connectivity between basins and its expression in the sedimentary record / K.Leever, L.Matenco, D.Garcia-Castellanos, S.Cloetingh // *Tectonophysics*. - 2011. - 502 (1-2). - P.175-195.

189. Linari, V. Seismic facies analysis based on 3D multiattribute volume classification, La Palma Field, Maracaibo, Venezuela / V.Linari, M.Santiago, C.Pastore, K.Azbel, M.Poupon // *The Leading Edge*. - 2003. - P.32-36.
190. Martins-Neto, M.A. Rift sequence stratigraphy / M.A.Martins-Neto, O.Catuneanu // *Marine and Petroleum Geology*. - 2010. - 27. - P.247-253.
191. Matenco, L. On the formation and evolution of the Pannonian Basin: Constraints derived from the structure of the junction area between the Carpathians and Dinarides / L.Matenco, D.Radivojević // *Tectonics*. - 2012. - v.31. - P.31.
192. Magyar, I. Progradation of the paleo-Danube shelf-margin progradation across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene / I.Magyar, D.Radivojević, O.Sztanó, R.Synak, K.Ujszászi, M.Pócsik // *Global and Planetary Change*. - 2013. - 103. - P.168-173.
193. Mandic, O. Paleogeographic evolution of the Southern Pannonian Basin: 40Ar/39Ar age constraints on the Miocene continental series of Northern Croatia / O.Mandic, A. de Leeuw, J.Bulić, K.F.Kuiper, W.Krijgsman, Z.Jurišić-Polšak // *International Journal of Earth Sciences*. - 2012. - 101. - P.1033-1046.
194. Mandic, O. Stratigraphic and palaeogeographic significance of lacustrine molluscs from Pliocene *Viviparus* beds in central Croatia / O.Mandic, T.Kurečić, T.A.Neubauer, M.Harzhauser // *Geologia Croatica*. - 2015. - 68. - P.179-207.
195. Marović, M. Neotectonics and seismicity of the southern margin of the Pannonian basin in Serbia / M.Marović, I.Djoković, L.Pešić, S.Radovanović, M.Toljić, N.Gerzina // *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*. - 2002. - 3. - P.277-295.
196. Marroquin, I.D. Automated seismic facies for data integration: an example from Fort Worth Basin, Texas (USA) / I.D.Marroquin // *First break*. - 2015. - v.33. - P.51-62.
197. Mavko, G. *The Rock Physics Handbook* / G.Mavko, T.Mukerji, J.Dvorkin. - Cambridge, 2009. - 375 p.
198. Miall, A.D. *Analysis of fluvial depositional systems* / Andrew D. Miall. - American Association of Petroleum Geologists, 1982. - 75 p.

199. Miall, A.D. Fluvial Depositional Systems / Andrew D. Miall. - Switzerland: Springer International Publishing, 2014. - 504 p.
200. Mitchum, R.M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy / R.M.Mitchum // in C.E. Payton (Ed.). Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir. - 1977. - Vol.26. - P.205-212.
201. Olneva, T. Reservoir Modelling of Paleochannels Based on Seismic Trend [Электронный ресурс] / T.Olneva, E.Milei // Second Conference on Forward Modelling of Sedimentary Systems. EAGE. Norway. Abstract. - 2016. - Режим доступа:
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=84366>.
202. Olneva, T. Innovative approaches to seismic data interpretation: building reliable depositional models of fluvial systems [Электронный ресурс] / T.Olneva, E.Zhukovskaya // Abstract for EAGE conference. - Wien. - 2016. - Режим доступа:
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=85126>.
203. Olneva, T. Object-oriented geoseismic analysis: ways and examples / T.Olneva, V.Ovechkina, E.Zhukovskaya // XVII SERBIAN GEOLOGICAL CONGRESS. Book of Abstracts. - 2018. - P.707-713.
204. Olneva, T. Seismic interpretation approaches for searching new objects-satellites on the periphery of the existing oil-gas fields / T.Olneva, J.Sovilj // Abstracts book of 5th Croatian Geological Congress, 2015. - P.200-201.
205. Olneva, T. Experience in application of the conceptual models of the field developed by the company Gazprom Neft / T.Olneva, D.Aleksandrov, D.Kuzmin, S.Redina // Abstracts book of 5th Croatian Geological Congress, 2015. - P.196-197.
206. Olneva, T. Interpretation of southern margin of the Drmlyansko Depression regarding of oil & gas potential (South Serbia) / T.Olneva, D.Kuzmin // Abstracts book of 5th Croatian Geological Congress, 2015. - P.198-199.
207. Pannonian Basin Province, Central Europe (Province 4808) in Petroleum Geology, Total Petroleum Systems, and Petroleum Resource Assessment: by Gordon L. Dolton. -, Virginia: Reston, U.S. Geological Survey. - 2006. - 47 p.

208. Partyka, G. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization / G.Partyka, J.Gridley, J.Lopez // *The Leading Edge*. - 1999. - v.18. - P.353-360.
209. Pavelić, D. Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System / D.Pavelić // *Basin Research*. - 2001. - N 12. - P.359-376.
210. Pigott, J.D. Seismic Stratigraphy Based Chronostratigraphy (SSBC) of the Serbian Banat Region of the Pannonian Basin / J.D.Pigott, D.Radivojević // *Central European Journal of Geosciences*. - 2010. - N 2 (4). - P.481-500.
211. Poupon, M. Finding channel sands with seismic facies analysis and lithoseismic modeling / M.Poupon, K.Azbel, G.Palmer // *Offshore Magazine*. - 1999. - P.1-8.
212. Radivojević, D. Geology of the Čoka structure in northern Banat (Central Paratethys, Serbia) / D.Radivojević, L.Rundić, S.Knezević // *Geologica Carpathica*. - 2010. - August. - P.341-352.
213. Redina, S. Seismogeological model of the SG-1 layer Jurassic formation made by integration seismic, core and geophysical data of upper Jurassic formation in Tazo-Hettskoj seismofacies area of West Siberia / S.Redina, T.Olneva, K.Zverev, E.Zhukovskaya // *XVII Serbian Geological Congress. Book of Abstracts*. - 2018. - P.718-722.
214. Richards, M. Submarine-fan systems I: characterization and stratigraphic prediction / M.Richards, M.Bowman, H.Reading // *Marine and Petroleum Geology*. - 1998. - v.15. - P.689-717.
215. Rosgen, D.L. A classification of natural rivers/ D.L.Rosgen // *Catena*. - 1994. - v.22. - P.169-199.
216. Royden, L. Evolution of the Pannonian basin system / L.Royden, F.Horvath, J.Rumpler // *Tectonics*. - 1983. - v.2. - P.63-90.
217. Royden, L.H. Late Cenozoic tectonics of the Pannonian basin system. In: Royden, L.H. & Horváth, F. *The Pannonian basin, a study in basin evolution* // *American Association of Petroleum Geologists. Memoirs*. - 1988. - 45. - P.27-48.

218. Russell, B. Combining geostatistic sand multiattribute transforms – A channel sand case study [Электронный ресурс] / B.Russell, T.Todorov, D.Hampson // SEG International and Exposition and 71st Annual Meeting. Expanded Abstracts. - 2001. Режим доступа: https://www.onepetro.org/conference-paper/SEG-2001-0638?sort=&start=0&q=Combining+geostatistic+sand+multiattribute+transforms+%E2%80%93+A+channel+sand+case+study+&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_year=&rows=25#.
219. Rust, B.R. A classification of alluvial channel systems / B.R. Rust in: Miall, A.D. Fluvial Sedimentology // Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary. - 1978. - P.187-198.
220. Saftić, B. Tertiary Subsurface Facies, Source Rocks and Hydrocarbon Reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary) / B.Saftić, J.Velić, O.Sztano, G.Juhász, Z.Ivković // Geologia Croatica. - 2003. – v.56 (1). - P.101-122.
221. Schmid, S. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units / S.Schmid, D.Bernoulli, B.Fugenschuh, L.Matenco, S.Schefer, R.Schuster, M.Tischler, K.Ustaszewski // Swiss Journal of Geosciences. - 2008. – v.101. - P.139-183.
222. Shanmugam, G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s -1990s): deep-water processes and facies models - a critical perspective / G.Shanmugam // Marine and Petroleum Geology. - 2000. – v.17. - P.174-231.
223. Sloss, L.L. Integrated facies analysis / L.L.Sloss, W.C.Krumbein, E.C.Dapples // Longwell C.R. (Ed.). Sedimentary Facies in Geologic History. Geological Society of America Memoir. - 1949. - v.39. - P.91-124.
224. Stampfli, G. Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions / G.Stampfli, G.Borel, R.Marchant, J.Mosar in: Rosenbaum, G., Lister, G. Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan orogeny // Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition. - 2002. - v.8. - P.1441-8142.
225. Sztanó, O. Aggradation and progradation controlled clinothems and deep-water sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian

Basin, SE Hungary / O.Sztanó, P.Szafián, I.Magyar, A.Horányi, G.Bada, D.Hughes, D.Hoyer, R.Wallis // *Global and Planetary Change*. - 2013. - v.103. - P.149-167.

226. Tyler, N. Architectural controls on the recovery of hydrocarbons from sandstone reservoir / N.Tyler, R.J.Finley in: Miall, A.D. & Tyler, N. *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery // SEPM Concept in Sedimentology and Paleontology*. - Tulsa, 1991. - v.3. - P.1-5.

227. Toth, J. Interpretation of observed fluid potential patterns in a deep sedimentary basin under tectonic compression: Hungarian Great Plain, Pannonian Basin / J.Toth, I.Almasi // *Geofluids*. - 2001. - N 1. - P.11-36.

228. Uhrin, A. Reconstruction of Pliocene fluvial channels feeding Lake Pannon / A.Uhrin, O.Sztano // *Geologica Carpathica*. - 2007. - v.53(3). - P.291-300.

229. Vranjković, A. Seismo-sedimentological characterization of Pannonian Basin Late Miocene succession (Vojvodina, northern Serbia) [Электронный ресурс] / A.Vranjkovic, I.Dulic, T.Olneva, A.Rodionov, O.Popov, S.Marjanovic, J.Sovilj, P.Cvijic, M.Pađen, M.Galambos // *Abstract for EAGE conference*. - Paris, 2017.

Режим

доступа:

<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88789>.

230. Viseur, S. New fast, stochastic, Boolean simulation of fluvial deposits / S.Viseur, A.Shtuka, J.Mallet // *SPE paper 49281 of the SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans*. - 1998. - P.110-121.

231. Vrbanac, B. Sedimentation of deep-water turbidities in the SW part of the Pannonian Basin / B.Vrbanac, J.Velić, T.Malvić // *Geologia Carpathica*. - 2010. - v.61. - P.55-69.

232. Williams, G.P. River meanders and channel size / G.P.Williams // *Journal of Hydrology*. - 1986. - P.147-164.

233. Wilson, C.K. The morphology, setting and processes of the Afen Slide / C.K.Wilson, D.Long, J.Bulat // *Marine Geology*. - 2004. - v.213. - P.149-167.

234. Zhukovskaya, E. Turbidites of epicontinental basins / E.Zhukovskaya, T.Olneva // XVII Serbian Geological Congress. Book of Abstracts. - 2018. - P.226-232.