

УДК 553.98

СТРОЕНИЕ СОЛЯНЫХ ДИАПИРОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНА И ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2024 г. К. О. Соборнов^{1, 2, *}¹ООО «Северо-Уральская нефтегазовая компания»,

д. 14, ул. Оплеснина, 169313 Ухта, Республика Коми, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ),

д. 36, ш. Энтузиастов, 105118 Москва, Россия

*e-mail: Ksoborbov@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2024 г.

После доработки 11.08.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Интерпретация региональных сейсмических профилей, характеризующих строение Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба до глубин 10–20 км, позволяет предполагать, что важную роль в строении этого региона играли соляные диапиры. Соляные диапиры имеют следующие признаки: (i) большая высота (до 5 км и более); (ii) сейсмическая прозрачность; (iii) наличие слоев роста на флангах предполагаемых соляных поднятий; (iv) существование систем радиальных разломов в перекрывающих отложениях; (v) изометричные формы поднятий; (vi) пониженные значения гравитационного поля. Соляные деформации объясняют происхождение широко распространенных кольцевых инверсионных структур в юрско-меловых отложениях. Такие кольцевые структуры возникали над долгоживущими соляными диапирами. Соли в них, вероятно, имеют раннепалеозойский возраст. Предполагается, что образование соляных толщ происходило на периферии Сибирской платформы. Западной границей зоны распространения соленосных отложений является зона Трансевразийского разлома, которая, вероятно, отделяла складчатые Уралы от Сибирской платформы и спаенных с ней тектонических блоков. Наличие соленосного палеозойского чехла на северо-востоке Западно-Сибирского бассейна и в Енисей-Хатангском прогибе способствовало формированию крупных залежей нефти и газа. Соляные криптодиапиры фокусировали миграцию углеводородов из глубокопогруженных, термически зрелых палеозойских отложений в юрско-меловой плитный чехол, что объясняет преобладание в этих районах залежей газа, а также — многопластовость месторождений.

Ключевые слова: Западно-Сибирский бассейн, Енисей-Хатангский прогиб, Трансевразийский разлом, соляные диапиры, кольцевые инверсионные структуры, нефтегазоносность, региональная сейсморазведка

DOI: 10.31857/S0016853X24050044, EDN: SPWYOP

ВВЕДЕНИЕ

Район исследования занимает северо-восточную часть Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангский прогиб (рис. 1).

Впервые соляной диапир в этом районе был обнаружен геологическим картированием в восточной части Енисей-Хатангского прогиба на п-ове Юрунг-Тумус в 1930 г. [22]. Вскоре в районе этого диапира было обнаружено нефтяное месторождение Нордвик. Это открытие стимулировало геологические исследования в Енисей-Хатангском прогибе.

В дальнейшем геологическим картированием было установлено наличие раннепалеозойских солей на северном обрамлении Енисей-Хатангского прогиба в горных районах п-ова Таймыр. Проведенные электроразведочные работы МТЗ показали, что соляные

структуры в этом районе не являются локальным явлением. Эти работы позволили выделить аномалии высокого сопротивления, свидетельствующие о существовании в складчатых районах п-ова Таймыр соляных диапиров [4]. На востоке Западно-Сибирского бассейна кембрийские соли были установлены бурением [21]. Эти соли принадлежат ареалу распространения раннекембрийских солей, покрывающих южную часть Сибирской платформы.

Приведенные данные о наличии палеозойских соленосных толщ в периферических частях Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба рассматривались как частные, экзотические явления, не имеющие существенного значения для глубинного строения этих прогибов. Во многом это было обусловлено тем обстоятельством, что основные запасы нефти и газа в их

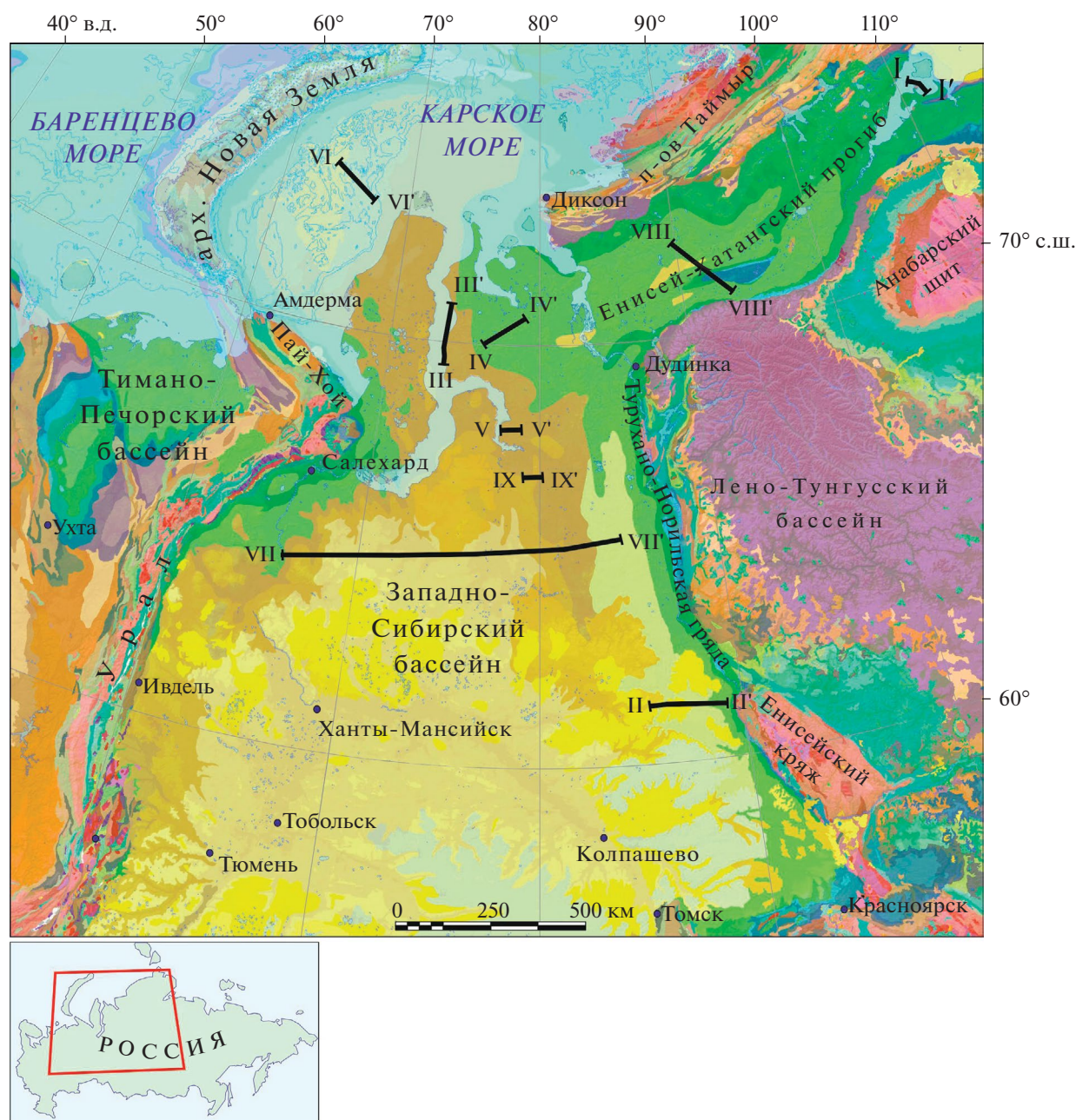


Рис. 1. Обзорная геологическая карта Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба (по данным [39], с изменениями и дополнениями).

Показано положение сейсмических разрезов I–I' – IX–IX'.

пределах сосредоточены в меловых и в меньшей степени – юрских отложениях [27, 29].

Именно эти отложения представляли основной поисковый интерес. Большинство нефтегазовых скважин было пробурено до глубин 2–3 км с целью их опоискования. Методы геофизических исследований, в первую очередь – сейсморазведки, были направлены на получение данных о строении перспективных интервалов в меловых и юр-

ских отложениях, залегающих главным образом на глубинах 2.0–4.0 км.

Глубокопогруженные доюрские осадочные толщи были изучены значительно меньше. Данные об их составе и строении фрагментарны. Это затрудняло интерпретацию глубинного строения Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба.

Существующие интерпретации опирались в основном на косвенные данные, а также общие

представления о геодинамике Северной Евразии [17, 29]. В региональных геологических интерпретациях диапиризм солей не рассматривался в качестве важного фактора структурного развития этих бассейнов.

За последние годы накопилось значительное количество сейсмических данных, характеризующих глубинное строение региона исследования [1, 5, 6, 10, 13, 28]. Интерпретация этих данных показывает, что соляные диапиры могут иметь значительное распространение в северо-восточной части Западно-Сибирского бассейна и в Енисей-Хатангском прогибе. На это указывают региональные сейсмические профили, позволяющие рассматривать строение доюрских отложений на глубинах до 10 км и более. Новое понимание строения северо-восточной части Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба позволяет предполагать, что соляные структуры оказали значительное влияние на их нефтегазоносность.

Целью настоящей статьи является анализ данных сейсморазведки, интерпретация которых свидетельствует о важной роли соляных криптодиапиров в строении региона исследования.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Западно-Сибирский бассейн и Енисей-Хатангский прогиб представляют собой внутриплитные осадочные бассейны, возникшие при растяжении и погружении коры суперконтинента Пангея. Этот суперконтинент возник в конце палеозоя, в его состав вошла большая часть континента Евразия [17, 29].

Начиная с юрского периода, Западно-Сибирский бассейн и Енисей-Хатангский прогиб представляют собой обширные зоны погружения, наложенные на гетерогенное основание, в состав которого входят периферические зоны Сибирской платформы, коллаж микроконтинентов, палеозойские складчатые пояса [18, 19, 20, 26, 29].

В строении палеозойских толщ, образующих эти структурные элементы широко распространены надвиговые и сдвиговые деформации. Их формирование было обусловлено многофазной палеозойской эволюцией Евразии, которая в основном определялась сближением и коллизией Восточно-Европейской и Сибирской континентальных плит [17, 26, 29, 38].

Сближение континентальных плит сопровождалось субдукцией океанической коры разделяющего их океанического пространства, аккрецией

островных дуг и микроконтинентов, расположенных между ними. В результате финальной коллизии в конце палеозоя возникла обширная складчатая область, которая в дальнейшем образовала гетерогенное основание Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба [17, 19, 29].

Западная часть Западно-Сибирского бассейна наложена на складчатое сооружение Урала, которое, полагаем, испытало постколлизийный коллапс в начале триаса. Свидетельством этого является протяженные триасовые прогибы, наложенные на палеозойское складчатое основание Западной Сибири [17, 19, 29, 39, 43]. Образование этих прогибов сопровождалось массовыми излияниями трапповых базальтов. Северная часть рассматриваемого района в значительной мере затронута поздне триасовой пай-хойской складчатостью [18, 26].

В юрское время произошла обширная трансгрессия, которая явилось началом формирования юрско-мелового эпиконтинентального осадочного чехла Западно-Сибирский бассейна и Енисей-Хатангского прогиба [19, 20, 36].

Юрско-меловые отложения представлены песчано-глинистыми отложениями, включающими угленосные толщи. Накопление этих отложений происходило как результат размыва прилегающих складчатых сооружений, обломочный материал которых переносился речными системами [20].

Монотонное погружение компенсированных эпиконтинентальных бассейнов было нарушено в конце юрского времени, когда произошло их резкое углубление, которое, вероятно, имело эвстатическую природу. В Западной Сибири это привело к формированию битуминозных сланцев баженовской свиты.

В неокомское время некомпенсированный осадочный бассейн был постепенно заполнен клиноформными толщами. Основным источником обломочного материала в неокоме являлась Сибирская платформа. Это обстоятельство согласуется с преимущественной проградацией клиноформных комплексов [11, 20, 32, 36, 43]:

- западной – в Западной Сибири и
- северной – в Енисей-Хатангском прогибе.

Оживлению эрозии и поступлению обломочного материала в неокоме способствовала складчатость в Верхоянском складчатом поясе [24, 26]. Эта складчатость провоцировала внутриплитные деформации, которые вызывали в рассматриваемых регионах реактивацию разломов палеозойского заложения [39].

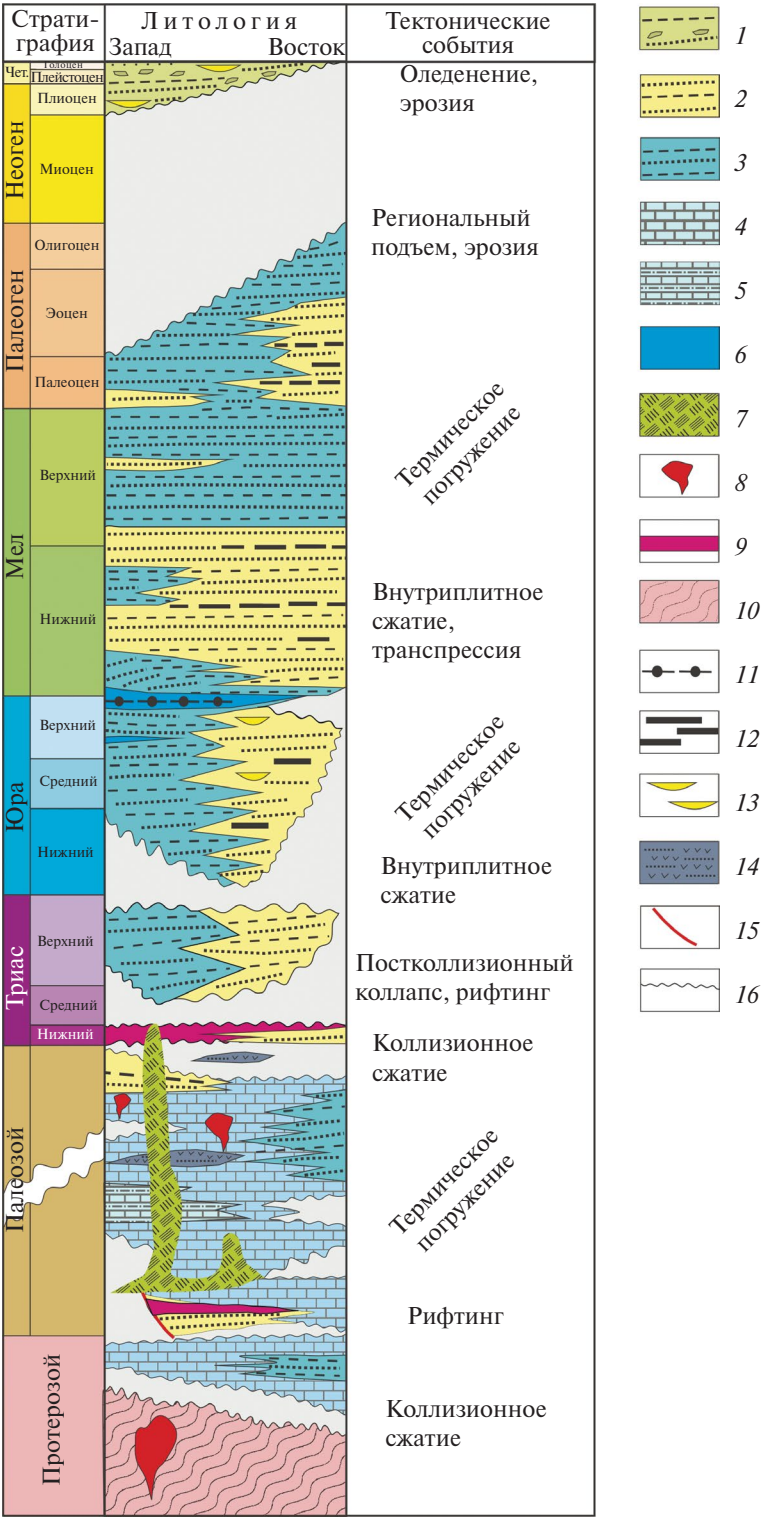


Рис. 2. Тектоностратиграфия осадочного чехла северной части Западно-Сибирского бассейна (по данным [11, 19, 20, 32], с изменениями и дополнениями).

1 – континентальные ледниковые, дельтовые и прибрежно-морские отложения;
2–5 – отложения: 2 – песчаные мелководные и аллювиальные, 3 – глинистые мелководного шельфа, 4 – морские карбонатные, 5 – сланцевые шельфовых впадин;
6 – переслаивание карбонатных и терригенных отложений; 7 – эвапориты; 8 – гранитные интрузии; 9 – трапповые базальты; 10 – метаморфизованные породы; 11 – битуминозные сланцы (бажениты); 12 – угли; 13–14 – отложения: 13 – русловые, 14 – вулканогенные; 15 – разлом; 16 – несогласие

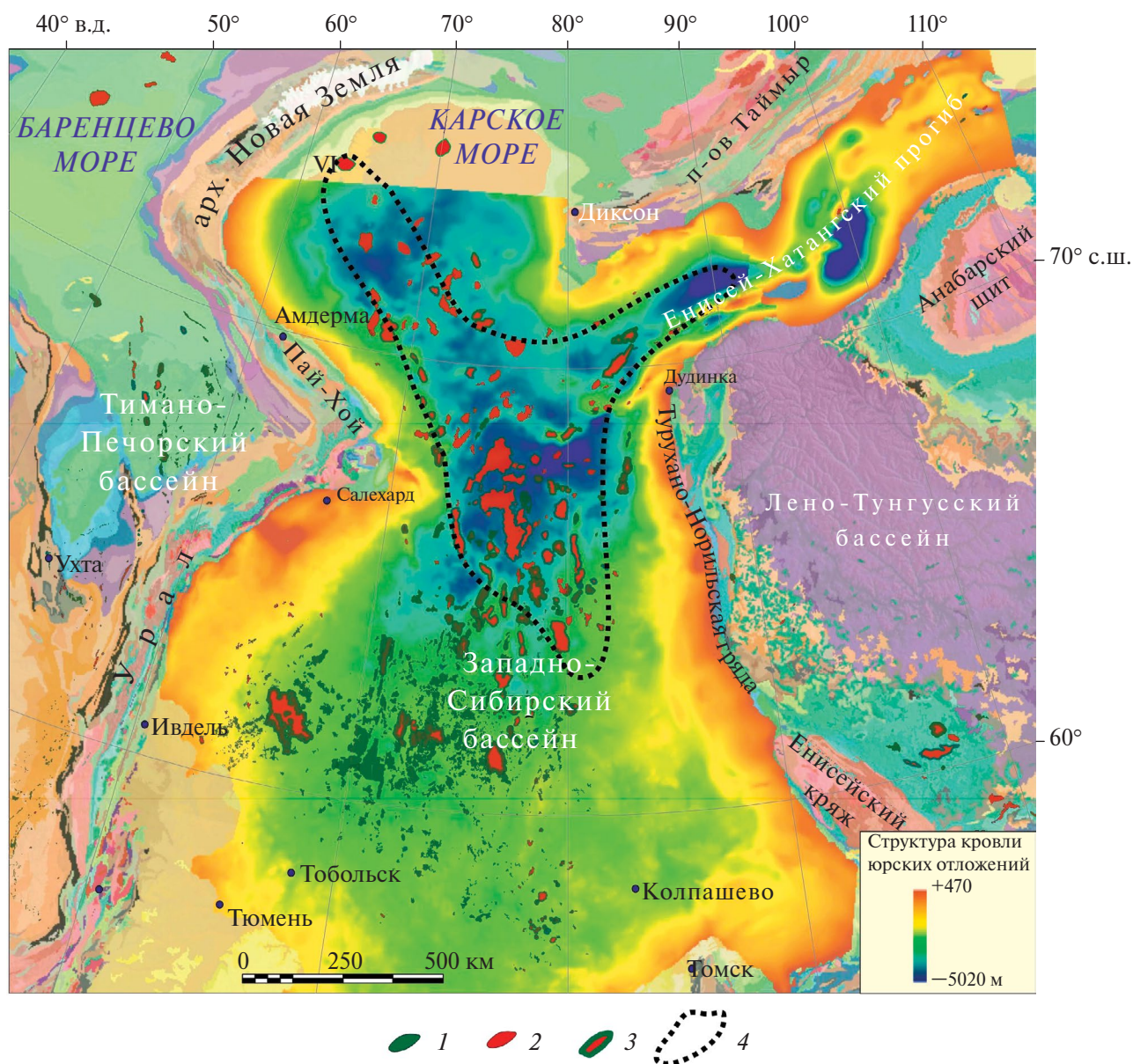


Рис. 3. Структурная карта кровли юрских отложений Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба на основе геологической карты (с использованием данных СНИИГИМС, СибНац, ВНИГНИ).

Показан (точечная линия черным) ареал развития кольцевых инверсионных соляных структур (по [15], с дополнениями).

1–3 – месторождения: 1 – нефти, 2 – газа, 3 – нефти и газа

В палеогене–неогене скорость погружения в Западной Сибири и Енисей-Хатангском прогибе резко снизилась. В это время Северная Евразия испытывала преимущественно восходящие движения, что, вероятно, обусловили [17, 29]:

- альпийская складчатость на юге;
- раскрытие Ледовитого океана на севере.

В конце кайнозоя похолодание климата привело к формированию ледниковых покровов и глубокому промерзанию верхней части осадочного чехла [2].

На севере региона исследования перемещение ледников привело к значительной эрозии осадочного чехла. Таяние ледникового покрова в новейшее время способствовало изостатическому подъему в рассматриваемых районах, реактивации разломов, формированию “газовых трубок” [2].

Тектоностратиграфия осадочного чехла северной части Западно-Сибирского бассейна представлена в схематическом виде (рис. 2).

Доюрские отложения вскрыты скважинами преимущественно в периферических частях Западно-Сибирского и Енисей-Хатангского бассейнов, где они залегают на доступных для бурения глубинах. Соответственно, представления о строении доюрского основания в осевых зонах Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба основаны на региональных моделях геодинамического развития и во многом условны [18, 29].

Структурный план Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба по поверхности юрских отложений приведен на рисунке 3, составленном на основе обобщения результатов исследований ряда ведущих исследовательских организаций (11, 13, 21, 25).

Западно-Сибирский бассейн достигает максимальных глубин погружения по юрской поверхности в северной части. Размещение месторождений нефти и газа в Западно-Сибирского бассейна показывает преимущественную газоносность его северных и северо-восточных районов. В южной части бассейна преобладают нефтяные месторождения.

Структурный план Енисей-Хатангского прогиба характеризуется более высокой структурной дифференцированностью, чем в Западной Сибири. Такая дифференцированность обусловлена развитием крупных зон продольных сдвиговых деформаций [13, 25, 41]. Особенностью строения Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба является широкое распространение своеобразных кольцевых инверсионных структур [1, 5, 6, 10, 12, 15]. В верхней части разреза им соответствуют антиклинальные структуры, которые подстилаются синклиналями. Показан ареал распространения этих структур в регионе исследования (см. рис.3).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В основу исследований положены данные сейсмических и комплексных региональных геолого-геофизических работ в пределах Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба, проведенных ведущими исследовательскими организациями, к их числу относятся:

- производственные организации (АО «Росгеология» (г. Москва, Россия), АО «Башнефтегеофизика» (г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия), АО «Геотек» (г. Москва, Россия));

- научно-исследовательские институты (АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья (АО

«СНИИГИМС», г. Новосибирск, Россия), ФГУП Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ СО РАН, г.Новосибирск, Россия), ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ, г. Москва, Россия), НАО «Сибирский научно-аналитический центр (СИБНАЦ, г. Тюмень, Россия));

Основную ценность представляют данные, полученные в результате региональных сейсмических исследований, характеризующих строение рассматриваемого региона в интервале глубин 5–20 км.

Данные, представляющие интерес для изучения глубинного строения, были систематизированы и сведены в базу данных, в которую включены 50 тыс. км региональных сейсмических профилей 2D, данные интерпретации материалов глубокого бурения, электроразведки, потенциальных геофизических полей, геологические карты и материалы дистанционного зондирования.

В нашем исследовании широко были использованы данные, характеризующие различные особенности строения и развития рассматриваемого региона, а также освещающие региональную геодинамическую обстановку [3, 9, 11, 16, 17, 19, 25, 27–29, 32, 36, 43].

СОЛЯНЫЕ ДИАПИРЫ

Наиболее известный соляной диапир Енисей-Хатангского прогиба находится на п-ове Юрунг-Тумус в районе Хатангского залива. Поверхностные выходы нефти в районе этого диапира были обнаружены в 1933 г. [22]. Бурение, начатое в 1934 г., привело к открытию нефтяного месторождения Нордвик. Нефтепроявления различной интенсивности были установлены как на дневной поверхности, так и в скважинах в интервале от меловых до верхнедевонских отложений. Изученный диапир представляет собой высокорельефное поднятие, в своде которого обнажаются экструдированные соли и обломки разновозрастных вмещающих отложений.

Поле выходов дислоцированных палеозойских пород, включающих соли, в обнаженной части диапира составляет примерно 1×2.5 км.

Точные данные о возрасте солей этого диапира в настоящее время отсутствуют. Глубокие скважины, которые могли определить возраст соляных толщ в нормальном стратиграфическом залегании на основании возраста перекрывающих отложений, в данном районе также отсутствуют.

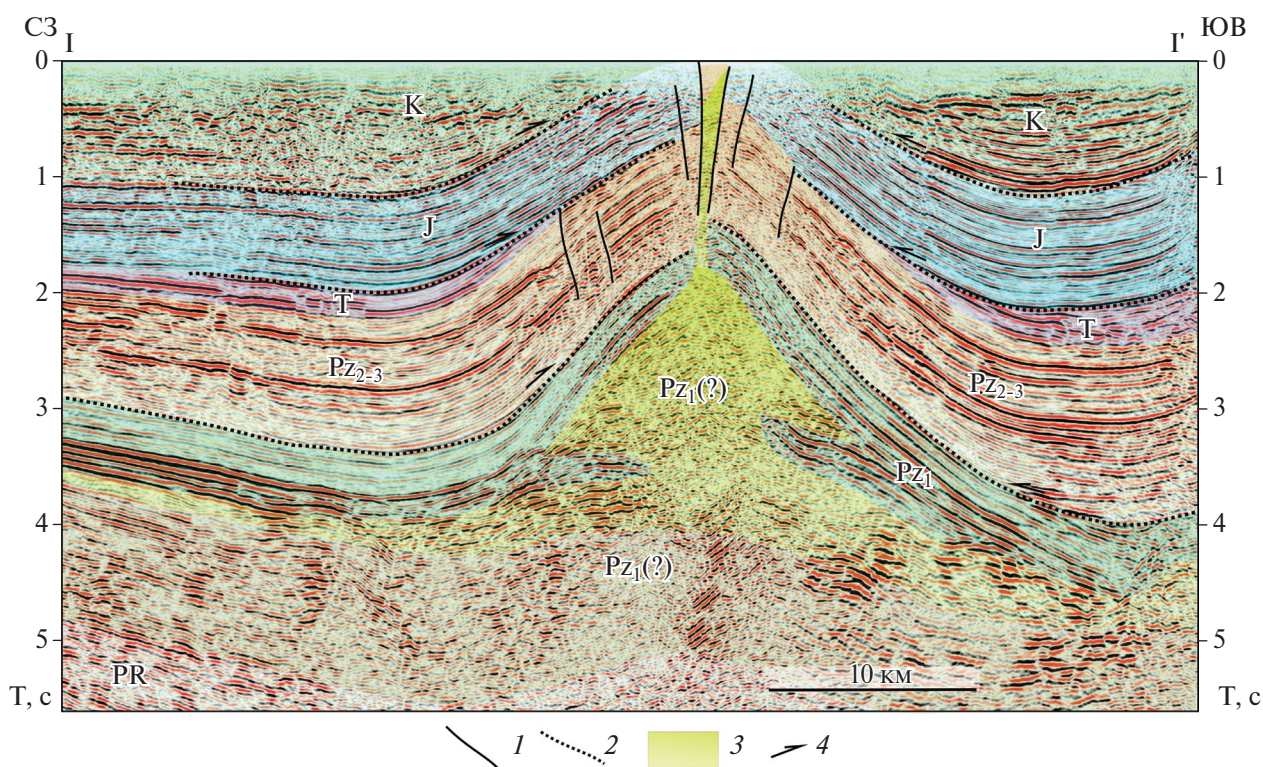


Рис. 4. Интерпретированный временной сейсмический разрез I–I' Хатангского залива вблизи п-ова Юрунг-Тумус (показано морское продолжение соляного диапира, с которым связано нефтяное месторождение Нордвик).

Положение разреза I–I' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – несогласие; 3 – соли; 4 – сейсмическое налегание

В размытом своде диапировой структуры выявлены включения отложений, содержащих среднедевонскую фауну [22]. Учитывая способность соляных диапиров захватывать в процессе своего развития фрагменты разновозрастных вмещающих пород, прямое определение возраста соли на основе датировки аллохтонных включений не представляется возможным. Исходя из среднедевонского возраста отложений, выявленных в обломках пород в составе диапира, рядом исследователей предполагалось, что соль имеет девонский древний возраст.

Новые сейсмические данные позволяют более уверенно интерпретировать строение этого диапира. Представление о строении соляного диапира дает сейсмический разрез, проходящий в непосредственной близости от него в прилегающих водах Хатангского залива (рис. 4).

Диапир представляет собой крупное конусообразное поднятие, над которым выделяется узкий соляной шток, по которому соль была экструдирована на поверхность. Столбообразная форма штока, пронизывающего мезозойские отложения подтверждается данными бурения на Нордвикском месторождении [22]. Корреляция сейсмических го-

ризонтов свидетельствует в пользу более древнего – раннепалеозойского – возраста соли этого диапира, чем это предполагалось ранее. Последовательное утонение облекающих палеозойско–юрских отложений над соляным поднятием подтверждает его длительный рост, который начался в среднем палеозое.

Исходя из того, что соли прорывают юрские и меловые отложения, можно заключить, что экстразия соли из этого диапира на поверхность произошла в конце мела и/или в кайнозое.

В Западно-Сибирском бассейне соли достоверно установлены на территории западной части Красноярского края и прилегающих районов Томской области к западу от Енисейского кряжа. Здесь выявлено наличие зоны распространения солей нижнекембрийского возраста. Эти соли вскрыты скважинами 1-Лемок и 150-Аверинская [21]. Приведено сейсмическое выражение этих структур (рис. 5).

В этом районе выделяется соляные структуры, прорывающие палеозойские отложения и перекрывающиеся несогласно залегающим юрско–меловым чехлом.

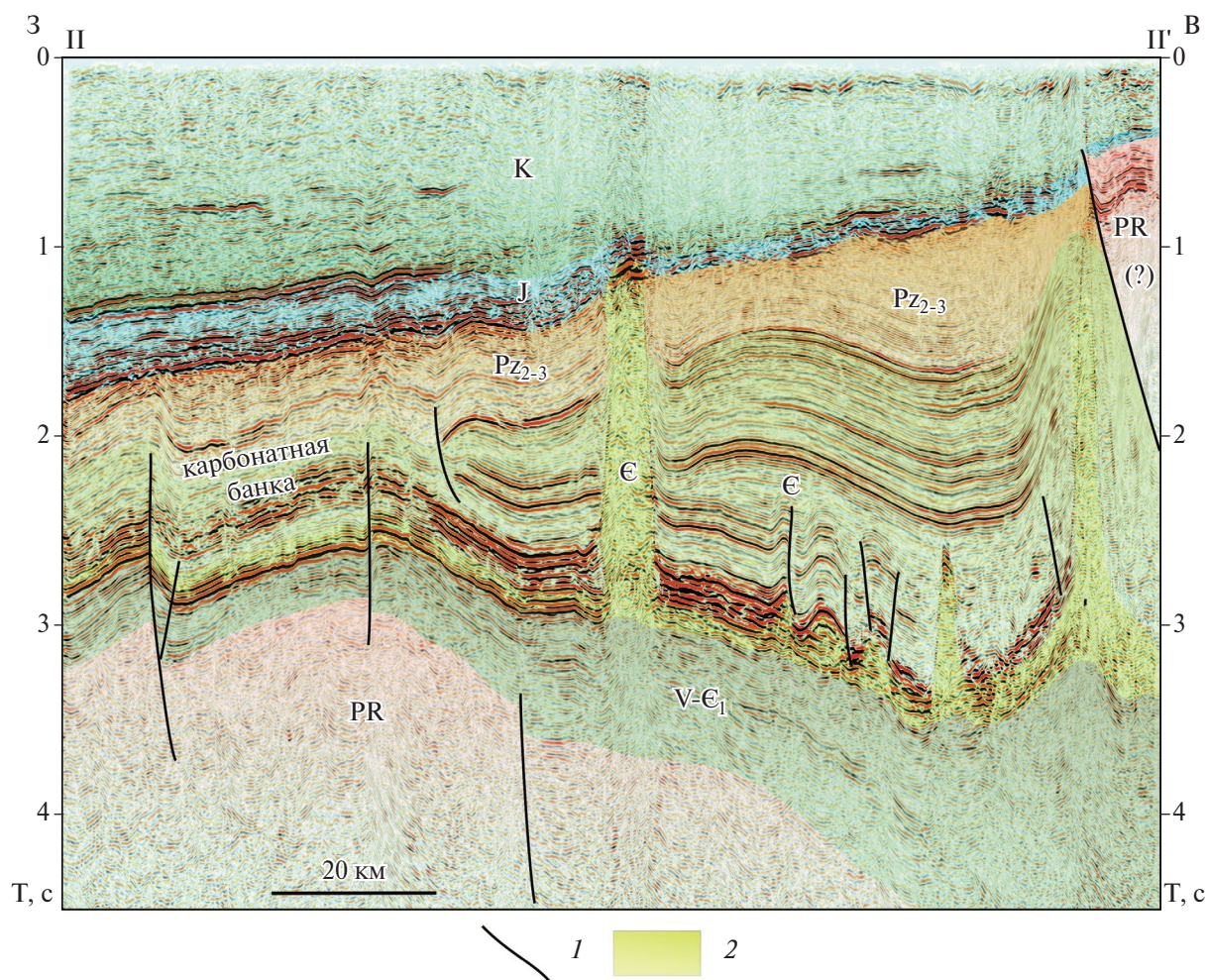


Рис. 5. Интерпретированный временной сейсмический разрез II–II' с выделением соляных диапиров, сложенного нижнекембрийскими солями в восточной части Западно-Сибирского бассейна.

Положение разреза II–II' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соли

Наиболее убедительной представляется крупная столбообразная диапировая структура в центральной части профиля. Эта структура находится в интервале 1–3 сек, ее высота составляет ~5.5 км (рис. 6).

Региональная сейсмическая интерпретация позволяет предполагать, что соли в этом районе приурочены к раннепалеозойской впадине, которая погружалась к востоку (в современных координатах). На западе эта соленосная впадина граничит с зоной палеошельфа, где эвапоритовые отложения либо отсутствуют или имеют небольшую толщину.

Вероятно, что кембрийские соленосные толщи в этом районе накапливались в обширном эпиконтинентальном бассейне, который охватывал значительную часть Сибирской платфор-

мы. Формирование Енисейского кряжа привело к тектоническому обособлению основной части платформы от ее погруженной западносибирской части.

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ГЛУБИННЫХ КРИПТОДИАПИРОВ

Интерпретация сейсмических данных, характеризующих строение разреза Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба, дает основание предполагать, что зоны соляных дислокаций в их пределах имеют широкое распространение. Сложность выявления диапиров была обусловлена тем, что в пределах этих районов развит мощный мезозойский чехол. Локально его толщина достигает 10–12 км.

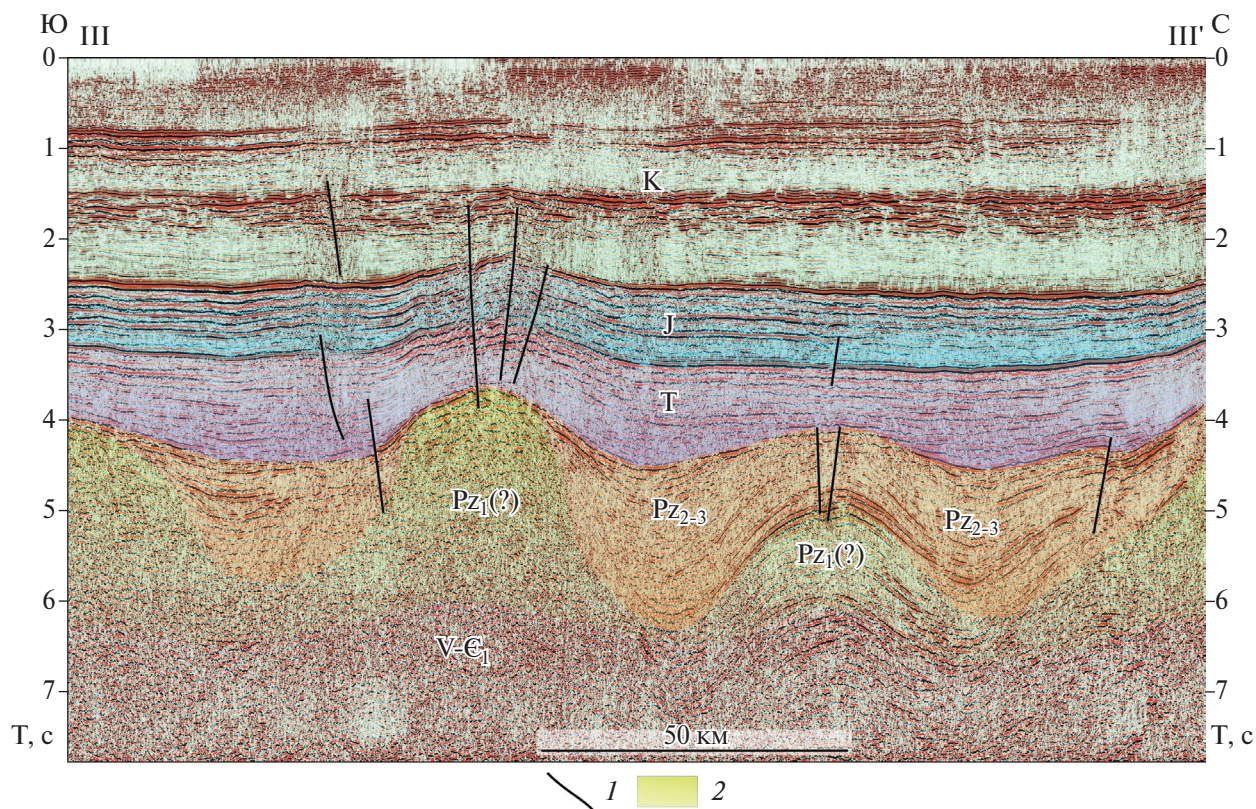


Рис. 6. Интерпретированный временной сейсмический разрез III–III' с выделением предполагаемых соляных диапиров, сложенного нижнепалеозойскими солями.

Положение разреза III–III' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соли

Соответственно, выявление соляных крипто-диапиров в нижележащих палеозойских слоях, стало возможным только при накоплении значительного количества региональных сейсмических данных, полученных с помощью мощных источников возбуждения сейсмических волн, широким выносом приемных линий и длиной записи не менее 6–10 сек. Эти данные позволяют получать геологически значимую информацию о строении нижних горизонтов осадочного чехла на глубинах до 20 км.

Особенно важными для изучения глубинного строения являются региональные разрезы, которые расположены в акваториальном продолжении Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба, а также заливах и в крупных реках. Это связано с более высокой информативностью данных, полученных в акваториях, по сравнению с данными, полученными на суше, что обусловлено преимуществами технологии морской сейсморазведки.

Признаки наличия криптодиапиров можно видеть на сейсмическом разрезе, пересекающем

Обскую губу (см. рис.6). На этом разрезе под мощным слабодислоцированным мезозойским чехлом отчетливо выделяются крупные изометричные складки, лишенных определенной вергентности, характерной для зон коллизионной складчатости (рис.7).

Эти складки расположены в интервале 4–7сек, что соответствует глубинам ~10–15 км. Наиболее контрастная антиклинальная структура (купол А) затрагивает не только доюрские отложения, но и деформирует перекрывающий юрско–меловой чехол. Вверх по разрезу выраженность антиклинальной структуры уменьшается.

Наиболее значимыми аргументами в пользу того, что поднятия в нижней части разреза образованы солями являются следующие.

- Выделяемые поднятия имеют большую амплитуду – до 5 км и более.
- Тело поднятий является сейсмически полупрозрачным, отражения прерывисты и хаотически ориентированы, что типично для соляных поднятий, лишенных протяженной внутренней слоистости.

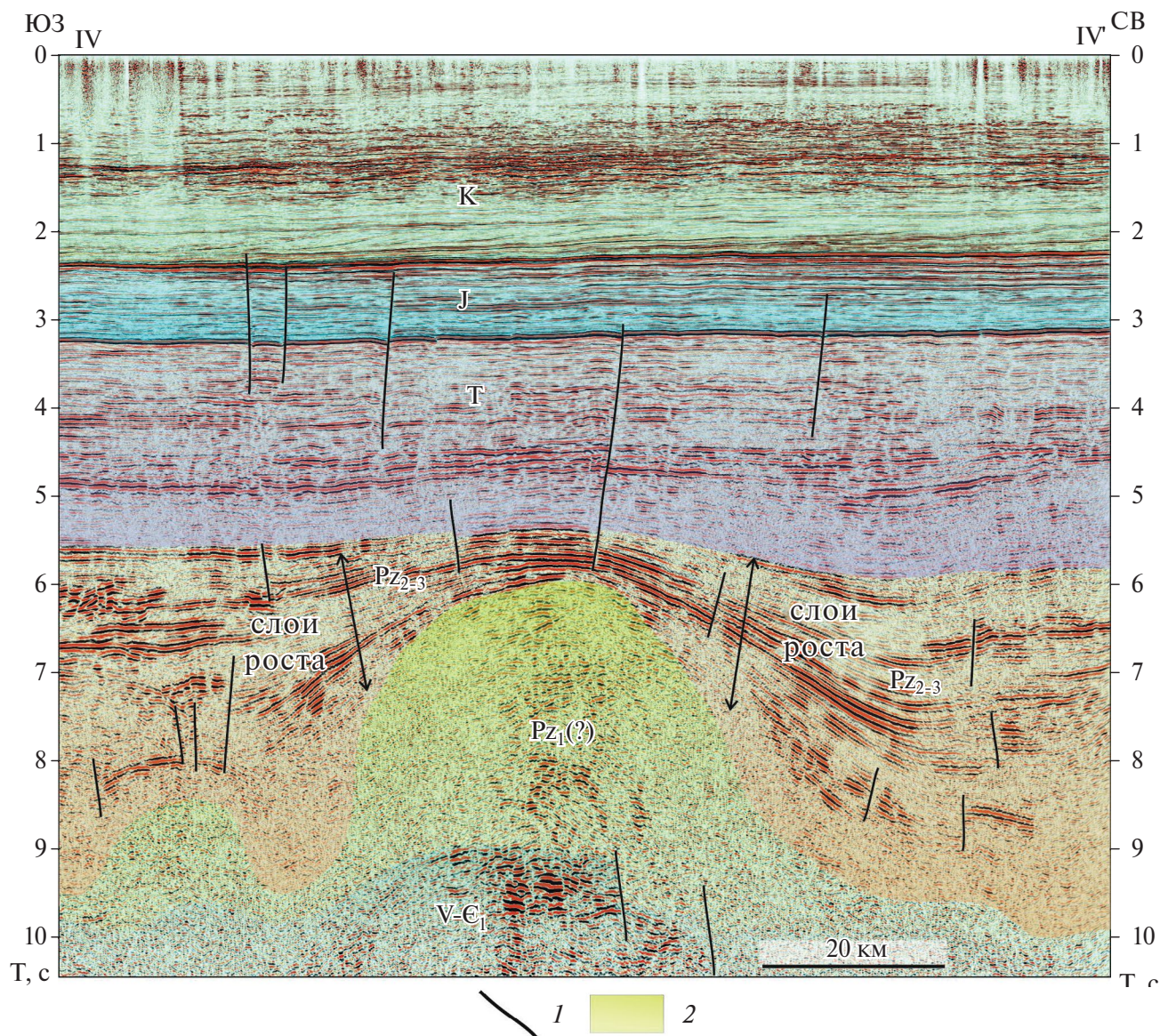


Рис. 7. Интерпретированный временной сейсмический разрез IV–IV' с выделением предполагаемого соляного диапира, сложенного нижнепалеозойскими солями.

Положение разреза IV–IV' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соли

- На крыльях этих структур отмечается сокращение толщины и выклинивания прилегающих отложений. Вариации толщин межселевых отложений представляют собой слои роста или галокинетические последовательности, которые фиксируют геохронологическую динамику роста соляных диапиров.

- Над наиболее контрастными соляными поднятиями выделяются системы радиальных разломов, которые затрагивают юрско–меловые отложения. Их существование свидетельствует о росте структур в мезозойское время.

- Данный район характеризуется умеренно отрицательными значениями гравитационного поля. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые высококорельефные поднятия не являются горстами фундамента или поднятиями магматической природы.

Отмеченные черты строения соляных криптодиапиров отчетливо выражены на сейсмическом разрезе, пересекающем Гыданский полуостров (см. рис. 7).

Слои роста на флангах рассматриваемого соляного диапира расположены в интервале 6–8 сек, что соответствует глубинам ~12–17 км.

Наличие слоев роста или галокинетических последовательностей, а также разломов в юрско-меловых отложениях отличает соляные структуры от горстовых поднятий или внедрений магматических тел. Образование последних, как правило, связано с дискретными фазами тектонической активности. Для них не характерны наблюдаемые син-кинематические слои роста в широком стратиграфическом диапазоне и разломы в более молодых слоях.

При соляных деформациях, инверсия плотности соли по сравнению с перекрывающими отложениями, приводит к продолжительному росту диапиров. Подвижность соляных структур зависит от внешних геодинамических условий. Фазы ускоренного роста зачастую связаны с этапами растяжения и сжатия осадочного чехла, которые приводят к образованию разломов и активизации диапиризма [35].

Морфологически сходную с соляными диапирами складчатость могут создавать глиняные диапиры [35]. Однако глиняный диапиризм распространен, преимущественно, в зонах лавинного накопления высоко-обводненных глинистых осадков. Быстрое погружение осадков таких впадин затрудняет отток флюидов, что приводит к образованию зон аномальных пластовых давлений и формированию глиняных диапиров.

Такие структуры широко распространены во впадинах подобных Южно-Каспийскому осадочному бассейну. Осадконакопление в этом бассейне происходило в условиях стремительного погружения за счет массового поступления тонко-обломочного материала сносимого палео-Волгой и другими реками.

Подобные геологические условия не свойственны раннепалеозойским шельфовым бассейнам периферии Сибирской платформы. В палеозое эти районы находились в низких широтах, где происходило накопление, преимущественно, карбонатно-эвапоритовых осадков в обстановке мелководного теплого моря [23]. Следовательно, образование рассматриваемых глубинных поднятий за счет глиняного диапиризма крайне маловероятно.

КОЛЬЦЕВЫЕ ИНВЕРСИОННЫЕ СТРУКТУРЫ

Дополнительным своеобразным аргументом в пользу наличия соляных диапиров в палеозойских отложениях Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба является широкое распространение в их пределах субвертикальных

кольцевых инверсионных структур. Эти структуры в Западной Сибири впервые были установлены по данным сейсморазведки в 1980-х гг. [12]. В настоящее время выявлено около 60-ти таких структур [6]. Многие из них разбурены и содержат месторождения нефти и газа. Диаметр подобных структур достигает 10 км и более. Характерное сейсмическое выражение кольцевой инверсионной структуры этого типа можно видеть на примере Находкинского месторождения (рис. 8).

Кольцевые инверсионные структуры в верхней части меловых отложений представляют собой изометричные антиклинальные складки. Ниже в юрско-нижнеокомских толщах им отвечают прогибы, нарушенные системами разломов. На сейсмических разрезах рельефность прогибов в нижних горизонтах мезозойских отложений увеличивается с глубиной. С наибольшей полнотой описание этих структур приведено в работах специалистов ОАО «Башнефтегеофизика» [1, 5, 6].

В некоторых изученных кольцевых структурах отмечается значительная изменчивость интервальных сейсмических скоростей, что в ряде случаев создает различия в морфологии этих структур во временной и глубинных областях [6]. Это влияет на морфологию этих образований, но, в большинстве случаев не изменяет их инверсионную структуру [5, 6]. В настоящее время не имеется общепринятого объяснения причин, порождающих формирование инверсионных кольцевых структур. По существующим представлениям формирование кольцевых структур связано с различными явлениями. К их числу относятся флюидалные потоки из глубинных слоев земной коры и мантии, дифференциальное уплотнение литологически разнородных отложений, комбинации разломных деформаций [5, 8, 10, 12, 15].

Рассматривая образование кольцевых инверсионных структур, отметим их определенную общность с субвертикальными зонами дезинтеграции слоистых толщ, перекрывающих карбонатно-эвапоритовые комплексы. Такие зоны известны в Волго-Уральском бассейне, Западно-Канадском бассейне, в бассейне Персидского залива, в некоторых бассейнах Китая и других районах мира [30, 33, 42, 44]. Имеющиеся данные показывают, что эти зоны есть в Западной Сибири [28].

Как правило, возникновение таких зон связано с карстованием глубокозалегающих карбонатных и эвапоритовых отложений под воздействием циркуляции агрессивных пластовых вод. При этом происходит сокращение объема породы за счет ее

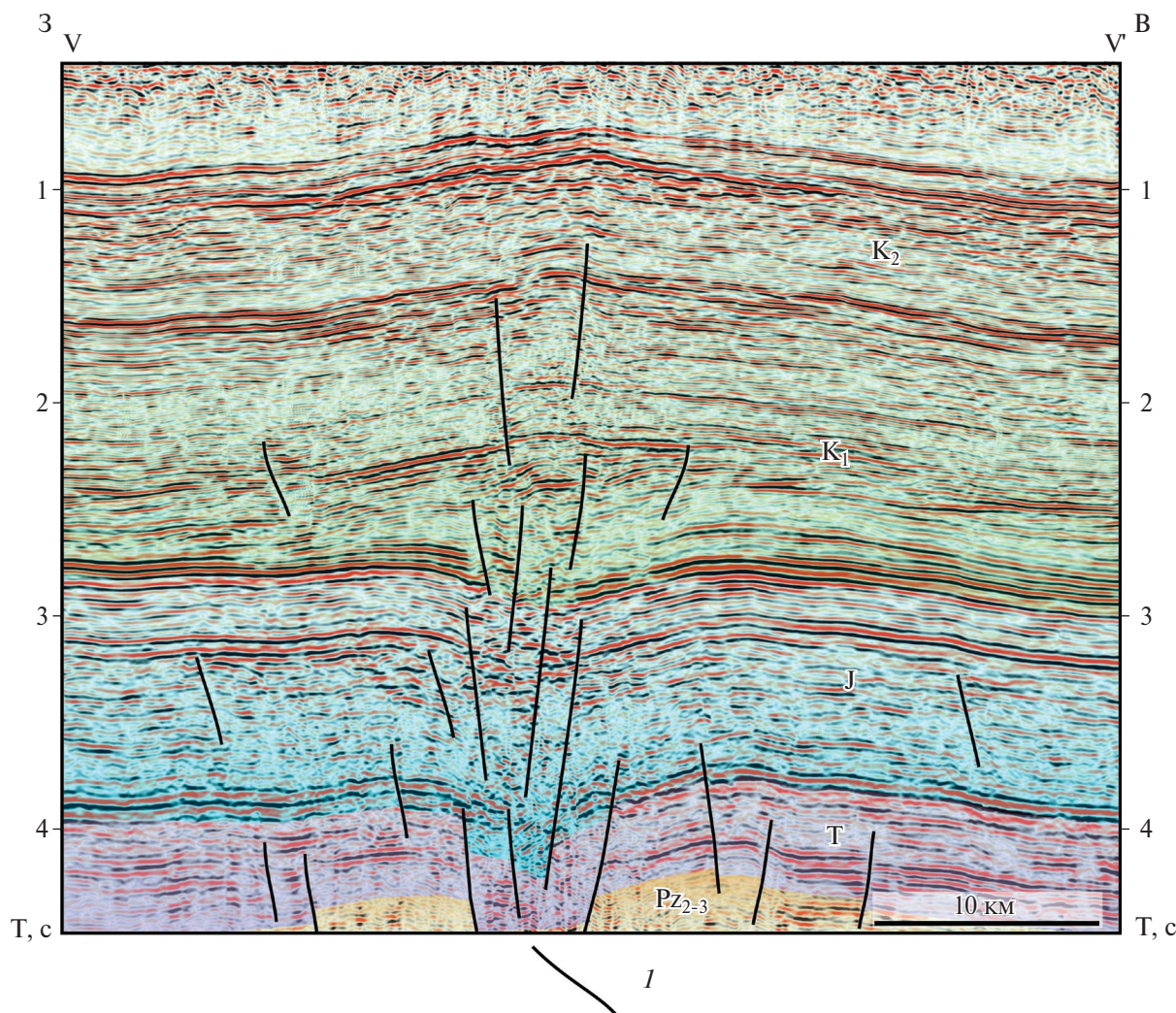


Рис. 8. Интерпретированный временной сейсмический разрез V–V' кольцевой инверсионной структуры Находкинского месторождения.

Положение разреза V–V' – см. рис. 1.

I – разлом

частичного растворения, а также доломитизации известняков. Представление о строении таких образований в Тимано-Печорском бассейне дают данные интерпретации сейсморазведки 3D (рис. 9).

Этот пример показывает существование зоны карстования визейско–нижнепермских отложений, перекрытых пермскими терригенными отложениями, в пределах гряды Чернышева Тимано-Печорского бассейна. Здесь карстованию в наибольшей степени подвержены карбонатно-ангидритовые отложения серпуховского яруса. На горизонтальном срезе сейсмического куба амплитуд в глубинной области зоне карстования отвечают кольцевые структуры, которые представляют собой карстовые воронки, диаметр наиболее крупных воронок достигает 2 км (см. рис. 9, а).

На разрезе показано сейсмическое выражение закарстованного интервала (см. рис. 9, б). В этом интервале резко изменяются толщины отложений серпуховского яруса, выделяются многочисленные внутриформационные разломы небольшой амплитуды.

Образцы керна из этих отложений содержат крупные каверновые пустоты, связанные с выщелачиванием. Над зоной карстования в перекрывающих отложениях существует прогиб (карстовая воронка), глубина которого составляет ~200 м. Выраженность этого прогиба сокращается вверх по разрезу. Это отражает постепенное затухание процесса карстования и проседания отложений над закарстованным интервалом разреза. Слои подстилающие интервал карстования залегают полого. Это

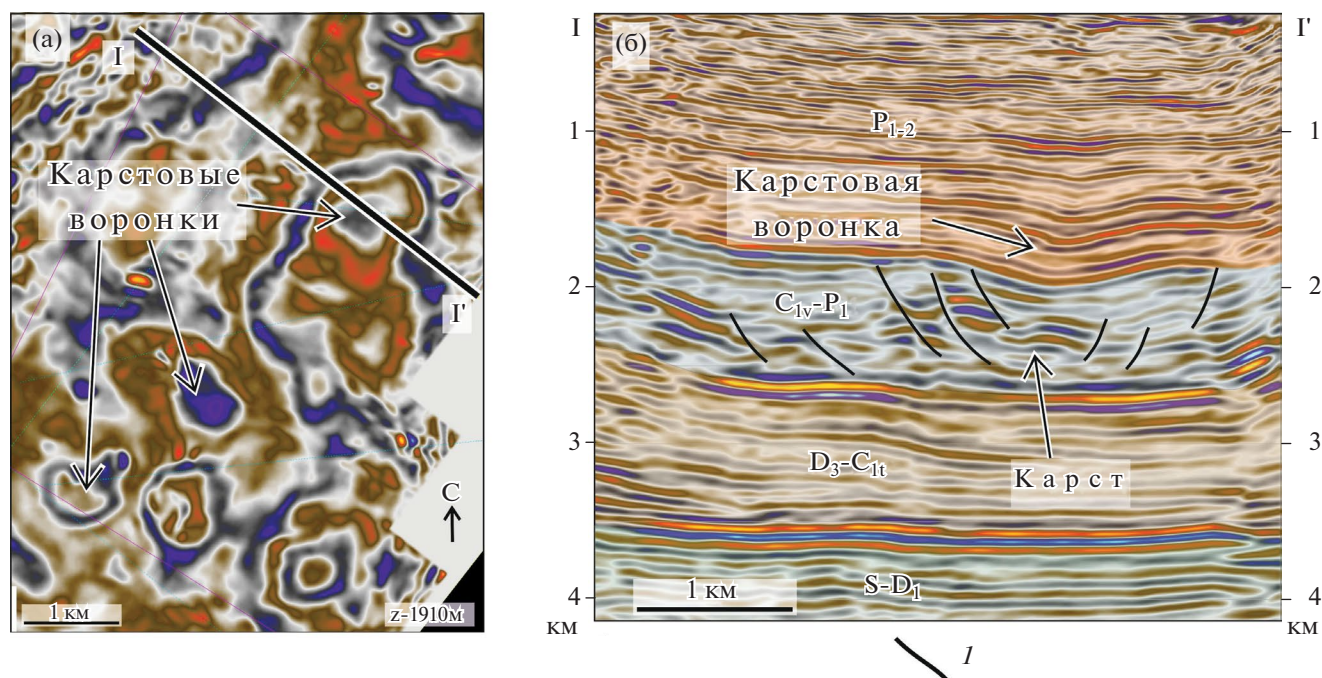


Рис. 9. Сейсмическое выражение зон карстования в визейско–нижнепермских отложениях Поварницкого поднятия Тимано-Печорского бассейна.

(а) – горизонтальный срез сейсмического куба амплитуд в глубинной области, демонстрирующий кольцевые карстовые воронки;

(б) – интерпретированный сейсмический разрез по линии I–I' через зону карстования. Данные 3D в глубинной области.

На (а) показано положение разреза I–I'.

I – разлом

свидетельствует о внутриформационном карстовом происхождении прогиба в пермских отложениях.

Карстование создает зоны обрушения в перекрывающих осадочных толщах. Это явление может объяснить происхождение зон погружения в нижней части мезозойского плитного чехла Западной Сибири. Однако оно не объясняет природу последующих инверсионных движений, которые приводят к образованию антиклиналей в меловых слоях. Кроме этого, зоны карстования карбонатов и эвапоритов создают многочисленные, но небольшие прогибы. Их размеры в поперечнике, как правило, не превышают 1–2 км. Однако инверсионные кольцевые структуры в рассматриваемом регионе на порядок крупнее – до 10 км в диаметре и более. Седоательно, образование карста может быть только частью более крупного и продолжительного процесса образования инверсионных кольцевых структур.

Интерпретация региональных сейсмических профилей с большой глубиной записи позволяет связывать кольцевые инверсионные структуры с палеозойскими криптодиапирами. На фрагменте

сейсмического регионального разреза, пересекающего северное продолжение Западно-Сибирского бассейна в Южно-Карской впадине, интерпретируется инверсионная кольцевая аномалия, которая подстилается крупным, предположительно, диапировым поднятием (рис. 10).

В обоснование диапировой природы поднятия в основании кольцевой инверсионной структуры заложены основные диагностические признаки этих структур:

- большая амплитуда поднятия;
- сейсмическая прозрачность тела диапира;
- слои роста на ее флангах;
- система радиальных разломов в перекрывающих отложениях;
- изометричная форма поднятий в плане;
- пониженные значения гравитационного поля.

Наличие инверсионной антиклинали в верхней части разреза объясняется развитием соляного диапира с переменной скоростью, что характерно для структур этого типа [35].

По-видимому, формирование инверсионной антиклинали обусловлено возобновившимися восхо-

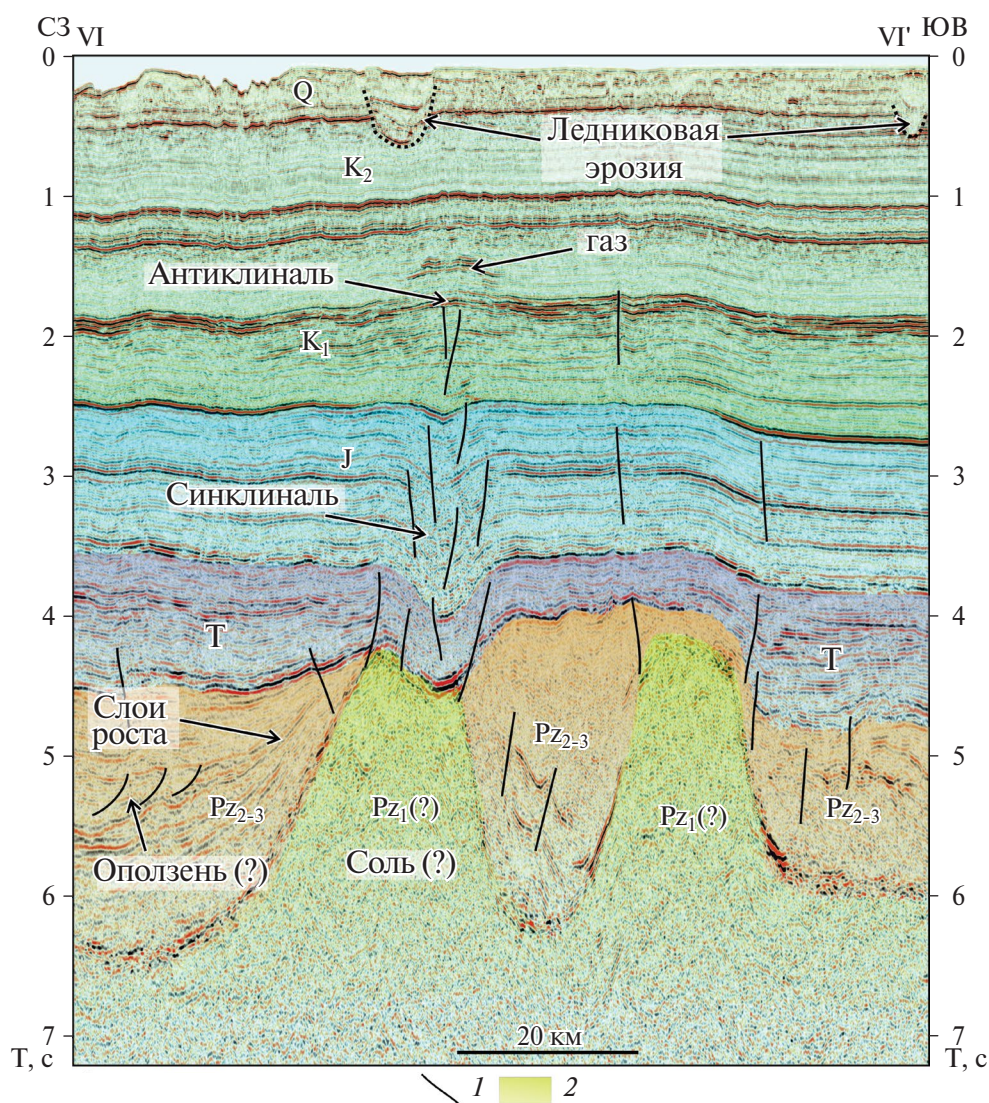


Рис. 10. Интерпретированный временной сейсмический разрез VI–VI', пересекающий кольцевую инверсионную структуру в акватории Карского моря, акваториальное продолжение Западно-Сибирского бассейна.

Положение разреза VI–VI' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соль

дьящими подвижками масс соли в мелу–кайнозой. Это произошло после образования синклинали в юрско–неокомском интервале плитного чехла.

Примером реактивации соляного диапира древнего заложения является диапир месторождения Нордвик (см. рис. 5). Вероятно, что рост диапиров, обеспечивавших их инверсионное развитие был усилен внутриплитными деформациями раннего мела и кайнозоя. Вызванный этими деформациями рост соляных диапиров привел к поднятию перекрывающих толщ.

Реконструкция формирования инверсионной кольцевой структуры предполагает продолжительное стадийное развитие (рис.11).

Предполагается, что после накопления палеозойских отложений, содержащих соленосную толщу (стадия А), бассейн осадконакопления подвергся растяжению в триасе (стадия Б) (см. рис. 11).

В пользу существования в триасе условий растяжения свидетельствует рифтогенез, происходивший в это время [19, 26]. Растяжение способствовало росту диапиров за счет перетока пластичных солей в зоны минимальных давлений, приуроченных к разломам сбросового типа – такой процесс формирования диапиров в зонах растяжения широко распространен во многих регионах мира [35].

Формирование диапиров в условиях рифтогенеза является аналогом рифтового процесса,

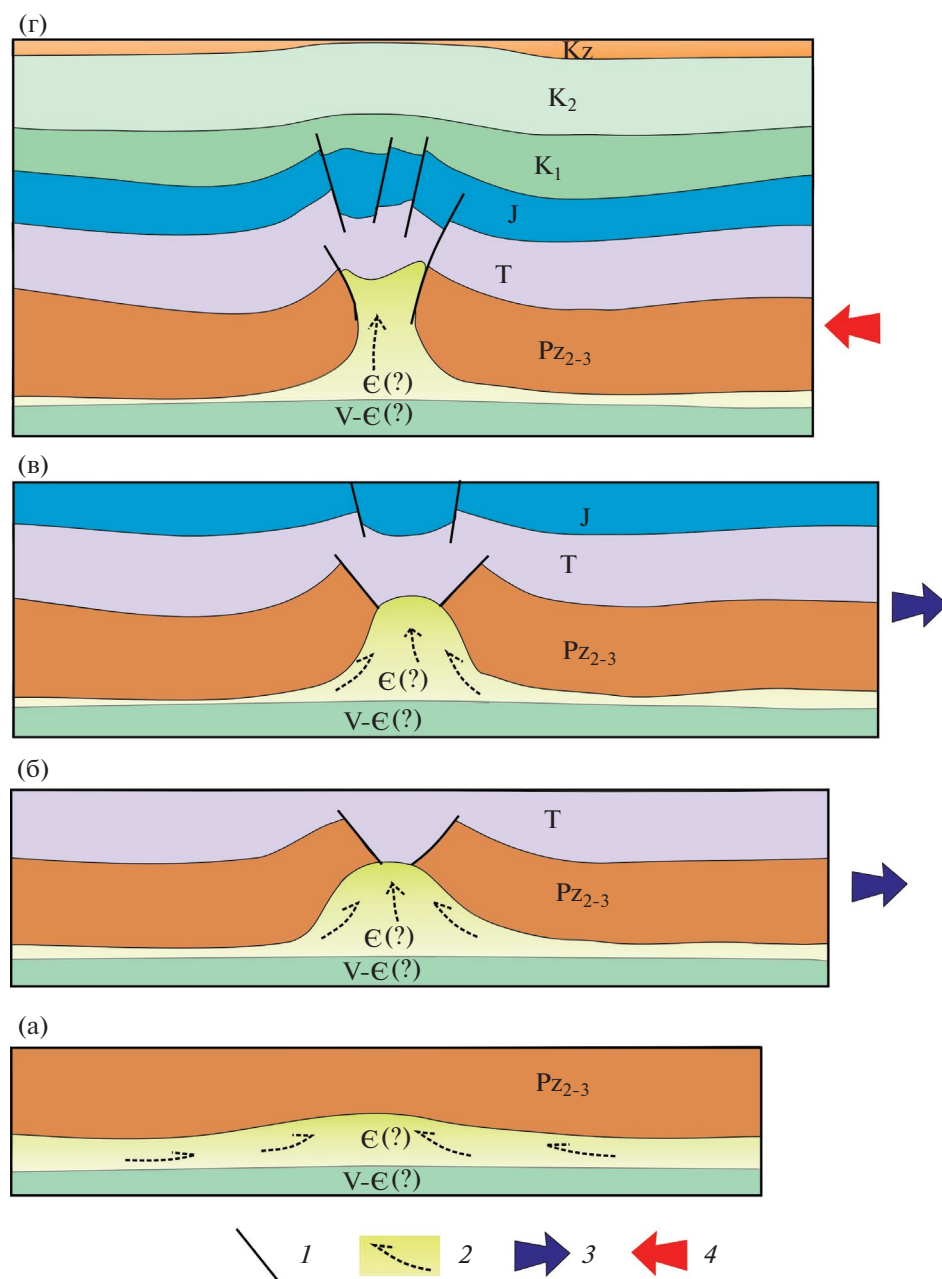


Рис. 11. Схема стадийности формирования инверсионной кольцевой структуры над соляным диапиром.

(а) — накопление солей;

(б) — рост соляного диапира и образования сводового грабена в условиях растяжения;

(в) — новая фаза роста диапира, продолжение развития сводового грабена;

(г) — структурная инверсия, формирование антиклинальной структуры над реактивированным диапиром в условиях сжатия.

1 — разлом; 2 — направления перемещения мобильных солей; 3 — растяжение;

4 — сжатие

вызванного подъемом магмы, в миниатюрном масштабе. Структурное отличие состоит в том, что соляные диапиры имеют преимущественно изометричные формы. В подобных условиях над соляным диапиром образуется прогиб, разбитый

радиальной системой разломов. Пример сейсмического выражения подобной структуры можно видеть на сейсмическом разрезе, расположенном в северо-восточной части Северо-Карского осадочного бассейна [14, 24] (рис.12).

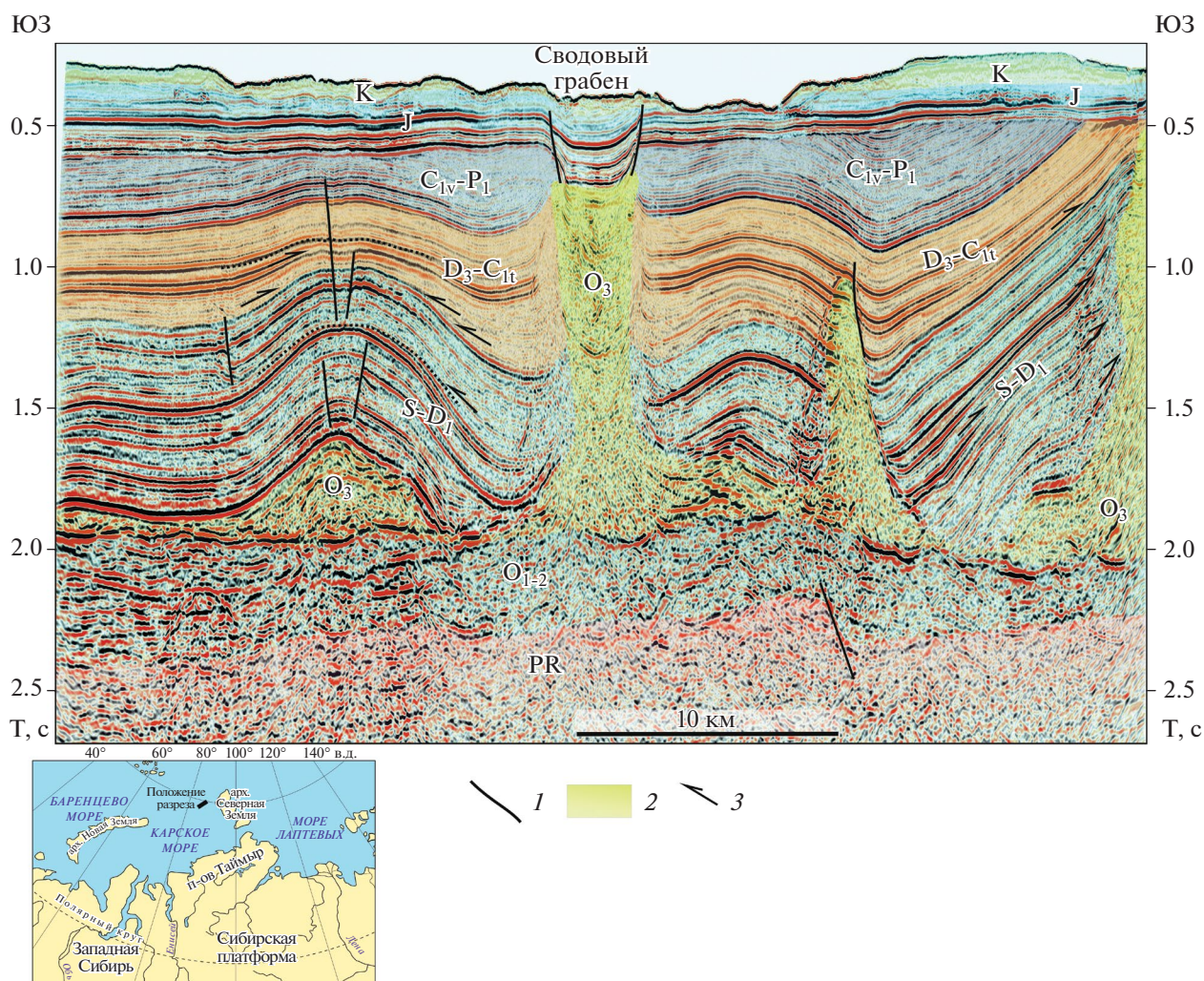


Рис. 12. Интерпретированный временной сейсмический разрез Северо-Карского бассейна с выделением соляных диапиров.

На врезке: показано положение разреза.

1 – разлом; 2 – соль; 3 – сейсмическое налегание

Структура растяжения (сводовый грабен) выделяется над крупным соляным диапиром в центральной части разреза. Возможно, что погружение сводового грабена могло быть дополнительно усилено растворением эвапоритов в приповерхностных условиях.

Последующий рост диапира в юрское время способствовал расширению сводового грабена над ним (см. рис. 11, стадия (в)).

В результате формировалась синклиналь, выраженная в юрских отложениях. Структурная инверсия, синхронная с верхоянской складчатостью в раннем мелу, вызвала внутриплитные деформации сжатия.

Это реактивировало рост диапира, способствовало экструзии соли и вызвало общий подъем

надсолевых отложений. Судя по строению известных инверсионных кольцевых структур, величина этого подъема не превышала глубину погружения на предыдущем этапе в триасе и юре. В результате влияния этих процессов в нижних горизонтах мезозойских отложений сохранилась остаточная синклинальная структура, в то время как над ней была сформирована куполообразная антиклиналь. Это определило наблюдаемое инверсионное строение кольцевой структуры (см. рис. 11, стадия (г)).

Некоторое дальнейшее усложнение структурного плана инверсионных структур могло быть связано с новейшим временем, когда произошло удаление ледниковой нагрузки. На сейсмическом разрезе Северо-Карского бассейна наблюдаются

крупные эрозионные врезы, вероятно, связанные с ледниковой эрозией (см. рис. 11).

Это способствовало образованию разломов и газовых трубок. Рост соляных структур в условиях удаления ледниковой нагрузки установлен в ряде районов мира [37].

Локализация кольцевых инверсионных структур над соляными диапирами могла быть дополнительно стимулирована повышенным тепловым потоком над ними, что обусловлено высокой теплопроводностью солей, что способствовало локальному росту давления и подвижности флюидов [35]. Интерпретация высокоинформативных сейсмических данных дает основание полагать, что в кольцевых инверсионных зонах присутствуют комплексы песчаных даек (песчаных инжективов) [39]. Активное перемещение флюидов вело к созданию зон аномально высоких пластовых давлений, что способствует образованию разломов и газовых трубок.

Таким образом, формирование кольцевых инверсионных структур получает приемлемое объяснение в рамках концепции, предполагающей существование в палеозойском разрезе северо-востока Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба соляных криптодиапиров. Основным условием формирования этих структур является многофазный рост соляных диапиров, отражающих изменение геодинамических условий развития исследуемого района. Принимая это объяснение, можно предположить, что область распространения этих структур указывает на ареал существования соляных диапиров в регионе исследования (см. рис.3).

ПОЛОЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СОЛЯНЫХ ТОЛЩ В РЕГИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ

Интерпретация региональных сейсмических разрезов Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба показывает, что зоны распространения соляных криптодиапиров, вероятно, охватывают значительные площади (см. рис. 3).

К ним относятся северо-восточная часть Западно-Сибирского бассейна и осевая зона Енисей-Хатангского прогиба. В этих районах по сейсмическим данным выделяются высокоамплитудные изометричные и линейные поднятия, затрагивающие широкий стратиграфический диапазон палеозойско-мезозойских отложений. Пример таких структур показан на региональном разрезе Западно-Сибирского бассейна (рис. 13).

Зона предполагаемых соляных деформаций выделяется в центральной части разреза, соответствующей приосевой зоне Западно-Сибирского бассейна. В ее пределах отмечается повышенная структурная дифференциация осадочного чехла. Здесь распространены крупноамплитудные изометричные поднятия, выраженные как в доюрских, так и юрско-меловых отложениях. Они залегают в интервале глубин от 12 до 5 км. Эти структуры интерпретируются как возможные соляные криптодиапиры длительного развития (см. рис.13).

К востоку и западу от полосы развития соляных диапиров стиль деформаций осадочного чехла существенно меняется. Восточнее в направлении складчатого обрамления Сибирской платформы происходит пологое воздымание осадочного чехла. Здесь не выделяются крупноамплитудные складчатые структуры, подобные тем, которые выделяются в центральной части бассейна.

Предполагается, что глубинное строение этой части бассейна может определяться складчато-надвиговыми деформациями, затрагивающими протерозойско-палеозойские породы. Их структурным аналогом может служить Енисейский кряж. Вышележащие юрско-меловые отложения затронуты крутопадающими разломами, которые могли принадлежать к новой генерации деформаций, а также возникать за счет транспрессионной реактивации нарушений в подстилающих отложениях.

Западная часть регионального разреза соответствует области, в пределах которой юрско-меловой чехол перекрывает палеозойское складчатое основание. Оно является элементом океанического сектора Уральского складчатого пояса, который испытал глубокую эрозию и последующее погружение. Плитный юрско-меловой чехол в этой части бассейна лишен крупных складчатых деформаций. Здесь выделяются преимущественно субвертикальные разрывы небольшой амплитуды, вызванные внутриплитными деформациями (см. рис.13).

В Енисей-Хатангском прогибе наличие соляных деформаций достоверно установлено на полуострове Нордвик (см. рис. 4).

Интерпретация региональных сейсмических данных, характеризующих строение этого прогиба, показывает, что основным фактором формирования современного структурного плана осадочного чехла явилась комбинация транспрессионных и инверсионных движений. Эти движения сформировали систему валообразных поднятий, протягивающихся вдоль приосевой части прогиба (рис.14).

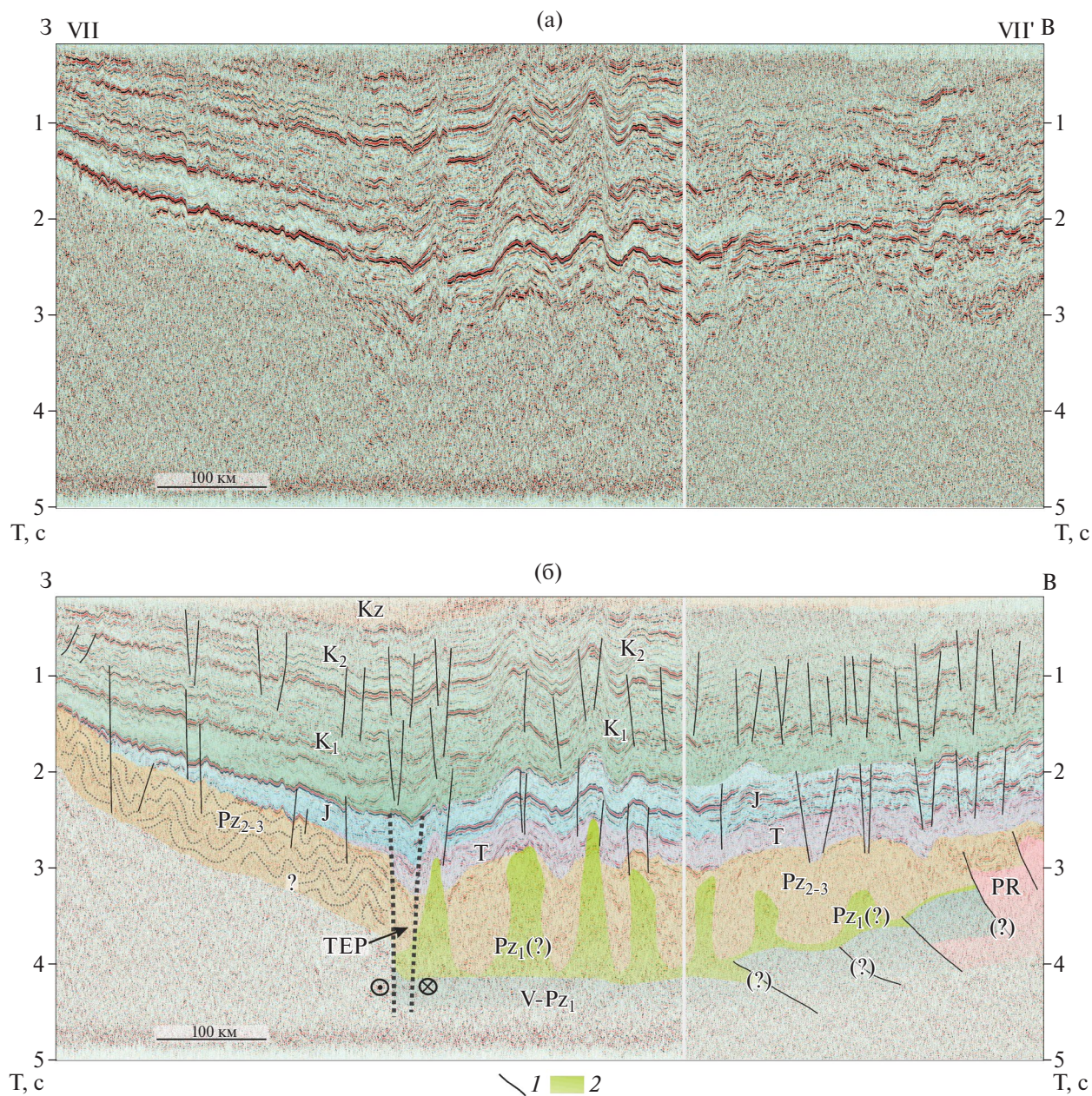


Рис. 13. Временной сейсмический разрез VII–VII' Западно-Сибирского бассейна (региональный профиль 22) (а); разрез VII–VII' с геологической интерпретацией (б).

На (б): показана (желтым) зона развития предполагаемых соляных структур в палеозойских отложениях.

Обозначено: ТЕР – Трансевразийский левосторонний разлом.

Положение разреза VII–VII' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соль

Основным механизмом складчатости здесь являлась транспрессионная инверсия листрических сбросов, которая происходила в несколько этапов [26, 40]. Последовательность этих этапов фиксируются угловыми несогласиями в разрезе мезозойских и подошве кайнозойских отложений. Структурная инверсия в условиях сжатия началась позднем

триасе и продолжилась в раннем мелу и кайнозое. По-видимому, соляные деформации в Енисей-Хатангском прогибе имеют второстепенное значение, осложняя строение инверсионных валов. К ним приурочены локальные высокорельефные складки и зоны сосредоточения разрывных деформаций в мезозойской части осадочного чехла.

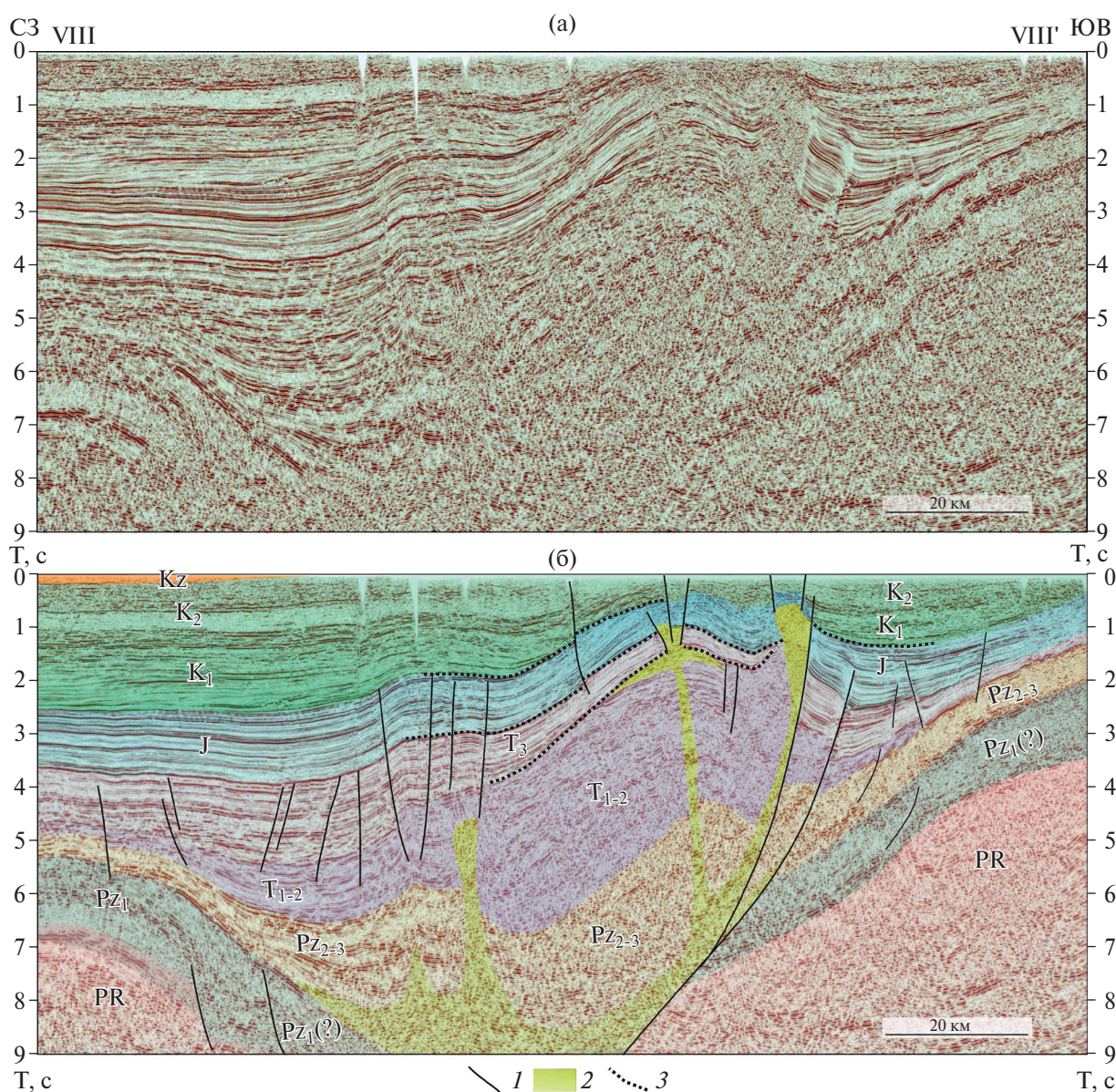


Рис. 14. Временной сейсмический разрез VIII–VIII' Енисей-Хатангского прогиба в зоне Рассохинского вала (а); разрез VIII–VIII' с геологической интерпретацией (б).

Положение разреза VIII–VIII' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соли; 3 – несогласие

Как показывает строение соляного диапира на полуострове Нордвик, соляные диапиры могли формироваться уже в середине палеозоя (см. рис. 3).

На это указывает появление слоев роста на крыльях соляного поднятия. В условиях сжатия и структурной инверсии соляные структуры были трансформированы узкие диапиры переменной высоты. Деформации в зонах инверсированных разломов показывают, что разломы могли служить путями перемещения солей. По некоторым из них происходила экструзия соли на поверхность (см. рис. 4).

Вероятным структурным аналогом Енисей-Хатангского прогиба является Днепровско-Донецкая впадина, в пределах которой соль играет сходную структурную роль [7].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация современных геолого-геофизических данных предполагает, что соляные деформации являются важным элементом строения и развития северо-востока Западно-Сибирского

бассейна и Енисей-Хатангского прогиба. Проведенная нами новая интерпретация глубинного строения рассматриваемого региона позволяет детализировать представления о региональном строении и нефтегазоносности этих регионов.

Региональная структура

Рассматривая распространение зон вероятных соляных деформаций в региональном структурном контексте, можно предположить, что образующие их соли накапливались на западной и северной окраинах Сибирской платформы (в современных координатах). Широкое распространение кембрийских солей в ее пределах дает основание считать, что этот же возраст могут иметь выделяемые западносибирские соли.

Это предположение согласуется с данными сейсмической интерпретации, но, принимая во внимание низкую изученность региона, оно не является однозначным. Не исключена вероятность того, что в различных районах окраины Сибирской платформы могли существовать ареалы развития солей разных возрастов.

Принимая во внимание наличие солей верхнеордовикского возраста в северо-восточной части Тимано-Печорского бассейна и Карском море, можно принять альтернативную точку зрения, согласно которой соли рассматриваемого региона тоже имеют верхнеордовикский возраст (см. рис. 12). При этом они могли образовывать единый рифтовый соляной бассейн, который разделен за счет последующего раскрытия Уральского океана.

В пределах Западно-Сибирского бассейна внешняя граница зоны распространения соленосных деформаций, вероятно, ограничивается Трансевразийским разломом. Этот разлом возник в позднем палеозое в ходе формирования суперконтинента Пангея [17, 26]. Эта разломная зона выражена в потенциальных геофизических полях. Она выделялась разными исследователями на основе анализа структурного развития региона [25, 26, 34]. Новые сейсмические данные дают основание полагать, что частью этой зоны является Байдарацкий разлом, в зоне которого предполагаются соляные деформации (Верхнереченский вал).

Причиной образования Трансевразийского разлома являлось взаимное косоориентированное перемещение сближающихся Восточно-Европейской и Сибирской континентальных плит в позднем палеозое (рис.15).

Наиболее выразительным проявлением деформаций вдоль этой разломной системы является коленообразный излом структурного тренда Урала—Новая Земля в районе Пай-Хоя [26, 31]. Вдоль этого разлома структуры, связанные с Сибирской платформой на востоке, граничат с коллажем дислоцированных островных дуг и микроконтинентов аккретированных к Восточно-Европейской платформе в ходе развития уральского складчатого пояса.

Деформации в зоне Трансевразийского разлома продолжали влиять на структурно-седиментационное развитие Западно-Сибирского бассейна в мезозое. Это, в частности, проявилось в фациальной зональности юрско—меловых отложений. В качестве примера приведена схематическая карта седиментационных обстановок волжского века (рис.16).

В это время в Западно-Сибирском бассейне накапливались битуминозные осадки баженовской свиты, представляющие собой основную нефтегазоматеринскую породу. Зоне Трансевразийского разлома отвечает отчетливая граница в размещении фациальных зон осадков этого стратиграфического интервала.

Данные сейсмических исследований показывают, что зона Трансевразийского разлома испытывала структурную реактивацию в меловое и кайнозойское время. На это указывает широкое распространение сдвиговых деформаций. Они выражены по данным сейсморазведки 3D в виде характерных зон развития эшелонированных кулисообразных нарушений преимущественно северо-западного простирания [13, 25, 39].

Судя по фазовому составу месторождений, Трансевразийский разлом разделяет Западно-Сибирский бассейн на преимущественную газоносную область в его северо-восточной части, и нефтеносную область — в юго-западной части бассейна (см. рис. 3).

Влияние соляных структур на нефтегазоносность

Наличие мощных палеозойских осадочных толщ на обширных площадях Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба позволяет присоединиться к мнению исследователей, которые считают, что эти отложения могли вносить значительный вклад в нефтегазообразование в их пределах [16, 27]. Морфология и геодинамика диапиризма могла влиять на пути

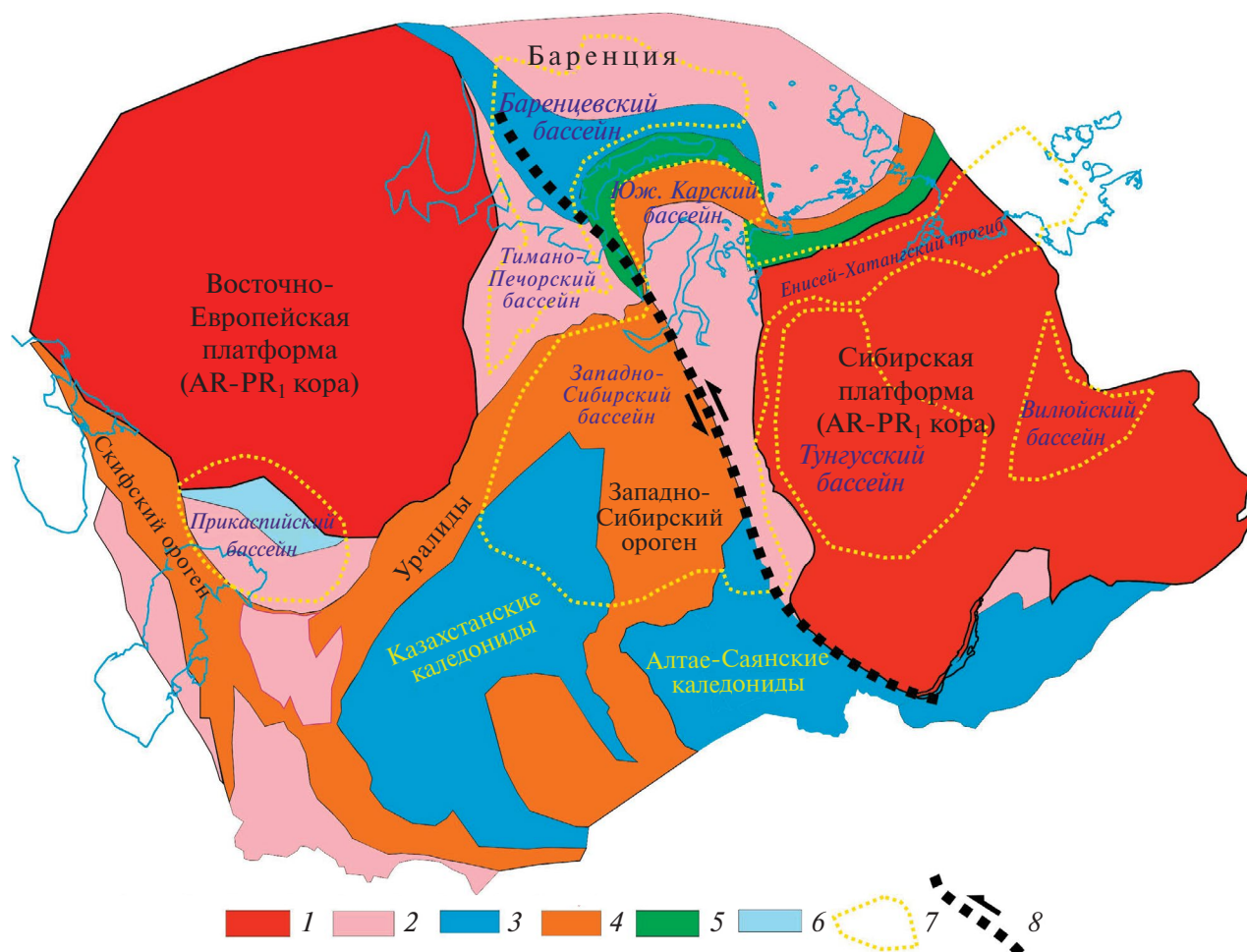


Рис. 15. Структурная схема центральной Евразии для конца пермского периода (по данным [41], с дополнениями).

1–5 – кора: 1 – протерозойская, 2 – неопротерозойская, 3 – кембрийско–среднедевонская, 4 – позднепалеозойская, 5 – девонская океаническая Прикаспийского бассейна; 6 – раннепалеозойские складчатые пояса; 7 – границы осадочных бассейнов; 8 – Трансевразийский разлом

миграции нефти и газа, фокусируя их потоки в зонах соляных поднятий.

Областям предполагаемого развития соляных диапиров Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба отвечают зоны преимущественной газоносности. Это вполне согласуется с тем, что палеозойские отложения соленосных впадин в этих районах достигли высокой степени термического преобразования, что привело к преимущественному газообразованию.

На вероятную связь глубинных криптодиапиров и нефтегазовых месторождений рассматриваемого района указывает высокая продуктивность кольцевых инверсионных структур. Интерпретированный сейсмический разрез уникального Заполярного газового месторождения показывает предполагаемый глубинный криптодиапир, над

которым в сеноманских отложениях находится крупная залежь газа (см. рис. 17). С залежью газа связана сейсмическая амплитудная аномалия (амплитуда 1.1–1.2 сек).

Особенностью зон распространения вероятных соляных структур является продуктивность в широком стратиграфическом диапазоне и многозалежность месторождений. Например, на Мессояхском месторождении установлена продуктивность 29 интервалов в юрско–меловом разрезе [28]. Это контрастирует с основными нефтегазоносными районами Центрального Приобья Западной Сибири, где нефтеносность приурочена к сравнительно узкому стратиграфическому интервалу неокома. Многопластовость месторождений, вероятно, отражает большой объем поступления нефти и газа из погруженных палеозойских толщ.

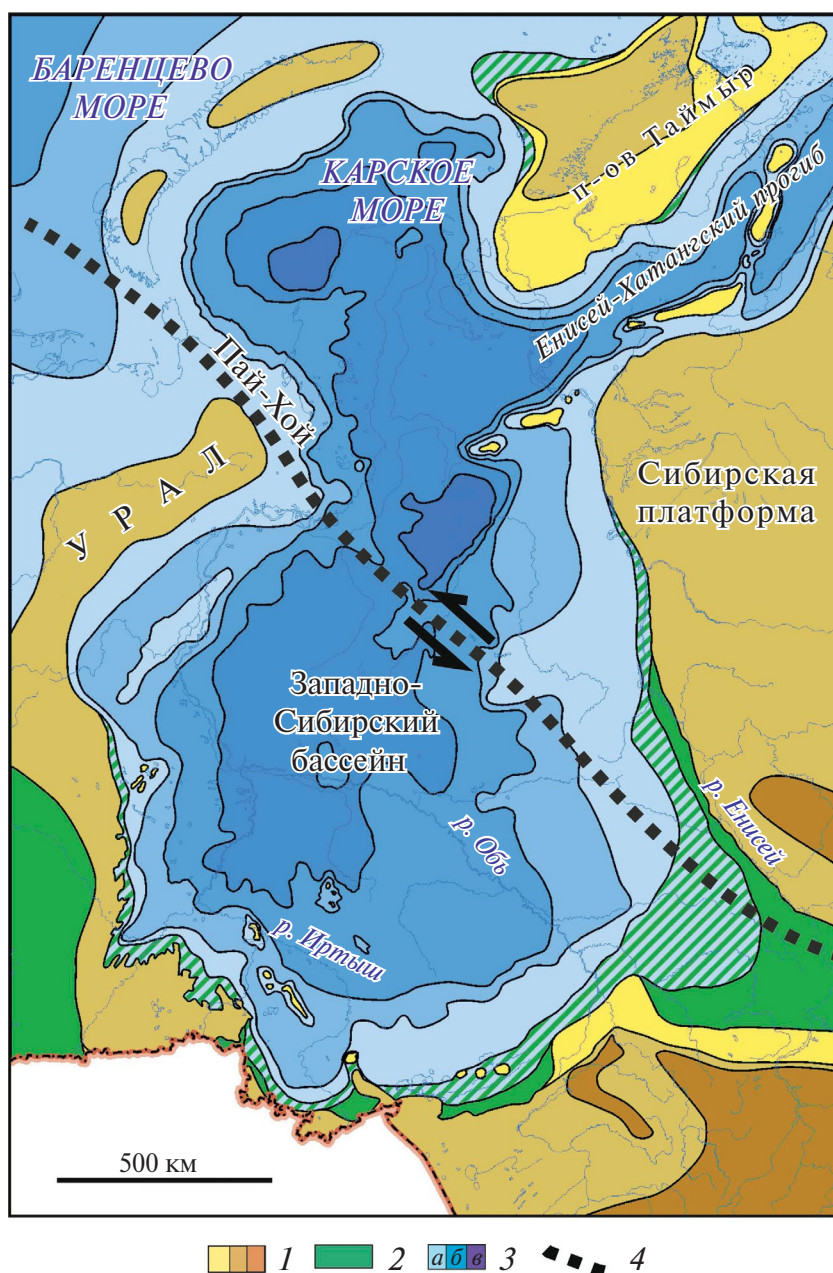


Рис. 16. Схематическая карта седиментационных обстановок волжского века (по данным [20] с дополнениями). 1 — суша (предгорья, горные сооружения); 2 — низменности; 3 — море: а — литораль, б — мелководье, в — глубоководный бассейн >400 м; 4 — Трансевразийский разлом

Сравнение структурных стилей деформаций Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба показывает, что Енисей-Хатангский прогиб был подвержен значительно более сильному воздействию компрессионной (транспрессионной) реактивации в позднем триасе и раннем мелу (см. рис. 14, см. рис. 15).

Это обстоятельство привело к формированию значительно более контрастного структурного рельефа (см. рис. 3). Вероятно, по этой причине

роль соляных деформаций в Енисей-Хатангском прогибе менее заметна.

В осевых зонах крупных антиклинальных структур зон транспрессионной реактивации Енисей-Хатангский прогиб происходила потеря целостности покровов, что вело к разрушению скоплений нефти и газа, — примером этого может служить месторождение Нордвик, в пределах которого сжатие привело выжиманию солей на дневную поверхность, по оперяющим разломам

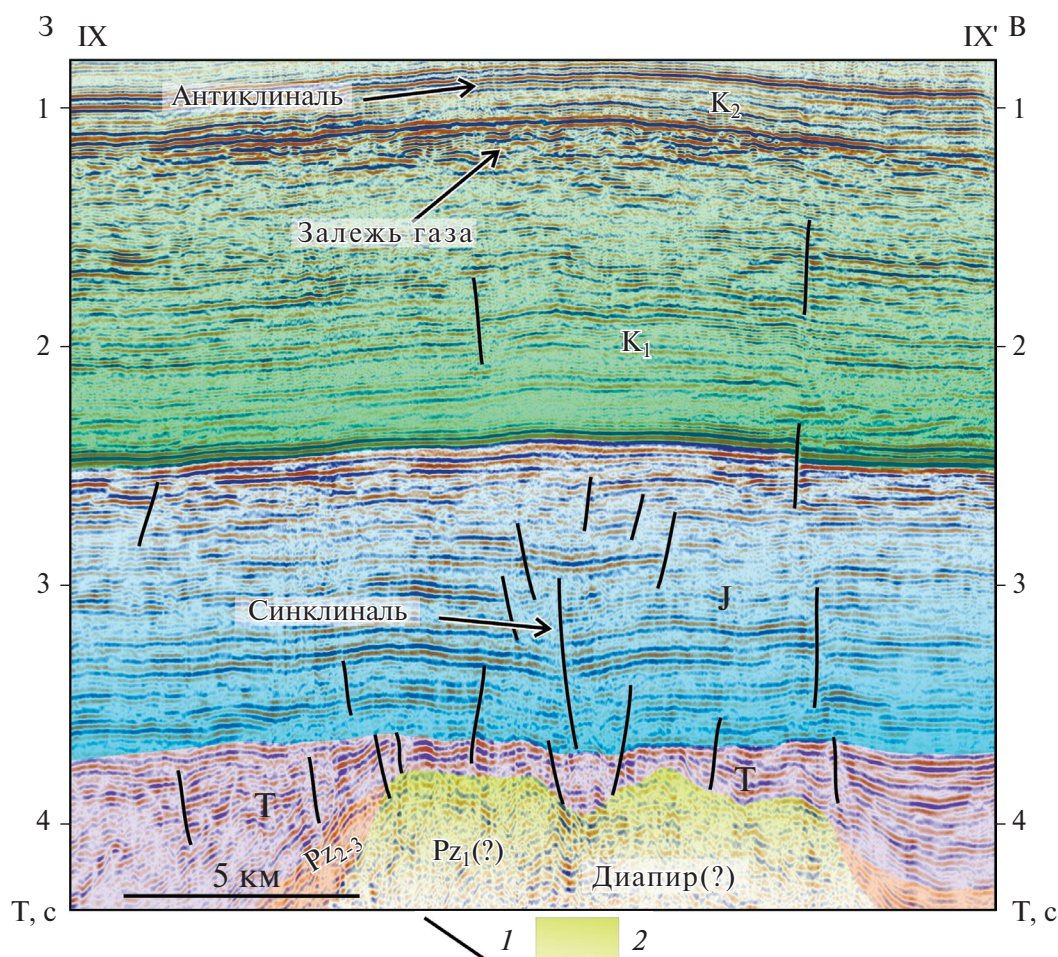


Рис. 17. Интерпретированный временной сейсмический разрез IX–IX' Заполярного газового месторождения.

Положение разреза IX–IX' – см. рис. 1.

1 – разлом; 2 – соль

нефть мигрировала в верхние горизонты осадочного чехла, где была окислена, в результате здесь существуют небольшие скопления тяжелой нефти.

ВЫВОДЫ

1. Проведенная интерпретация региональных сейсмических профилей, характеризующих строение Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба до глубин 10–20 км, в совокупности с дополнительной геологической информацией свидетельствует о том, что важную роль в строении этого региона играли соляные криптодиапиры.

Их распространение предполагается на северо-востоке Западной Сибири и Енисей-Хатангском прогибе. Признаками соляных диапиров являются: большая высота (до 5 км и более), сейсмическая прозрачность, наличие слоев роста на крыльях

криптодиапиров, существование систем радиальных разломов в перекрывающих отложениях, изометричные формы поднятий, пониженные значения гравитационного поля.

2. Соляной диапиризм в погруженных районах северо-восточной части Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба объясняет существование кольцевых инверсионных структур в надсоляном осадочном чехле. Их формирование получает логичное истолкование в рамках концепции, предполагающей, что они являются результатом стадийного развития соляных диапиров, испытавших изменения геодинамического режима растяжения на сжатие.

3. Предполагаемый ареал распространения соляных деформаций дает основание считать, что соли накапливались на западной и северной окраинах Сибирской платформы (в современных координатах). Они, вероятно, принадлежали обширной

области соленакопления, которая включала также южную часть Сибирской платформы.

Западной границей зоны распространения этих солёных отложений могла являться зона Трансевразийского разлома, которая отделяет складчатые Уралы от Сибирской платформы и спаянных с ней тектонических блоков. Зона Трансевразийского разлома возникла в конце палеозоя как левосторонний сдвиг, в неокме и кайнозое она испытала реактивацию под воздействием внутриплитных деформаций синхронных с Верхоянской складчатостью.

4. Наличие солёного палеозойского чехла в северо-восточной части Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангском прогибе повлияло на нефтегазоносность этих районов. Миграция значительных объемов газа из погруженных палеозойских отложений в юрско-меловой плитный чехол объясняет преимущественное распространение в этих районах залежей газа, а также многозалежность многих месторождений.

Приведенная гипотеза о наличии соляных криптодиapiров в северо-восточной части Западно-Сибирского бассейна и Енисей-Хатангского прогиба основана, главным образом, на результатах интерпретации сейсмических данных, а также ограниченного объема материалов электроразведки и потенциальных полей. Она, безусловно, нуждается в проверке бурением, а также привлечения дополнительных методов исследования. Это позволит получить намного более определенное понимание глубинного строения этих бассейнов. Прогнозируемое наличие соляных диapiров не исключает существования и иных механизмов деформаций в доюрских отложениях района исследования.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность А.П. Афанасенкову (АО «Росгеология», г. Москва, Россия), В.А. Балдину (АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа, Россия), Г.Н. Гогоненкову (ФГБУ ВНИГНИ, г. Москва, Россия), И.П. Короткову (ООО «Геофизические Системы Данных», г. Москва, Россия), А.М. Никишину (МГУ, г. Москва, Россия) за плодотворные дискуссии, касающиеся различных аспектов сейсмической интерпретации и геологии Западной Сибири и Енисей-Хатангского прогиба. Автор благодарит ООО «Северо-Уральская нефтегазовая компания» за техническую поддержку при выполнении исследования. Автор благодарен рецензенту Г.А. Беленицкой (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Россия)

и рецензенту А.М. Никишину (МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия) за полезные комментарии и редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования проведены без привлечения финансирования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адиев Я.Р., Гатауллин Р.М. Кольцевые структуры — «газовые трубы» севера Западной Сибири // Геофизика. 2003. Спец. выпуск к 70-летию «Башнефтегеофизики». С. 23–33.
2. Астахов В.И. Четвертичная гляциотектоника Урало-Сибирского севера // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 12. С. 1692–1708.
3. Афанасенков А. П., Никишин А. М., Унгер А. В., Бордюнов С. И., Луговая О. В., Чикишев А. А., Яковичина Е. В. Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. 2016. №2. С. 23–42.
4. Афанасенков А.П., Яковлев Д.В. Применение электроразведки при изучении нефтегазоносности Северного обрамления Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 7. С. 1032–1052.
5. Балдин В.А., Мунасыпов Н.З., Писецкий В.Б. История изучения инверсионных кольцевых структур в Западной Сибири // Геофизика. 2023, Т. 3. С. 13–20. Doi: 10.34926/geo.2023.59.93.002
6. Балдин В.А., Мунасыпов Н.З., Писецкий В.Б. Особенности строения и перспективы нефтегазоносности инверсионных кольцевых структур мезозоя на севере Западной Сибири // Геофизика. 2023. №. 3. С. 21–29. Doi: 10.34926/geo.2023.61.96.003
7. Барташук А.В. Коллизионные деформации Днепровско-Донецкой впадины. — Ч. 1. — Тектоника Западно-Донецкого грабена // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020а. Т.15. №3. Doi: http://www.ngtr.ru/rub/2020/28_2020.html
8. Бембель Р. М., Мегеря В. М., Бембель М. Р. Геосоли-тонная модель формирования залежей углеводородов на севере Западной Сибири // Геофизика. 2010. № 6. С. 9–17.
9. Бородин В.Н., Смирнов О.А., Лукашов А.В., Плавник А.Г., Тепляков А.А. Седиментологическая модель меловых отложений полуострова Ямал на базе комплекса геолого-геофизических исследований // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2022. Т.17. № 1. Doi: http://www.ngtr.ru/rub/2022/6_2022.html
10. Бородин В.Н., Кислухин В.И., Нестеров И.И. (мл.), Федоров Ю.Н. Инверсионные кольцевые структуры как один из критериев прогноза // Горные ведомости. 2006. № 10. С. 24–39.

11. Брехунцов А.М., Монастырев Б.В., Нестеров И.И. Скоробогатов В.А. Нефтегазовая геология Западно-Сибирской Арктики. — Тюмень: Геодата, 2020, 464 с.
12. Гиришгорн Л.Ш. Дисгармоничные поднятия в осадочном чехле севера Западно-Сибирской плиты // Советская геология. 1987. № 4. С. 63–71.
13. Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. №3. С.3–11.
14. Долгунов К.А., Мартиросян В.Н., Васильева Е.А., Сапожников Б.Г. Структурно-тектонические особенности строения и перспективы нефтегазоносности северной части Баренцево-Карского региона // Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 70–83.
15. Загоровский Ю.А. Роль флюидодинамических процессов в образовании и размещении залежей углеводородов на севере Западной Сибири. — Дис. ... к.г.-м.н. — Тюмень, ТИУ, 2017. 201 с.
16. Запывалов Н.П. Нефтегазовый потенциал палеозойского фундамента Западной Сибири (прогнозы и реальность) // Нефтяное хозяйство. 2004. № 7. С. 76–80.
17. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. — М.: Недра, 1990. Кн. 1. 328 с.
18. Иосифиди А.Г., Храмов А.Н. К истории развития надвиговых структур Пай-Хоя и Полярного Урала: палеомагнитные данные по раннепермским и раннетриасовым отложениям // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т.5. №2. Doi: http://www.ngtp.ru/rub/4/21_2010.pdf
19. Конторович А.Э., Сурков В.С. Западная Сибирь. — В кн.: Геология и полезные ископаемые России. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 477 с.
20. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Никитенко Б.Л., Попова Н.И., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 745–776.
21. Конторович В.А., Филипов Ю.Ф. Анализ геолого-геофизических данных с целью уточнения геологического строения, оценки перспектив нефтегазоносности и выработки рекомендаций по лицензированию недр домезозойских комплексов в Предьенисейской зоне Западно-Сибирской равнины. — Новосибирск: ИГНГ, 2004. 289 с.
22. Корнилюк Ю.И., Кочетков Т.П., Емельянец Т.М. Нордвик-Хатангский нефтеносный район (краткий очерк геологии и нефтеносности). — В кн.: Недра Арктики. — Под ред. В.А. Обручева — Л.: Главсевморпуть. 1946. С. 15–73.
23. Никишин А.М., Соборнов К.О., Прокопьев А.В., Фролов С.В. Тектоническая история Сибирской платформы в венде—фанерозое // Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология. 2010. № 1. С. 3–16.
24. Никишин В.А. Эвапоритовые отложения и соляные диапиры прогиба Урванцева на севере Карского моря // Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология. 2012. № 4. 54–57.
25. Смирнов О.А., Бородин В.Н. Оценка перспектив нефтегазоносности апт—альб—сеноманского комплекса полуострова Ямал севера Западной Сибири на базе сейсморазведки 2D // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2022. Т.17. №4. Doi: http://www.ngtp.ru/rub/2022/47_2022.html
26. Соборнов К.О., Якубчук А.С. Плитотектоническое развитие и формирование бассейнов Северной Евразии // Геология нефти и газа. 2006. № 2. С. С. 7–14.
27. Ступакова А.В., Соколов А.В., Соболева Е.В., Кирихина Т.А., Курасов И.А., Бордюг Е.В. Геологическое изучение и нефтегазоносность палеозойских отложений Западной Сибири // Георесурсы. 2015. Т.61. № 2. С. 63–76.
28. Харахинов В.В., Кулишкин Н.М., Шленкин С.И. Мессояхский порог — уникальный нефтегеологический объект на севере Сибири // Геология нефти и газа. 2013. Т. 5. С. 34–48.
29. Шеин В.С. Геология и нефтегазоносность России. — М.: ВНИГНИ, 2012. 848 с.
30. Broughton P.L. Breccia pipe and sinkhole linked fluidized beds and debris flows in the Athabasca Oil Sands: dynamics of evaporite karst collapse-induced fault block collisions // Can. Petrol. Geol. Bull. 2017. Vol. 65. No. 1. P. 200–234.
31. Curtis M.L., Lopez-Mir B., Scott R.A., Howard J.P. Early Mesozoic sinistral transpression along the Pail-Khoi—Novaya Zemlya fold—thrust belt, Russia. — In: *Circum-Arctic Lithosphere Evolution*. — Ed.by V. Pease, B. Coakley, (Geol. Soc., London. Spec. Publ. 2017. Vol. 460), P. 355–370), Doi:10.1144/SP460.2
32. Deev E.V., Shemin G.G., Vernikovskiy V.A., Drachev S. S., Matushkin N. Yu., Glazyrin P.A. Northern West Siberian—South Kara Composite Tectono-Sedimentary Element, Siberian Arctic. — In: *Sedimentary Successions of the Arctic Region and Their Hydrocarbon Prospectivity*. — Ed.by S.S. Drachev, H. Brekke, E. Henriksen, T. Moore, (Geol. Soc. London. 2022. Mem. No.57), Doi: <https://doi.org/10.1144/M57-2021-38>
33. Hendry J., Burgess P., Hunt D., Janson X., Zampetti V. Seismic characterization of carbonate platforms and reservoirs: an introduction and review. — In: *Seismic Characterization of Carbonate Platforms and Reservoirs*. — Ed.by J. Hendry, P. Burgess, D. Hunt, X. Janson, V. Zampetti, (Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2021), 509p. Doi: <https://doi.org/10.1144/SP509-2021-51>
34. Herrington R.J., Puchkov V.N., Yakubchuk A.S. A reassessment of the tectonic zonation of the Uralides: implications for metallogeny. — In: *Mineral Deposits and Earth Evolution*. — Ed.by I. McDonald, A.J. Boyce, I.B. Butler, R.J. Herrington, D.A. Polya D.A, (Geol. Soc. London. 2005. Vol. 248), 280 p.
35. Jackson M.P.A., Hudec M.R. Salt tectonics: principles and practice. — Cambridge Univ. Press. 2017, 498 p.
36. Khafizov S., Syngaevsky P., Dolson J.C. The West Siberian Super Basin: The largest and most prolific hydrocarbon basin in the world // AAPG Bull. 2022. Vol. 106. No. 3. P. 517–572.

37. Lang J., Hampel A., Deformation of salt structures by icesheet loading: insights into the controlling parameters from numerical modeling // *Int. J. Earth Sci.* 2023. Vol. 112. P. 1133–1155.
38. Şengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altiid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia // *Nature*. 1993. Vol. 364, P. 299–307.
39. Sobornov K., Afanesenkov A., Gogonenkov G. Strike-slip faulting in the northern part of the West Siberian Basin and Enisey-Khatanga Trough: Structural expression, development and implication for petroleum exploration // *AAPG Bull.* 2015. Art. 10784. Doi: https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2015/10784sobornov/ndx_sobornov.pdf.html
40. Sobornov K., Nikishin A. Phanerozoic East Europe–Siberia interaction and petroleum habitat of Northern Eurasia, (Proc. AAPG Europe. Region Ann. Conf. Paris–Malmaison, France. 2009), P.133–134. https://www.searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2009/europe/abstracts/ndx_sobornov.pdf
41. Sobornov K., Yakubchuk A. Phanerozoic East Europe–Siberia interaction and petroleum habitat of Northern Eurasia, (Proc. AAPG/GSA Europe. Region Conf., Prague. 2004), CD-ROM.
42. Sun Q., Cartwright J., Wu S., Chen D. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse // *Marin. Geol.* 2013. Vol. 337. P. 171–181.
43. Vyssotski A. V., Vyssotski V.N., Nezhdanov A.A. Evolution of the West Siberian Basin // *Marin. Petrol. Geol.* 2006. Vol. 23. No. 1. P. 93–126. Doi:10.1016/j.marpetgeo.2005.03.002
44. Xue Y., Luan X., Raveendrasinghe T. D., Wei X., Jin L., Yin J., Qiao J. Implications of salt tectonics on hydrocarbon ascent in the Eastern Persian Gulf: Insights into the formation mechanism of salt diapirs, gas chimneys, and their sedimentary Interactions // *J. Ocean Univ. China (Oceanic and Coastal Sea Res.)*. 2024. Vol.23. P. 1–19. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11802-024-5821-8>

Structure of Salt Diapirs in the Western Siberian Basin and Yenisei–Khatanga Trough Based on Seismic Data

K. O. Sobornov^{a, b, *}

^aLLC “Northern-Urals Oil-and-Gas Company”, bld. 14, Oplesnina str., 169313 Ukhta, Komi Republic, Russia

^bAll-Russia Research Geological Petroleum Institute (FSUE “VNIGNI”), bld. 36, sh. Entuziastov, 105118 Moscow, Russia

*e-mail: Ksoborbov@yandex.ru

Interpretation of regional seismic profiles characterizing the structure of the West Siberian basin and the Yenisei-Khatanga Trough to depths of 10–20 km suggests that salt diapirs played an important role in the structure of this region. Salt diapirs have the following features: (i) large height (up to 5 km or more); (ii) seismic transparency; (iii) presence of growth layers on the flanks of inferred salt rises; (iv) existence of radial fault systems in overlying sediments; (v) isometric shapes of uplifts; (vi) reduced values of the gravity field. Salt deformation explains the origin of widespread ring inversion structures in Jurassic-Cretaceous sediments. Such ring structures probably originated above long-lived salt diapirs. The salts in them are presumably of Early Paleozoic age. The formation of salt strata took place in a large area of salt accumulation at the periphery of the Siberian Platform. The western boundary of the zone of evaporitic sediments distribution is the Trans-Eurasian fault zone, which separated the folded Uralides from the Siberian Platform and tectonic blocks amalgamated with it. The presence of the evaporitic Paleozoic deposits in the northeast of the West Siberian Basin and the Yenisei-Khatanga Trough facilitated the development of large oil and gas pools. Salt cryptodiapirs focused the migration of hydrocarbons from deeply buried, thermally mature Paleozoic sediments into the Jurassic-Cretaceous section, which explains the predominance of gas deposits in these areas, as well as the multilayer nature of the fields.

Keywords: West Siberian basin, Yenisei-Khatanga trough, Trans-Eurasian fault, salt diapirs, ring inversion structures, oil and gas potential, regional seismic exploration