

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ, РАЗВЕДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 55; 551.24

Применение тектонофизического подхода для составления тектонической модели глубокопогруженных комплексов

А.О. Бражников^а, Е.Е. Кожевникова^а, А.А. Клочко^б

^а Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: eekozhevnikova@bk.ru

^б ООО «ТП НИЦ Нефтегаз»

169300, Республика Коми, город Ухта, ул. Первомайская, д. 45.

(Статья поступила в редакцию 23.07.2025 г.)

Актуальность работы. В публикациях последних лет, касающихся нефтегазовой тектоники, отмечается чрезвычайная «эклектичность» используемой терминологии при тектоническом районировании осадочного бассейна и его обрамления, в описании этапности формирования, тектонических условий и типизации разномасштабных разрывных и пликативных структур. Существующая ситуация затрудняет взаимопонимание исследователей, приводит к отсутствию единого подхода при описании тектонических моделей регионов. Формирование единой терминологии и общего подхода при описании тектонических процессов – важная и актуальная направленность. Цель работы. В настоящий момент при изучении и описании перспектив нефтегазоносности севера Волго-Уральской провинции в одном источнике присутствует: Уральская геосинклиналь, Тимано-Печорская провинция, Печоро-Колвинский авлакоген (палеорифт), глубинные разломы и регматическая сеть разломов с современными геодинамическими представлениями. Изучение истории формирования тектонических элементов в районах со сложным геологическим строением осложнено наложением друг на друга тектонических структур различного порядка и времени формирования. Авторы на основе тектонофизического подхода провели работу по восстановлению истории тектонических преобразований в пределах района исследования. Методы исследований. При интерпретации сейсмических данных внутреннего строения разломной зоны, реконструкции обстановки и истории ее формирования в качестве методологического инструмента использованы тектонофизические представления о структурном парагенезе. С тектонофизической точки зрения разломная зона рассматривается не только как плоскость главных сместителей, а как весь объем разреза, в котором проявлены генетически связанные хрупкие и пластические деформации. Внутренняя структура разломной зоны рассмотрена как совокупность структурных элементов, определяющих ее кинематику, этапность и длительность формирования. Результаты работы. На примере одного из участков Печоро-Кожвинского мегавала, по данным детального анализа 3D сейсмического куба, проведена работа по применению комплекса современных подходов к геологическому анализу областей сдвиговой тектоники, в результате разработана новая тектоническая модель. В условиях сложной деформационной истории сдвиговых зон проведено датирование структур по их принадлежности к разновозрастным парагенезам.

Ключевые слова: *тектонофизика, тектоническое районирование, сейсмические исследования, Печоро-Кожвинский мегавал, Лыжско-Кыртаельский вал, нефтегазоносность, глубоко погруженные комплексы.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.3. 283

© Бражников А.О., Кожевникова Е.Е., Клочко А.А., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Введение

Объектом структурно-геологического анализа является фрагмент региональной структуры Печоро-Кожвинского мегавала – одной из крупных и протяженных «инверсионных» структур в осадочном чехле Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (рис. 1).

В разрезе чехла ниже подошвы доминанкового горизонта под мегавалом выделяются грабенообразные структуры Печоро-Колвинского авлакогена (палео-рифта).

Согласно принятой схеме тектонического и нефтегазогеологического районирования (Структурно-тектоническая карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, 1985; Белонин и др., 2004), Печоро-Кожвинский мегавал (структура I порядка) ограничен Западно-Печорским и Восточно-Печорским разломами и состоит из трех кулисно сочленяющихся приразломных валов (структур II порядка) – Лыжско-Кыртаельского, Мутноматерикового и Лебединского. Валы контролируются разломами, входящими в Припечорскую зону разломов.

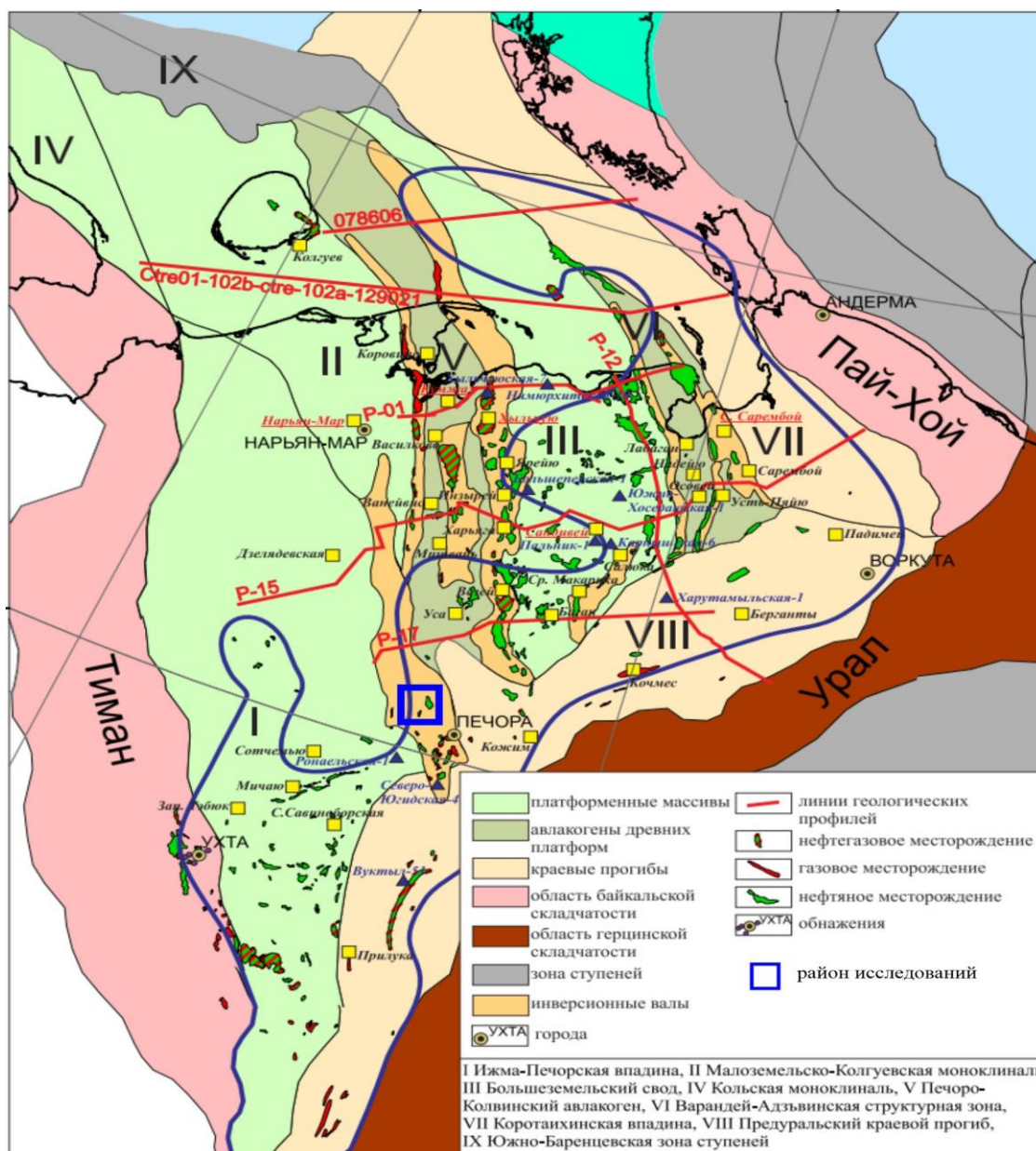


Рис. 1. Тектоническая схема Тимано-Печорского бассейна (Ступакова, 2017)

Лыжско-Кыртаельский вал имеет асимметричное строение – его западное крыло взброшено по региональному сдвиго-надвику, а восточное по разломной зоне сочленяется со смежной Печорогородской ступенью. По поверхности складчатого фундамента рифейско-вендского возраста территория блока находится в зоне протяженных разломов. В разломной зоне по геофизическим данным прослежена полоса пород основного состава, трактуемая как рифейско-вендские рифтогенные вулканиты (Структурно-тектоническая карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, 1985), или, как принято в последнее время, базитовые комплексы сутурной зоны тиманид (Пучков, 2010).

Геодинамической причиной деформаций осадочного чехла для рассматриваемой территории, как и для всей региональной структуры Печоро-Колвинского вала, являются тектонические события в смежной части Уральского подвижного пояса. История развития территории с геодинамической позиции, кратко охарактеризованная рядом авторов (Пучков, 1996, 2010), при более внимательном рассмотрении оказывается крайне схематичной.

Методы исследования

Объектом исследования является фрагмент региональной разломной зоны, которая с тектонофизической точки зрения рассматривается не только как плоскость главных сместителей, а как весь объем разреза, в котором проявлены генетически связанные хрупкие и пластические деформации. При этом каждый индивидуальный разлом также должен рассматриваться не как плоскость (как обычно принимается при традиционной сейсмической интерпретации), а как геологическое тело определенной мощности. Внутренняя структура разломной зоны – это совокупность структурных элементов, определяющих ее кинематику, этапность и длительность формирования. Основные элементы внутренней структуры разломной зоны представлены магистральным сместителем

(разрыв 1-го порядка) и разрывами 2-го порядка, к которым относится большая часть нарушений, выявляемых по сейсмическим данным. При отсутствии четких признаков наличия магистрального сместителя дизъюнктивная структура может классифицироваться как «зона сдвига».

При тектонофизическом подходе порядок разлома имеет определенный генетический смысл (в отличие от ранга, т.е. размера разлома, используемого при региональных работах). Понимание соотношений структурных элементов блока, относящихся по размерам к следующему после сместителя порядку, и их взаимоотношения друг с другом в принципе аналогичны тем, которые возникают в разломной зоне между разрывами двух любых смежных порядков (Семинский, 2003, 2005). Авторы при интерпретации внутреннего строения разломной зоны, реконструкции обстановки и истории ее формирования в качестве методологического инструмента использовали тектонофизические представления о структурном парагенезе.

Анализ сейсмических данных изучаемого района

В пределах исследуемой площади наблюдаются типичные примеры сдвиговых структур (цветочные и пальмовые структуры), являющиеся надежными и универсальными индикаторами проявления деформаций сдвига в разрезе осадочного чехла. Отмечен типовой «конический» облик сдвигового веера разломов (совокупность складчатых и разрывных деформаций разного масштаба) в сейсмическом поле. Для сложной структуры сдвига в пределах блока диагностирован индивидуальный набор структурных особенностей проявления сдвиговых деформаций в разрезе, связанных с неоднократностью деформаций, реологической неоднородностью разреза, особенностями кинематики разломов и др. Изменчивость характера и особенности разломов на различных глубинных уровнях учитывалась при картировании разломного каркаса блока (рис. 2).

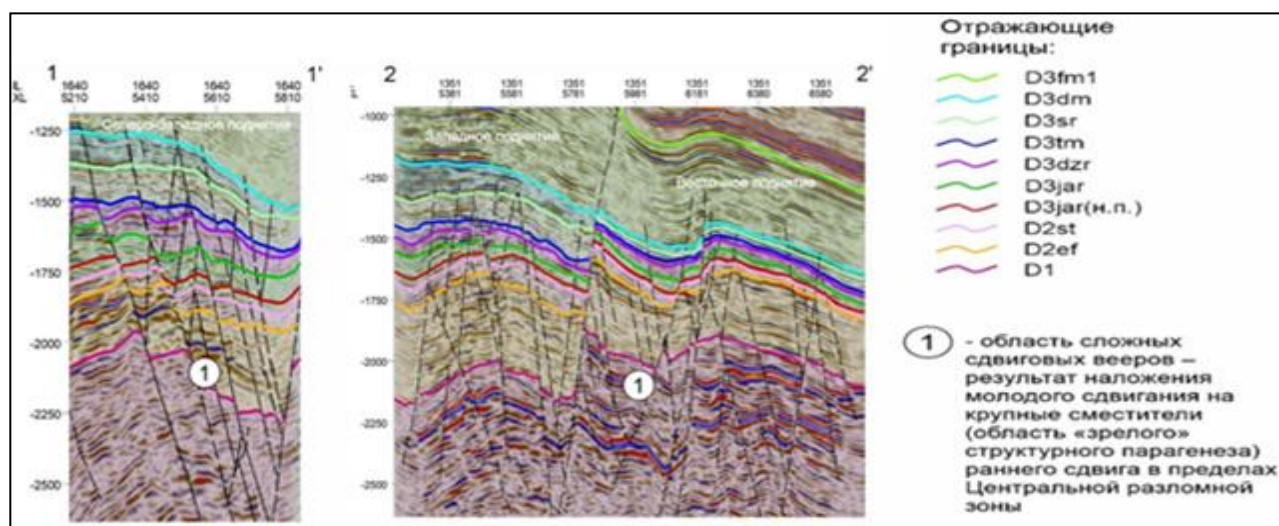


Рис. 2. Изменчивость облика сдвиговой структуры блока на серии сейсмических профилей

На рассматриваемой территории неоднородность геологической среды изначально определяется структурированностью складчатого фундамента плиты. Ослабленные зоны в его структуре – концентраторы деформаций на этапе девонского рифтогенеза. На синорогенном этапе концентраторами напряжений являлись градиентные бортовые зоны девонских грабенов, над которыми проявляется резко неоднородная сконцентрированная деформация пород в девонско-каменноугольном интервале разреза.

Для тектонической активизации «старых» разломных структур благоприятным является соотношение нового поля напряжения с простираем «старых» структурных направлений. При разнице между ними менее $30\text{--}40^\circ$ (менее угла скалывания) эти направления становятся местами развития сдвиговых (сколовых) смещений, т.к. скалывание всегда является более выгодным процессом, чем отрыв или сжатие. На иных структурных элементах при общей ремобилизации структурного плана реализуются деформации с различными соотношениями сжатия-растяжения.

Элементы ранне-среднедевонского транс-тензионного рифтогенного парагенеза в структурном рисунке участка

Структурный план девонского рифтогенного деформационного этапа подвергся интенсивной переработке на последующем синорогенном тектоническом этапе.

Детализация исходной структуры Центрального грабена в пределах рассматриваемой территории ограничена существенным преобразованием его структур наложенными деформациями. Признаки синрифтового характера отложений прослеживаются для толщи эйфельского возраста до кровли доманиковых отложений. Возможно, верхнюю часть этого интервала (выше тимана) следует рассматривать как позднерифтовую или переходную. Характеристику структурных особенностей раннего парагенеза корректно проводить для структурного уровня кровли нижедевонского разреза (ОГ D1).

Важным проявлением в структурно-тектоническом каркасе деформаций раннего рифтогенного тектонического этапа являются: распределение мощностей средневерхнедевонского синрифтового интервала разреза и положение в структуре грабена Центрального поднятия, ориентированного косо по отношению к его бортовой зоне. Предполагается, что Центральное поднятие и, возможно, подобное ему Юго-Восточное на рифтогенном этапе были горстовым присдвиговым поднятиями в составе трансферной зоны, т.е. представляли собой блоки, сочленяющие Центральный грабен с соседней рифтогенной структурой. Рассмотрев Центральное поднятие как трансферную структуру, можно сделать предположение о сдвиговой компоненте деформаций, т.е. его трансензионной кинематике (структура типа pull-apart basin).

По распределению мощностей в терригенной части девонского интервала разреза Центральное поднятие сходно с бортами грабена, что может быть подтверждено предлагаемой структурной типизации Центрального поднятия. Вероятно, ширина трансферной зоны превышала размеры Центрального поднятия и соответствовала значительной части поздней Центральной разломной зоны.

Релейная рампа Центрального поднятия, как и подобная ей Юго-Восточная структура, заложена на рифтогенном этапе, но существенно реактивирована с усложнением строения и зрелости. В структуре современных рифтогенных осадочных впадин трансферные зоны типа релейной рампы рассматриваются как области тектонического контроля седиментации с локальными условиями для транспорта осадочного материала вдоль бортов и локального улучшения коллекторских свойств отложений.

В целом элементы раннего сдвигового парагенеза проявлены в структуре как разломы на дизъюнктивной стадии полного разрушения с чередованием протяженных участков единого сместителя со значительной амплитудой горизонтального перемещения (в обрамлении Лыжского поднятия) и областей дуплексного строения.

Позднепалеозойской-раннемезозойский синорогенный этап деформаций района

Этап проявился в формировании транспрессионного структурного парагенеза в результате регионального сжатия, охватившего обширные территории в Тимано-Печорском регионе в приорогенной области относительно растущего Уральского горного сооружения. Региональное левостороннее сдвигание на синорогенном деформационном этапе охватывает практически весь осадочный разрез в пределах исследуемой территории, реализуясь вдоль нескольких субпараллельных сдвиговых ветвей ССЗ простирания (разломы I порядка)

– Припечорской (западной) и Печоро-городской (восточной) разломных зон. Синхронное, но, вероятно, неравномерное сдвигание по системе однонаправленных сдвигов сформировало обстановку сдвигового скашивания осадочного чехла с последовательным усложнением структурного рисунка из разноранговых, различных по ориентировке и кинематике разрывных и пликративных структур.

На основании анализа сейсмического материала синорогенный этап рассматривается как суммарный эффект деформаций, наложенных на структуры предшествующего рифтогенного этапа. Согласно имеющемуся материалу, нет возможности разделения собственно синорогенных и более поздних деформаций. Особенностью деформаций синорогенного этапа является сложное пространственное соотношение в распределении пликративных и дизъюнктивных элементов. На нижнем, синрифтовом структурном уровне (до кровли доманика) фиксируется обновление разломов, усложнение строения сдвиговых вееров, местами видны проявления локальной «инверсии» по разломам. На верхнем структурном уровне (выше кровли доманика) наблюдаются сложные соотношения разрывных и пликративных деформаций в суммарном эффекте формирования сводового инверсионного поднятия (рис. 3).

Левосторонняя общая кинематика и значительная амплитуда горизонтальных смещений синорогенного этапа диагностируются по: характерному сигмоидальному развороту разломных зон и в их пределах дуплексов; ориентировке разломов III порядка; общему вытягиванию (с продольным удлинением) впадины в направлении магистрального смещения. Корректное количественное определение величины горизонтальных смещений проблематично из-за неоднократного сдвигания, отсутствия уверенных структурных реперов, сложной разломной тектоники и качества сейсмического материала.

Результаты работ и их обсуждение

По результатам интерпретации сейсмических данных, структурных рисунков, с учетом распределения мощностей отложе-

ний, с применением основ тектонофизики составлена тектоническая модель территории исследования с обозначением основных тектонических и тектоно-седиментационных структур (рис. 4).

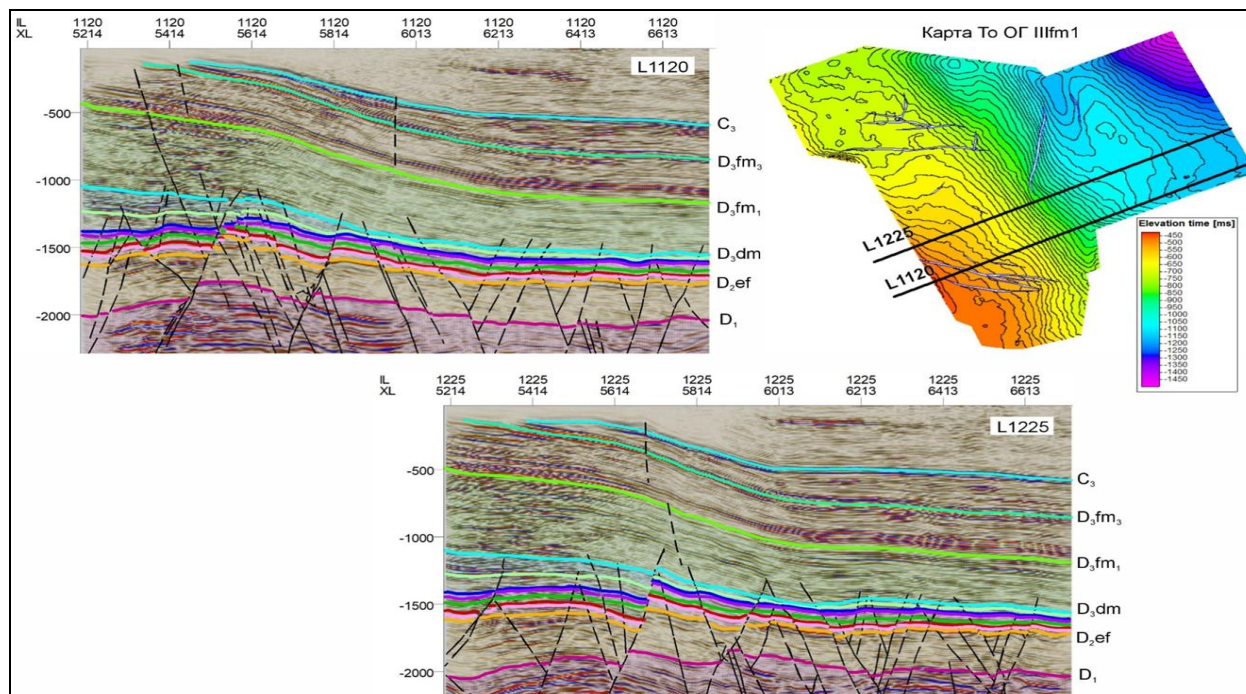


Рис. 3. Проявление синорогенной (и посторогенной) инверсии на сейсмических разрезах

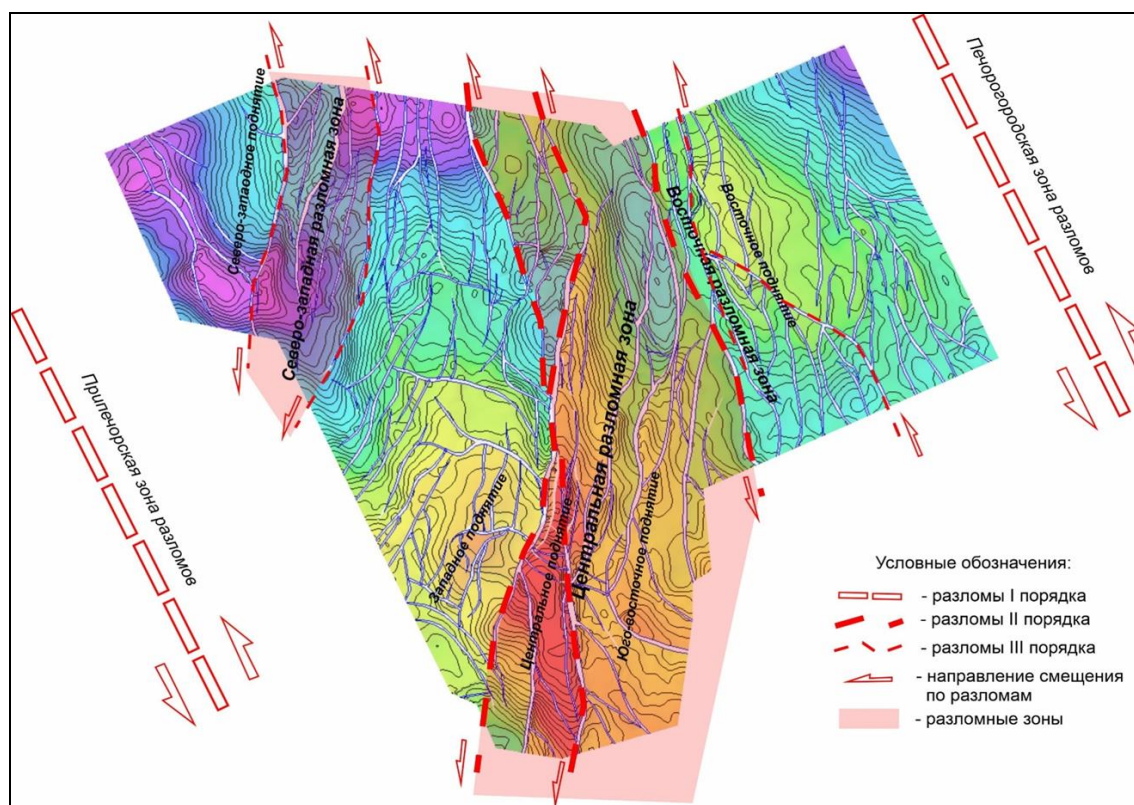


Рис. 4. Предлагаемое тектоническое районирование территории исследования

Припечорская зона разломов и Печорогородская зона разломов – две субпараллельные зоны крупных региональных разломов (I порядка); разломные зоны, проявленные на всех уровнях осадочного чехла и в складчатом основании территории. Разломные ограничения систем впадин Печоро-Колвинского рифта, главные региональные разломы в структуре Лыжско-Кыртаельского вала. Печорогородская зона разломов – восточная часть территории блока, плечо (приподнятое крыло) Лыжского грабена, отличающаяся относительно менее контрастным тектоническим рельефом, сокращенными мощностями средне-верхнедевонского разреза. Разграничение Печорогородской ступени и смежной Лыжской впадины осложнено масштабными сдвиговыми смещениями, приуроченными к тектонической границе этих двух структур на рифтовом уровне, и крайним усложнением зоны их сочленения на этапе синорогенных деформаций. Относительно менее деформированная часть ступени это восточная часть блока, ограниченная Сигавейской разломной зоной.

Центральная разломная зона (структура II порядка) – широкая зона проявления сдвиговых деформаций, охватывающая бортовую часть Печорогородской ступени и краевую прилегающую часть Лыжской впадины. Наиболее сложно построена область в пределах блока, где зона крупных тектонических нарушений, пересекающих весь блок, с наибольшими наблюдаемыми как вертикальными, так и горизонтальными амплитудами смещения значительной части осадочного разреза. В пределах Центральной разломной зоны выделены следующие тектонические элементы. *Западное поднятие* – наиболее амплитудный сдвиг в пределах участка исследований. *Центральное поднятие* – горстообразное блоковое поднятие на уровне средне-верхнедевонского интервала разреза, в вышележащем разрезе – сводовое дезъюнктивно-пликативное поднятие – кулисный сегмент Лыжско-Кыртаельского вала. Самая возвышенная и амплитудная часть в пределах Центральной разломной тектонической зоны. *Юго-Восточное поднятие* – горстообразное поднятие.

Восточная разломная зона (структура II порядка) предположительно является восточным ограничением Центральной тектонической сдвиговой зоны. С востока зона ограничена *Восточным поднятием* – в краевой, наиболее нарушенной разломами части Печорогородской ступени.

Северо-Западная разломная зона (структура III порядка) – тектоническая зона, ограничивающая с северо-запада Центральный грабен и северную периклиналь Западного поднятия. *Северо-Западное поднятие* – асимметричное приразломное поднятие в пределах северной сдвиговой кулисы Северо-Западной разломной зон.

Выводы

Проведенные исследования позволили: типизировать и ранжировать разрывные нарушения на генетической основе (при анализе сейсмического материала и построении разломного каркаса); обосновать последовательность и этапность формирования элементов структурно-тектонической модели; установить влияние постседиментационных сдвиговых смещений на распределение мощностей (и фаций) в геологическом разрезе территории.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ проект FSNF-2025-0011

Библиографический список

- Пучков В.Н. Образование Урало-Новоземельского складчатого пояса – результат неравномерной косоориентированной коллизии континентов // Геотектоника. 1996. № 5. С. 66–75.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2003. 244 с.
- Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2005. ISBN: 5-7692-0719-1 EDN: QKFADF

Структурно-тектоническая карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. М.1:1000000. Мин Гео. СССР, 1985.

Ступакова А.В. Тимано-Печорский бассейн. Строение и основные этапы развития // Георе-

сурсы. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 56–64. DOI: 10.18599/grs.19.7 EDN: XOGEXB

Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения / М.Д. Белонин, О.М. Прищепа, Е.Л. Теплов и др. СПб: Недра, 2004. 396 с.

Application of Tectonic-Physical Approach for Construction of Tectonic Model of the Deeply-Buried Complexes

A.O. Brazhnikov^a, E.E. Kozhevnikova^a, A.A. Klochko^b

^a Perm State University

15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: eekozhevnikova@bk.ru

^b ООО ТР SIC Neftegaz

45 Pervomayskaya Str., Ukhta 169300, Komi Republic

Recent publications on oil and gas tectonics note the extreme “eclecticism” of the terminology used in the tectonic zoning of the sedimentary basin and surrounding structures, in describing the stage of formation, tectonic conditions, and typification of different-scale discontinuous and plicate structures. The existing situation makes it difficult for researchers to understand each other and leads to the lack of a unified approach in describing the regional tectonic models. Formation of a unified terminology and a common approach in describing tectonic processes is an important and urgent problem. At present, when studying and describing the prospects of oil and gas bearing capacity in the north of the Volga-Urals province, definitions as the Ural geosyncline, Timan-Pechora province, Pechora-Kolva avlacogen (palaeorift), deep faults and regmatic fault network may be used in one published work. The study of the history of tectonic elements formation in areas with complex geological structure is complicated by overlapping tectonic structures of different order and age. Based on the tectonic-physical approach, authors carried out the reconstruction of the history of tectonic transformations within the study area. When interpreting seismic data of the internal structure of the fault zone, reconstruction of evolution of the formation, tectonic-physical ideas about structural paragenesis were used as a methodological tool. From the tectonic-physical point of view, the fault zone is considered not only as the uniform displacement plane, but as the whole volume of the section, in which genetically related brittle and plastic deformations are manifested. The internal structure of the fault zone is considered as a set of structural elements that determine its kinematics, stage and duration of formation. Application of modern approaches to geological analysis of shear tectonics areas is illustrated by detail analysis of 3D seismic cube data obtained at the territory of the Pechoro-Kozhva megaval. As a result, a new tectonic model was developed. In the conditions of complex deformation history of shear zones, the structures were dated according to their belonging to different-age paragenesis.

Key words: *tectonics-physics; tectonic zoning; seismic studies; Pechoro-Kozhva megaval; Lyzhsko-Kyrtayelsky shaft; oil and gas bearing capacity; deeply buried complexes.*

References

- Puchkov V.N.* 1996. Obrazovanie Uralo-Novozemelskogo skladchatogo poyasa – rezultat neravnomernoy kosoortirovannoy kollizii kontinentov [Formation of Ural-Novozemelskii Folding Belt as a result of non-uniform oblique continents collision]. *Geotektonika*. 5:66–75. (in Russian)
- Puchkov V.N.* 2010. *Geologiya Urala i Priuralya* (aktualnye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of Urals and Pre-Urals (topical problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallogeny)]. Ufa, DizajnPoligrafServis, p. 280. (in Russian)
- Seminskiy K.Zh.* 2003. Vnutrennyaya struktura kontinentalnykh razlomnykh zon. Tektonofizicheskiy aspekt [Inner structure of the continental fault zones. Tectonic-physical aspect]. Novosibirsk, SO RAN, Geo, p. 244. (in Russian)
- Seminskiy K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A.* 2005. Vnutrennyaya struktura kontinentalnykh razlomnykh zon. Prikladnoy aspekt [Inner structure of the continental fault zones. Application-oriented aspect]. Novosibirsk, SO RAN, Geo, p. 290. (in Russian)
- Strukturno–tektonicheskaya karta Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii. M.1:1000000* [Structural tectonic map of Timan-Pechora oil-and-gas province. Sc. 1: 1000000]. Min Geo. SSSR. 1985
- Stupakova A.V.* 2017. Timano-Pechorskiy basseyn. Stroenie i osnovnye etapy razvitiya [Timan-Pechora Basin. Structure and main development stages]. *In: Georesursy*. Ch. 1, pp. 56-64. (in Russian)
- Timano-Pechorskaya provintsiya: geologicheskoe stroenie, neftegazonosnost i perspektivy osvoeniya* [Timan-Pechora Province: geological structure, oil-and-gas potential, and development perspectives]. *Eds. M.D. Belonin, O.M. Prishchepa, E.L. Teplov et al.* St.Peterburg, Nedra, 2004, p. 396. (in Russian)