ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Роль сдвиговых дислокаций в формировании нефтегазоперспективных структур северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции

А.С.Егоров, Н.В.Большакова✉, Д.Ф.Калинин

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф. Роль сдвиговых дислокаций в формировании нефтегазоперспективных структур северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 3-15. EDN HDWEBO

Аннотация

Средствами геолого-геофизического моделирования обоснованы особенности глубинного строения и тектоники Примагаданского и Западно-Камчатского шельфов Охотского моря, а также прилегающей территории Камчатского п-ова. Исследования, направленные на изучение закономерностей локализации месторождений углеводородов северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции, опираются на результаты региональных и среднемасштабных геологосъемочных и прогнозно-поисковых исследований, данные геофизических съемок (поле аномалий силы тяжести Δg в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см^3, аномальное магнитное поле ΔT_a, региональные сейсмические профили и результаты их обобщений), материалы петрофизических исследований скважин. При обработке и интерпретации потенциальных геофизических полей использованы различные алгоритмы решения прямой и обратной задачи, а также распознавания образов с обучением и без обучения. Выполненные исследования показали, что особенности глубинного строения и тектоники региона определяются последовательностью и характером проявления мезозойских и кайнозойских орогенных процессов на границах Евразийской и Охотоморской литосферных палеоплит. Изучение региональных сдвиговых зон, развивающихся вдоль Охотско-Чукотской сутурной зоны и Охотско-Западно-Камчатского блока, показало их определяющее влияние на морфологию осадочных бассейнов. Так, тектоническая активность Охотско-Чукотской сдвиговой зоны, заложенной субпараллельно побережью Евразии, привела к формированию обширной сети оперяющих дислокаций и впадин двух типов: крупных присдвиговых продольных депрессий и сдвиго-раздвиговых впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к оси главного сдвига. Картирование горстовых поднятий позволяет обосновать положение первоочередных объектов нефтегазопоисков по структурному критерию.

Ключевые слова

региональный сдвиг; осадочный бассейн; pull-apart; нефтегазоперспективные структуры; Северо-Охотский прогиб; Западно-Камчатская нефтегазоносная область

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRW-2024-0008 «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах».

Поступила: 10.07.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 23.07.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Исследования глубинного строения и тектоники Охотоморского региона, выполненные в связи с перспективами обнаружения месторождений углеводородов, свидетельствуют о том, что на особенности формирования Охотской нефтегазоносной провинции (НГП) в целом и отдельных депрессий в ее пределах значимое влияние оказывают региональные сдвиговые дислокации. Исследованиям механизма образования присдвиговых впадин и связанных с ним особенностей седиментации посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых [1-3].

Так, многолетние исследования В.П.Уткина и его соавторов [4, 5] свидетельствуют об активной рифтогенной деструкции континентальной коры Азиатско-Тихоокеанской переходной зоны в позднем мелу-кайнозое. В ареале развития сдвигов формировались рифтогенные структуры, контролирующие осадочные бассейны, в том числе продольные и типа pull-apart [6]. Бохай-Амурская система левых сдвигов контролирует многочисленные осадочные бассейны, в том числе и относительно небольших размеров, включая бассейны сдвиго-раздвигового типа [5].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Большое число крупных рифтогенных бассейнов, а также локальных линейных депрессий и структур типа pull-apart выделено на основе анализа и обобщения структурных и тектонических параметров нефтегазоносных бассейнов, заложение которых обусловлено проявлением региональных сдвиговых дислокаций. К их числу относятся прибрежные и шельфовые бассейны Южной и Центральной Калифорнии, Венесуэлы, Тринидада и Тобаго; бассейны Юго-Восточной Азии и Бохайской впадины на востоке Китая [7].

В присдвиговых депрессиях установлены значительные скопления углеводородов. Так, в бассейнах Сан-Хоакин и Лос-Анджелес в Южной Калифорнии (США) добыты миллиарды баррелей нефти [8]. Одной из наиболее протяженных сдвиговых структур, контролирующих заложение осадочных бассейнов территории Китая, является зона разлома Тан-Лу, шириной около 80 км и протяженностью 3 тыс. км, имеющая большой потенциал для разведки нефти и газа [3, 9]. Отмечено, что заложение бассейнов, последующие тектонические деформации и особенности осадконакопления здесь обусловлены субдукцией Тихоокеанской плиты [10]. Анализируя сейсмостратиграфические разрезы грабена Танюань вдоль одной из ветвей сдвиговой зоны Тан-Лу, авторы статьи [11] пришли к выводу о ее формировании в режиме pull-apart. Нефтегазоносный бассейн Сычуань (Китай), включающий крупные газовые месторождения, также сформирован под воздействием наклонной субдукции океана прото-Тетис. При этом сдвиговые дислокации играют роль в миграции углеводородов от источника к коллектору, стимулировании коллектора, накоплении газа и высоком дебите скважин [2].

Исследования осадочного бассейна Мертвого моря показательны, поскольку это детально изученный продольный бассейн, локализованный вдоль главной сдвиговой зоны. При протяженности 150 км и глубине фундамента более 8 км соотношение размеров по продольному и ортогональному направлению составляет около 9. Результаты лабораторного тектонофизического моделирования показали, что фундамент такого бассейна окаймлен сдвиговыми разломами, которые контролируют его геометрию [12].

В качестве характерного примера бассейнов типа pull-apart часто приводится впадина Долины Смерти (Израиль). Долина обрамляется сдвиговыми разломами, расстояние между которыми составляет около 40 км. Соотношение размеров по продольному и ортогональному направлению у бассейна Долины Смерти составляет 0,3. Лабораторные эксперименты показали развитие продольных крутопадающих сдвиговых разломов, окаймляющих дно бассейна по всей его длине, и поперечных по отношению к главной оси сбросов [12]. К типу впадин pull-apart относится бассейн Хула, расположенный в центральной части Мертвого моря. Формирование бассейна связывается с левосдвиговыми перемещениями Синайской и Аравийской плит. Структура развивалась как асимметричный, раздвигающийся (ромбовидной формы) бассейн, ограниченный по флангам продольными сдвиговыми разломами, а с юга – сбросами, обращенными на север [13, 14].

Сходный рисунок тектонической деструкции наблюдается в пределах бассейна залива Пария, заложенного в результате относительных движений Карибской и Южноамериканской плит вдоль северной границы последней. Бассейн ограничивается зоной правосторонних сдвигов Эль-Пилар и Арима (на севере) и Ворм Спрингс (на юге). В пределах бассейна залива Пария картируются сбросовые дислокации северо-западного простирания, определяющие ступенчатый рисунок чередующихся грабенов и горстов [15].

Отличительной особенностью российского Дальнего Востока от других нефтегазоносных регионов является то, что основные объемы подтвержденных запасов и перспективных ресурсов нефти и газа рассредоточены по отдельным осадочным прогибам. По мнению Л.С.Маргулиса [16], их можно разделить на четыре основных типа: окраинно-материковые, транзитальные краевые, глубоководные и задуговые прогибы. Осадочные бассейны, выполненные палеоген-неогеновыми осадочными толщами, отделяются друг от друга глубинными разломами и поднятиями фундамента. При этом отмечается роль тектонических процессов, сформировавших нефтегазоперспективные структуры региона.

В работах В.А.Игнатовой [17] приводится сравнительная характеристика осадочных бассейнов Дальневосточного региона и Юго-Восточной Азии. Особенности геодинамических обстановок их формирования позволили выделить три основные группы: континентальные палеорифты, пассивные континентальные палеоокраины, активные континентальные окраины. Большинство

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

осадочных депрессий отнесены к последней группе. Их заложение преимущественно происходит на коре континентального или переходного типов, с широким развитием надвиговых дислокаций и резкой сменой условий осадконакопления, где в разрезе присутствуют как континентальные терригенные угленосные формации, так и глубоководные терригенно-карбонатные толщи.

Наши исследования северного фланга Охотской НГП свидетельствуют об определяющей роли в развитии осадочных бассейнов региональных сдвигов [18, 19]. Анализ закономерностей локализации горстов и грабенов показал возможности выделения в ареалах их развития двух основных типов присдвиговых бассейнов, охарактеризованных выше: линейных продольных прогибов, прослеживаемых вдоль осевой зоны главного сдвига и впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к его оси.

Методы

При изучении закономерностей локализации перспективных на углеводороды структур северной части Охотской провинции нами были использованы:

• результаты региональных и среднемасштабных геологосъемочных и специализированных прогнозно-минерагенических исследований;

• данные геофизических съемок (поле аномалий силы тяжести Δg в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см^3, аномальное магнитное поле ΔT_a, региональные сейсмические профили и результаты обобщения детальных сейсморазведочных работ);

• данные петрофизических исследований скважин;

• научные публикации, посвященные исследованиям Охотоморского региона и прилегающих структур Евразийского континента и Тихоокеанской окраины [20-22].

Для решения поставленной задачи созданы цифровые модели гравитационного поля в редукции Буге и аномального магнитного поля ΔT_a территории, охватывающей северную часть Охотоморского региона. Шаг матрицы цифровых моделей потенциальных полей составляет 500 м.

При обработке цифровых моделей потенциальных полей использованы алгоритмы разложения полей на региональную и локальную составляющие, расчета градиентов полей, распознавания образов с составлением карты классов на основе программного комплекса КОСКАД 3D [23]. Наряду с вышеперечисленными трансформантами применен классификационный алгоритм Д.С.Зеленецкого (АСОД «Воздух»). Используемые подходы к обработке данных геофизических полей позволяют выделить однотипные по набору признаков области, что предоставляет дополнительные возможности при проведении интерпретации и районирования изучаемых площадей [24-26].

Геологическое истолкование геофизических аномалий. На основе качественной интерпретации комплекса геофизических данных разработана схема тектонического районирования северного фланга Охотоморского региона, особенности глубинного строения которого определяются последовательностью и характером проявления мезозойских и кайнозойских орогенных процессов на границах Евразийской и Охотоморской литосферных палеоплит (рис.1). Для региона характерна высокая концентрация офиолитов [27], осадочно-вулканогенных, вулканических и интрузивных комплексов островных дуг и активных континентальных окраин. Аномалии гравитационного поля в редукции Буге в пределах акватории Охотского моря почти всюду положительны, варьируются в пределах от первых единиц до сотен миллигал.

Экстремально низкие значения гравитационного поля наблюдаются на коллизионной границе Охотоморского мегаблока с Евразийским континентом; максимальные значения, достигающие 150 мГал, фиксируются в пределах Южно-Охотской котловины. Характерной особенностью гравитационного поля региона являются многочисленные узкие локальные гравитационные аномалии, обусловленные неоднородностями фундамента и протяженными разломами.

К западу от Охотоморского региона располагаются Верхояно-Колымская и Колымо-Омолонская складчатые области (СО), которые характеризуются преимущественно отрицательными значениями аномального магнитного поля ΔT_a, изредка осложненного локальными интенсивными положительными аномалиями (до +1500 нТл). Для шовных зон, разделяющих блоки, характерны вытянутые линейные знакопеременные аномалии. В гравитационном поле структуры представлены ареалами отрицательных значений от –160 до –20 мГал.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 3-15
© А.С.Егоров, Н.В.Большакова, Д.Ф.Калинин, 2025

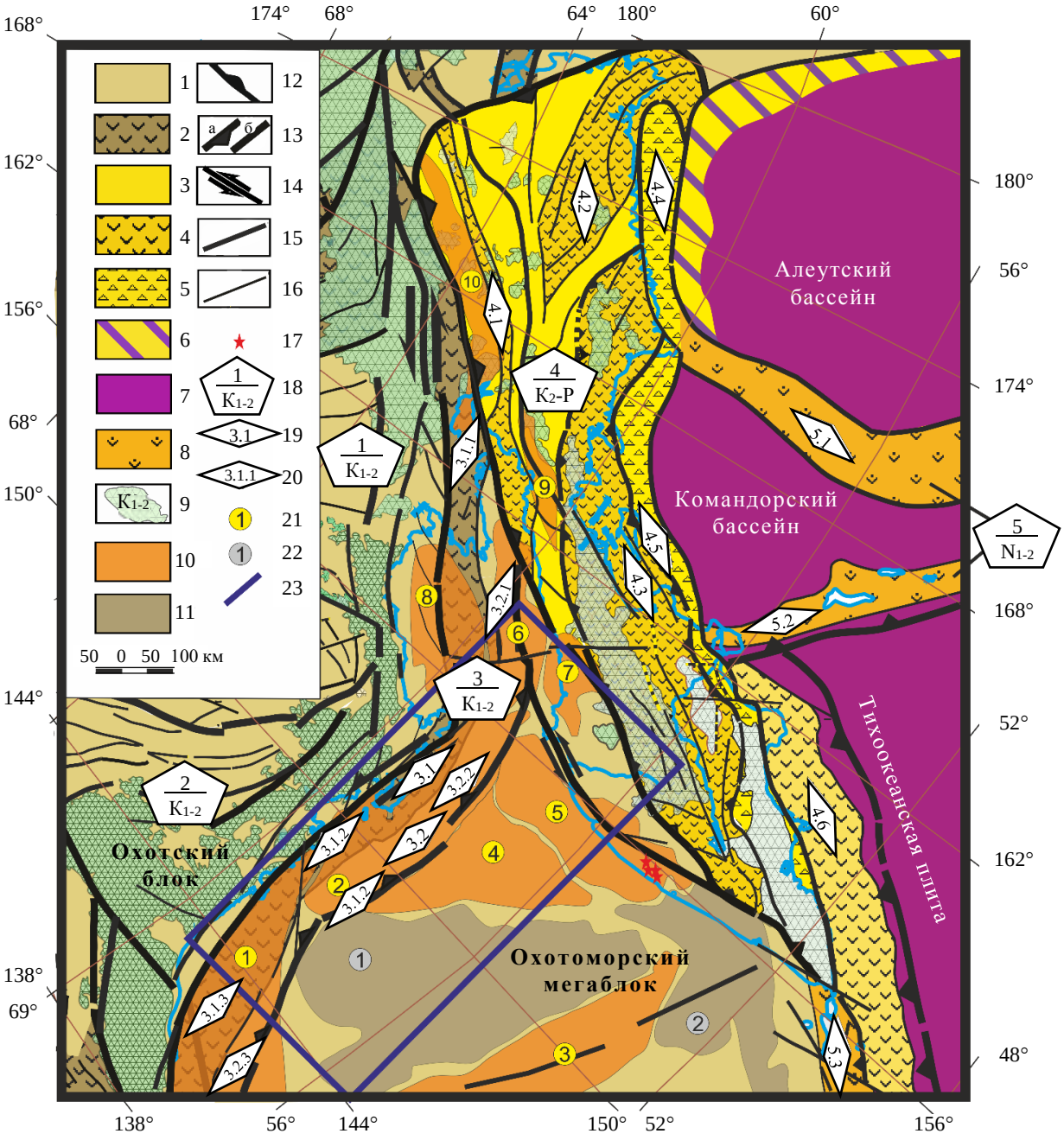


Рис.1. Схема тектонического районирования консолидированного фундамента и платформенного чехла северного фланга Охотоморского региона [19]

1-9 – структурно-вещественные неоднородности консолидированного фундамента: 1, 2 – киммерийских СО (1 – блоки с корой континентального типа, 2 – межблоковые (сутурные) мегазоны), 3-5 – альпийских СО (3 – блоки с корой континентального типа; 4, 5 – межблоковые (сутурные) мегазоны: 4 – выполненные вулканогенно-осадочными островодужными комплексами, 5 – выполненные образованиями аккреционной призмы), 6 – кора переходного континентально-океанического типа, 7 – океаническая кора, 8 – комплексы современных островных дуг и подводных океанических хребтов, 9 – комплексы активных континентальных окраин; 10, 11 – структуры платформенного чехла (10 – прогибы, 11 – поднятия); 12 – зоны субдукции; 13-16 – разрывные нарушения (13 – границы СО (а – надвиговые, б – прочие), 14 – региональные левосторонние сдвиги, 15 – границы структурных зон, 16 – второстепенные разломы); 17 – известные газоконденсатные месторождения региона; 18 – главные геоструктуры (в числителе – индекс, в знаменателе – возраст завершающей складчатости); 19, 20 – индексы структур фундамента (19 – структуры, 20 – фрагменты структур); 21, 22 – индексы структур осадочного чехла (21 – прогибы, 22 – поднятия); 23 – контуры площади детальных исследований

Структуры консолидированного фундамента: 1 – Колымо-Омолонская СО; 2 – Верхояно-Колымская СО; 3 – Охотско-Чукотская коллизионно-активноокраинная СО: 3.1 – Охотско-Чукотская сутурная зона (3.1.1 – Мургальский, 3.1.2 – Южно-Тайгоносский, 3.1.3 – Тауйский фрагменты), 3.2 – краевой складчато-надвиговый пояс (3.2.1 – Шелиховский, 3.2.2 – Примагаданский, 3.2.3 – Билибинский фрагменты); 4 – Корякско-Камчатская аккреционно-коллизионно-активноокраинная СО (4.1 – Западно-Корякская, 4.2 – Центрально-Корякская, 4.3 – Олюторская, 4.4 – Хатырская, 4.5 – Ветловско-Говенская, 4.6 – Кроноцкая зоны); 5 – островные дуги и хребты (5.1 – хребет Ширшова, 5.2 – Алеутско-Командорская, 5.3 – Курильская)

Структуры осадочного чехла: 1-10 – прогибы (1 – Шантаро-Лисянский, 2 – Северо-Охотский, 3 – Центрально-Охотский, 4 – Тинро, 5 – Охотско-Западно-Камчатский, 6 – Шелиховский, 7 – Воямпольский, 8 – Гижигинский, 9 – Пусторецкий, 10 – Пенжинский); 1, 2 – поднятия: 1 – Центрально-Охотское, 2 – Большерецкое

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Вдоль западной границы Евразийского палеоконтинента картируется Охотско-Чукотский вулканический пояс (ОЧВП) шириной до 400 км. Наложенный на структуры Новосибирско-Чукотской, Верхояно-Колымской и Колымо-Омолонской складчатых областей ОЧВП протягивается вдоль побережья материка более чем на 3000 км. В аномальном магнитном поле такая структура хорошо проявляется линейными цепочками положительных аномалий, иногда превышающих значения 3000 нТл, связанными с разными по составу вулканитами – от кислых до основных разностей. В гравитационном поле ОЧВП характеризуется сменой знака с минуса на плюс и протяженными аномалиями северо-восточного простирания.

Линейная зональность расположения основных структурно-тектонических элементов Камчатского п-ова контрастно проявляется в аномальном магнитном поле. Характер магнитного поля Западно-Камчатской зоны однотипен с полем Охотоморского мегаблока. Структуры Центральной и Восточной Камчатки проявлены в аномальном магнитном поле вытянутыми в меридиональном направлении аномалиями, достигающими значений в 2000 нТл. Интенсивность и морфология магнитного поля здесь обусловлена особенностями локализации вулканических поясов и комплексов островных дуг, причленявшихся к окраине континента в кайнозое. Аналогичная линейная зональность характерна и для гравитационного поля. Западно-Камчатская зона отмечается пониженным значением гравитационного поля, отвечающего развитию в ее пределах крупного осадочного прогиба. Вытянутые вдоль береговой линии положительные аномалии гравитационного поля Западно-Камчатского бассейна сопряжены с поднятиями поверхности фундамента [28]. Смена знака поля наблюдается при картировании структур Центрально-Камчатского вулканического пояса (по аналогии с ОЧВП); при этом структуры Восточной Камчатки характеризуются знакопеременным полем средней интенсивности.

Алеутский и Командорский бассейны, разделенные хребтом Ширшова, заложены на океаническом основании с характерной для коры этого типа структурой аномального магнитного и высокими значениями гравитационного поля интенсивностью до 360 мГал. От Тихоокеанской океанической плиты их отделяет Алеутско-Камандорская островная дуга. Повышенные значения гравитационного поля океанических бассейнов обуславливаются повышенной плотностью океанической коры по сравнению с менее плотной континентальной корой.

Охотоморский окраинный бассейн

Особенности глубинного строения бассейна определяются последовательным развитием восточного фланга Евразийского континента в режиме активной континентальной окраины, заклиниванием субдукционной зоны Охотоморской континентальной плитой и завершающими коллизионными процессами аккреции этих континентальных плит [29, 30]. Аккреционный процесс мела-среднего палеогена привел к заложению складчато-надвиговых деформаций на окраине Евразийского континента, формированию ОЧВП, одноименных сутурной зоны и регионального левостороннего сдвига (рис.1). Перечисленные структуры прослеживаются по геофизическим данным вдоль всего северо-западного побережья Охотского моря [31].

Особое внимание в нашей работе уделено трассированию региональных сдвиговых зон и оперяющих их деформаций, развивающихся вдоль Охотско-Чукотской сутурной зоны и Охотско-Западно-Камчатского блока по особенностям потенциальных геофизических полей и их трансформаций. Выделенные сдвиговые зоны определяют морфологию фундамента и особенности строения структур осадочного чехла, с которыми связываются перспективы нефтегазоносности Примагаданского и Западно-Камчатского шельфа. Главные сдвиги проявляются резким изменением инфраструктуры гравитационного и аномального магнитного полей и особенностями их безэталонной классификации; оперяющие дислокации, как правило, маркируются градиентами геофизических полей (рис.2).

Строение консолидированного фундамента. Охотско-Чукотский региональный сдвиг с обширной сетью оперяющих его деформаций в значительной мере определяет особенности глубинного строения консолидированного фундамента и платформенного чехла северной части Охотоморского региона. Положение и морфология выделяемой нами зоны отличаются от соответствующих параметров Восточно-Азиатской глобальной сдвиговой зоны, обоснованной авторитетным исследователем этого региона В.П.Уткиным [4, 5]. При этом мы солидарны с ним относительно

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

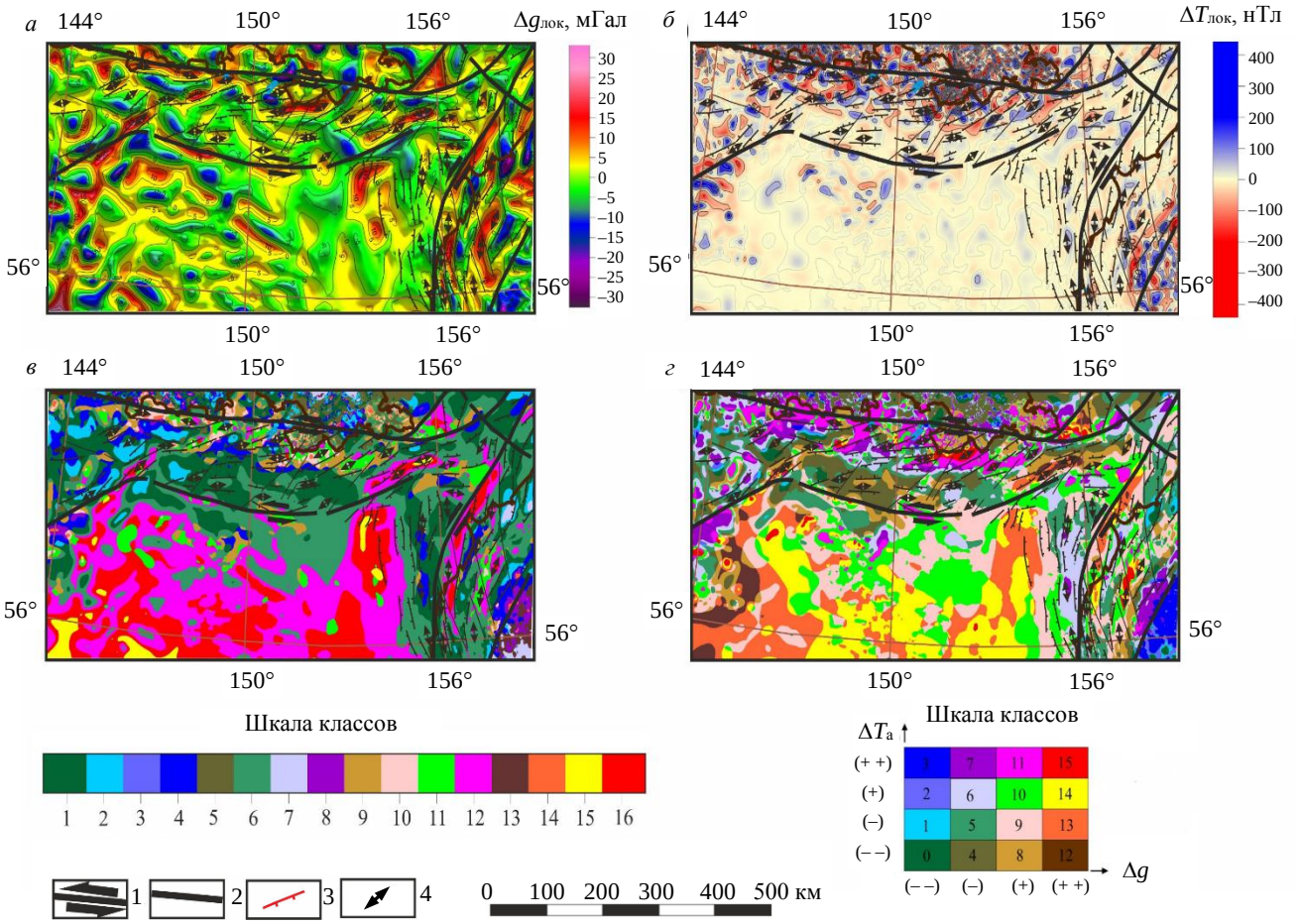


Рис.2. Схемы локальных составляющих и безэталонной классификации гравитационного и аномального магнитного полей северной части Охотоморского региона: локальные составляющие гравитационного (*а*) и магнитного (*б*) полей; безэталонная классификация гравитационного и магнитного полей, рассчитанная с использованием алгоритма А.В.Петрова КОСКАД 3D [23] (*в*) и алгоритма Д.С.Зеленецкого АСОД «Воздух» (*г*) [19]

1 – главные региональные сдвиги; 2 – разрывные нарушения – границы структурных зон; 3 – разрывные нарушения, оперяющие региональные сдвиги (сбросы, сдвиги); 4 – оси сдвиго-раздвиговых (pull-apart) структур осадочного чехла

Контуры площади см. на рис.1

времени заложения сдвиговой зоны (юра – ранний мел – «орогенное сосдвиговое скучивание»; поздний мел – кайнозой – «рифтогенное растяжение блоков коры»). Заложение выделяемой нами сдвиговой зоны относится к позднему мелу и связывается с латеральным смещением Азиатского континента относительно Тихоокеанской океанической плиты [5].

Схожая инфраструктура тектонических деформаций характерна и для Западно-Камчатской сдвиговой зоны. В этом случае направление оси главного сдвига имеет северо-восточное простирание, а горсты и грабены ориентированы субмеридионально, «синтетические» левосторонние сдвиги направлены на север-северо-запад.

Структуры платформенного чехла. Важным источником информации о строении седиментационных бассейнов Северного Приохотья и Западной Камчатки явились результаты сейсморазведочных работ 1980-х годов, выполненных трестом ОАО «Дальморнефтегеофизика». В результате обработки сейсмических данных специалистами ОАО «Дальморнефтегеофизика» построены карты четырех опорных горизонтов, отвечающих основным этапам структурной перестройки бассейнов [6]. Высокое качество и детальность этих схем позволило нам рассматривать их в качестве фактологической основы для оценки характера тектонических деформаций фундамента, определяющих структуру осадочных депрессий региона. С целью изучения оперяющих дислокаций главного Охотско-Чукотского левостороннего сдвига на структурной карте поверхности

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

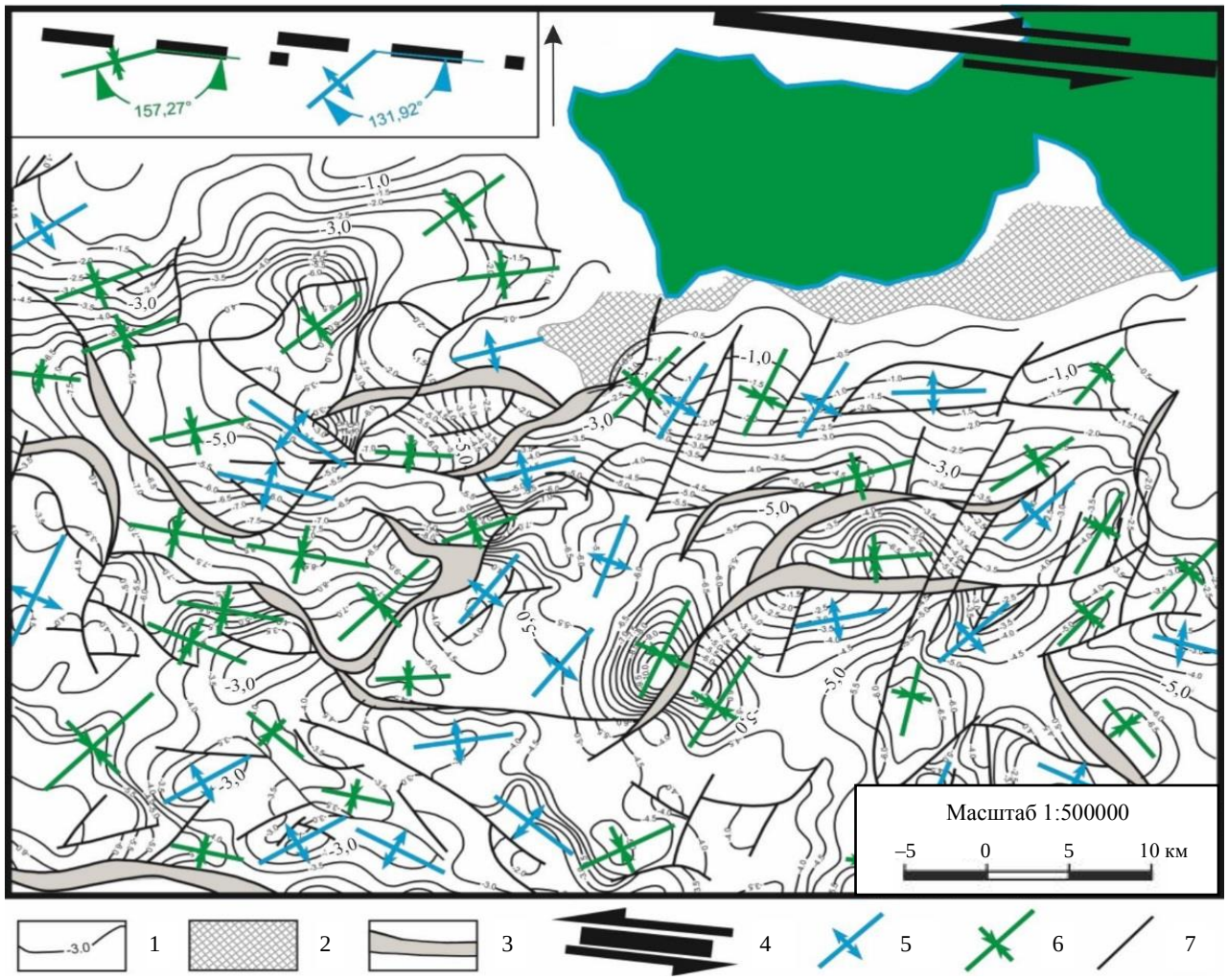


Рис.3. Простирание осей основных блоков относительно Охотско-Чукотского левостороннего сдвига (фрагмент схемы по данным ОАО «Дальморнефтегеофизика» с дополнениями авторов); на врезке – измерение углов между главным сдвигом и осями грабенов и горстов

1 – изогипсы поверхности акустического фундамента, км; 2 – выходы акустического фундамента на дно моря; 3 – проекция плоскости сместителя; 4 – фрагмент Охотско-Чукотского левостороннего сдвига; 5 – горсты; 6 – грабены; 7 – сбросы и взбросы

акустического фундамента вручную были отрисованы оси горстовых и грабеновых структур (рис.3), измерены азимуты простирания их осевых зон и выполнен подсчет количества горстов и грабенов, оси которых ориентированы по каждому десятиградусному интервалу полупространства. Результаты анализа отображены в форме розы-диаграммы (рис.4). Построенная роза-диаграмма показывает, что главными направлениями разрывных дислокаций и, соответственно, осадочных депрессий и горстов являются субширотное (азимут 0-10°) и северо-западное (азимут 160-170°) направления. Подчиненную роль играют дислокации с азимутом простирания 100-120°. Если ориентироваться на параметры эллипсоида деформации левостороннего сдвига (рис.5), то субширотное простирание отвечает направлению Охотско-Чукотского сдвига; северо-западное является главной ориентацией локальных горстов и грабенов; дислокации с азимутом простирания 100-120°, скорее всего, представляют оперяющие сдвиги. Учитывая эти выводы и базируясь на результатах качественной интерпретации геофизических полей, нами была построена геолого-структурная схема, где обозначены горсты и грабены платформенного чехла, границами которых являлись разноориентированные разломы растяжения, сжатия и сдвига, установлен характер изменения мощности кайнозойского чехла и оконтурены крупные осадочные бассейны и локальные структуры (рис.5).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

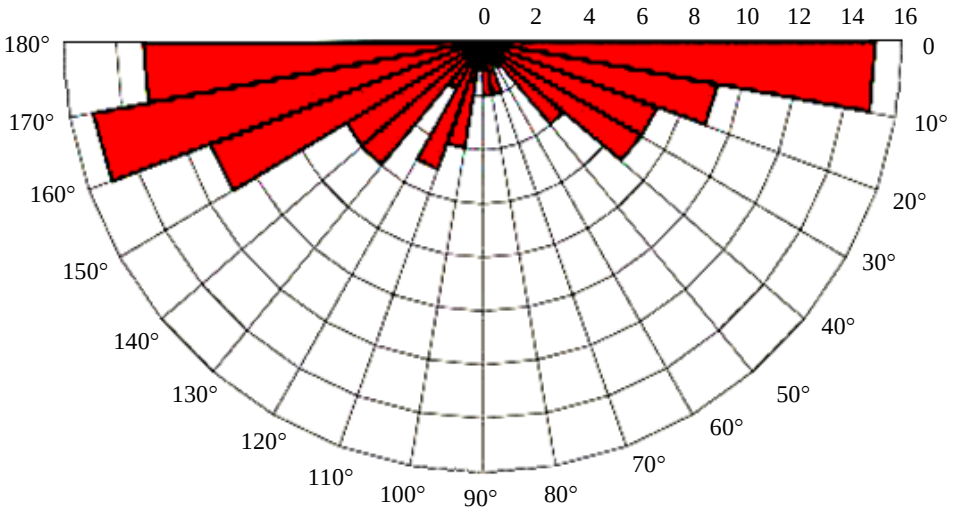


Рис.4. Ориентация осей сбросов и взбросов ареала развития Охотско-Чукотского сдвига [19]

Морфология структур осадочного чехла на рассматриваемой площади в значительной мере определяется тектонической активностью Охотско-Чукотской сдвиговой зоны. Проявление этой региональной дислокации, развивающейся субпараллельно побережью Евразии, привело к заложению крупных продольных впадин и локальных горстов и грабенов, развивающихся в режиме pull-apart.

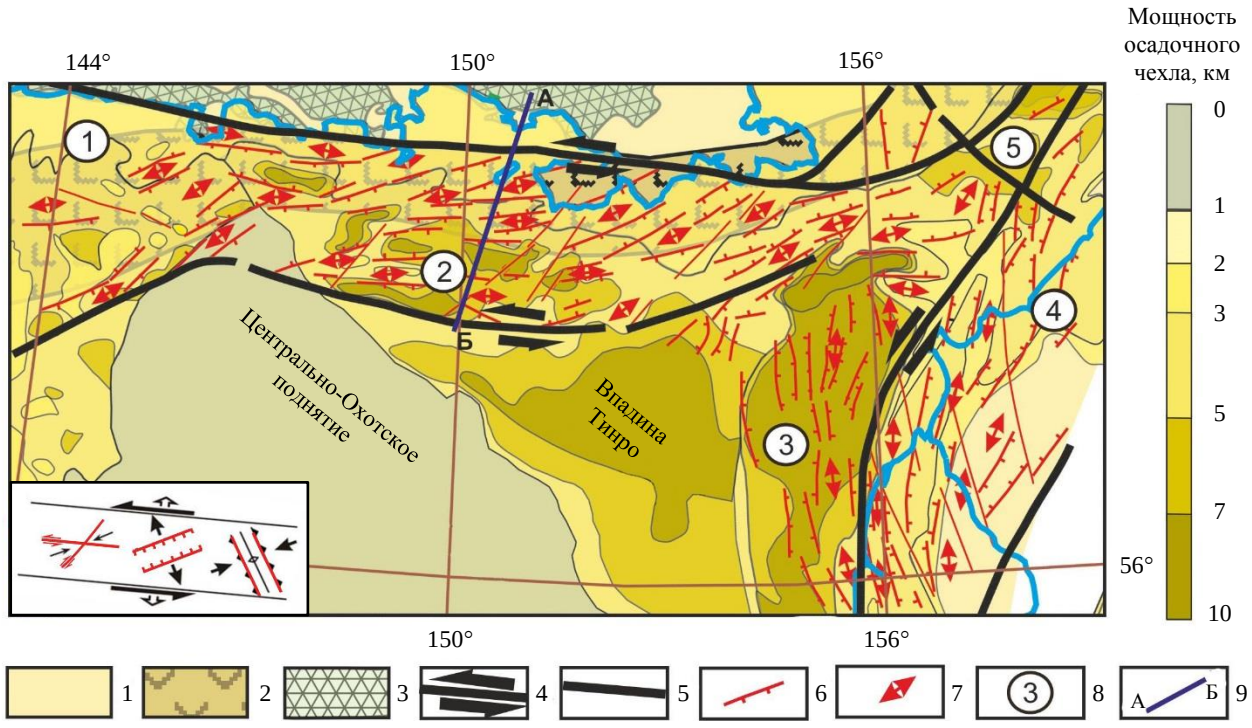


Рис.5. Закономерности пространственного расположения разрывных дислокаций растяжения и сдвига Охотско-Чукотской и Западно-Камчатской региональных сдвиговых зон; на врезке – ориентация разрывных нарушений Охотско-Чукотской зоны в соответствии с моделью эллипсоида деформации левостороннего сдвига [19, 32]

Структурно-вещественные подразделения: 1-3 – структуры киммерийских складчатых областей (1 – блоки с корой континентального типа, 2 – межблоковые сутурные зоны, 3 – вулкано-плутонический пояс); 4 – главные региональные сдвиги; 5 – разрывные нарушения – границы структурных зон; 6 – разрывные нарушения, оперяющие региональные сдвиги (сбросы, сдвиги); 7 – оси сдвиго-раздвиговых (pull-apart) структур осадочного чехла; 8 – элементы нефтегазогеологического районирования (1 – Шантарско-Лисянский прогиб; 2 – Северо-Охотский прогиб; 3 – Охотско-Западно-Камчатский прогиб; 4 – Воямпольский прогиб; 5 – Шелиховский прогиб); 9 – положение геолого-геофизического профиля

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Продольные присдвиговые бассейны в ареале развития Охотско-Чукотской сдвиговой зоны представляют линейные впадины (грабен-рифты), вытянутые в субширотном направлении. В бассейнах именно этого типа локализована большая часть углеводородных ресурсов Западно-Тихоокеанского региона. При этом синрифтовый комплекс сложен преимущественно

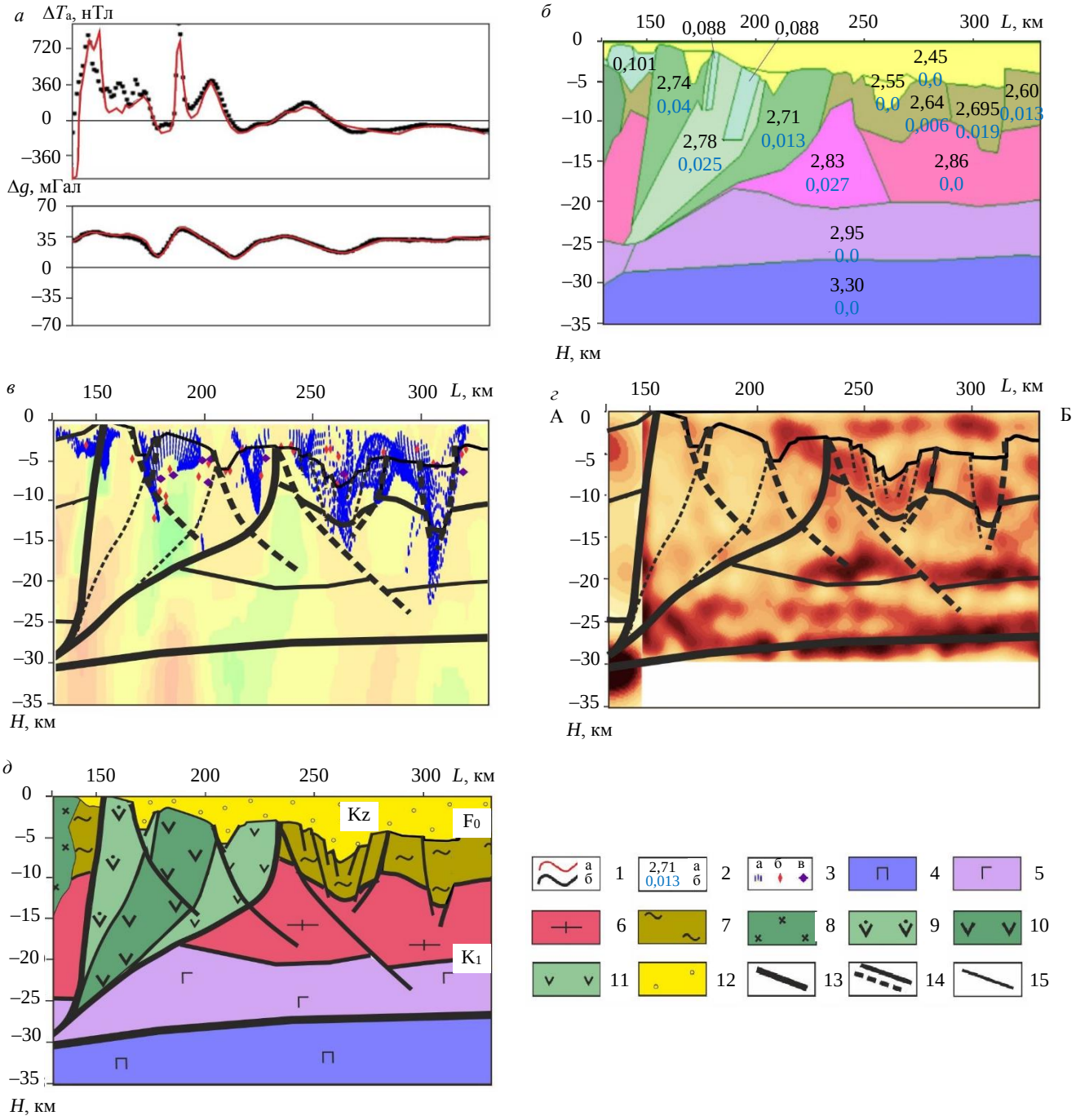


Рис.6. Построение геолого-геофизического разреза по линии профиля А-Б согласно материалам интерпретации комплекса геофизических данных (положение профиля см. на рис.5): *а* – кривые аномального магнитного ΔT_a и гравитационного Δg полей; *б* – петрофизическая модель; *в* – «особые» точки потенциальных полей; *г* – сейсмический разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлективности; *д* – интерпретационный геолого-геофизический разрез [19]

1 – кривые аномального магнитного ΔT_a и гравитационного Δg полей: теоретические (а), расчетные (б); 2 – физические свойства горных пород: плотность, г/см^3 (а), магнитная восприимчивость (б); 3 – особые точки потенциальных полей: результат деконволюции Эйлера для гравитационного поля (а), результат деконволюции Вернера для магнитного поля (б), результат деконволюции Вернера для гравитационного поля (в); 4 – литосферная мантия; 5 – нижняя и средняя кора; 6 – верхняя кора; 7 – древние докайнозойские осадки; 8 – интрузивные массивы; 9-11 – комплексы сутурной зоны, дифференцированные по плотности (9 – средние, 10 – повышенные, 11 – пониженные значения); 12 – осадочный кайнозойский чехол; 13 – границы сутурной зоны; 14 – основные глубинные разломы (на интерпретационных и результирующем разрезах); 15 – второстепенные разломы

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

континентальными терригенными угленосными формациями, а надрифтовый – прибрежно-морскими, дельтовыми и глубоководными терригенными и терригенно-карбонатными отложениями мезозойско-кайнозойского возраста [33]. Характерным примером структур этого типа является крупный и относительно хорошо изученный Магаданский прогиб, являющийся частью Северо-Охотской перспективно нефтегазоносной области.

Параметры линейного пояса локальных горстов и грабенов, развивающегося параллельно границам плит в тылу Тихоокеанской субдукционной зоны, и ориентация этих структур соответствует теоретической модели бассейна типа pull-apart. В пределах пояса моделируются структуры растяжения, сжатия и сдвига, расположение которых хорошо согласуется с теоретической моделью эллипсоида деформации левостороннего сдвига [32]. Острый угол заложения горстов и грабенов относительно главной оси сдвига позволяет предполагать, что левосторонняя Охотско-Чукотская тектоническая зона имеет значимую компоненту растяжения.

Глубинный разрез. Глубинное строение консолидированного фундамента изучено в сечении геотраверса 2-ДВ-М и базировалось на материалах сейсморазведочных работ (в том числе данных глубинного МОВ-ОГТ) [22], а также данных грави- и магниторазведки. Интерпретация последних выполнялась с использованием алгоритмов решения обратных задач грави- и магниторазведки, разработанных А.Б.Андреевым и И.И.Приезжевым (КОСКАД 3D) [23], М.Б.Штокаленко [34], А.И.Атаковым [35] и Ю.П.Горячевым (БАЛТИКА) [36]. Расчет особых точек поля выполнен способом деконволюции Эйлера [37, 38]. Совместная интерпретация результатов инверсии потенциальных полей в сочетании с данными сейсморазведки позволила изучить основные черты строения земной коры и особенности морфологии структур фундамента и осадочного чехла. На рис.6, *б* представлены петроплотностная и петромагнитная модели разреза земной коры, параметры которых в латеральном измерении обоснованы увязкой со схемой тектонического районирования консолидированного фундамента (см. рис.1); в радиальном измерении – результатами решения прямой и обратных задач геофизики. Достоверность моделирования иллюстрируется высоким совпадением кривых наблюденных гравитационного и аномального магнитного полей и соответствующих расчетных кривых (рис.6, *а*). На рис.6, *в* продемонстрирована приуроченность особых точек к рифтогенным структурам. На трассах особых точек, рассчитанных с использованием алгоритма деконволюции Вернера, проявляются особенности морфологии рифтогенной структуры и положение ее глубинного канала.

Материалы сейсморазведочных работ МОВ-ОГТ на Примагаданском и Западно-Камчатском шельфах, в том числе пересчитанные в показатели «рефлективности» (рис.6, *г*) [39], характеризуют морфологию границ платформенного чехла и радиальную расслоенность консолидированного фундамента. Комплексный анализ этих разнотипных данных позволяет обосновать морфологию платформенного чехла с выделением рифтогенных структур, выполнить моделирование Охотско-Чукотской сутурной зоны и блоков консолидированного фундамента окраины Евразийского континента и Охотоморского мегаблока.

Дискуссия

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что тектонические деформации, связанные с Охотско-Чукотской сдвиговой зоной, контролируют формирование обширной сети оперяющих дислокаций северного фланга Охотоморского мегабассейна [19]. В кайнозое в этом поясе происходило формирование впадин двух типов: крупных присдвиговых продольных депрессий и сдвиго-раздвиговых впадин типа pull-apart, ориентированных под углом к оси главного сдвига. В соответствии с классической моделью левостороннего сдвига [32] здесь моделируется полный набор структур растяжения (рифтовых грабенов, разделяемых горстами), сжатия и сдвига. На разрезе моделируются «структуры цветка», характерные для областей развития сдвиговых деформаций с компонентой растяжения. Широкое распространение горстов и грабенов в пределах Примагаданского шельфа обусловило формирование локальных структур – первоочередных объектов поисковых работ на углеводороды.

Геодинамические обстановки формирования потенциально нефтегазоносных структур. Многолетние геолого-геофизические исследования континентальной части Евразии и акватории Дальнего Востока обеспечили относительно высокий уровень их изученности. Однако накопленный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

фактический материал геотектонически интерпретируется крайне многообразно и противоречиво. Одними из наиболее спорных вопросов являются оценки времени и геодинамических обстановок формирования потенциально нефтегазоносных структур Охотоморского региона, что, с нашей точки зрения, является ключом к расшифровке процессов аккумуляции и консервации углеводородов [27, 28]. В рамках настоящей статьи представлены результаты изучения закономерности локализации разрывных нарушений, а также локальных поднятий и прогибов платформенного чехла в ареале влияния Охотско-Чукотского и Западно-Камчатского региональных сдвигов, пространственное расположение которых согласуется с параметрами эллипсоида деформации левостороннего сдвига [28].

Обоснованные заключения имеют принципиальное значение при проведении поисковых исследований на северном фланге Охотской НГП. Именно в этом регионе на лицензионных участках по результатам сейсморазведки выделяется ряд локальных антиклинальных структур. Основные перспективы нефтегазоносности в Северо-Охотском прогибе связываются с нижнекайнозойским комплексом, который находится в главной зоне нефтеобразования ($ПК_3$-$МК_1$) и обладает заметным генерационным потенциалом [16]. Закартированные в ходе исследований горстовые поднятия позволяют обосновать положение первоочередных объектов нефтегазопоисков по структурному критерию. Отметим, что в регионе существует проблема обнаружения качественных коллекторов.

Заключение

Изучение закономерностей локализации разрывных нарушений, горстов и грабенов в ареале развития региональных сдвиговых зон Северо-Охотского осадочного бассейна позволило обосновать закономерности пространственного расположения Охотско-Чукотского и Западно-Камчатского региональных сдвигов и оперяющих их локальных структур растяжения, сжатия и сдвига.

Так, в ареале влияния Охотско-Чукотской сдвиговой зоны нашими исследованиями установлено, что осадочные депрессии и горсты имеют северо-западное простирание (азимут 160-170°); субширотные структуры локализуются согласно направлению главной оси сдвиговой зоны; дислокации с азимутом простирания 100-120°, скорее всего, являются оперяющими сдвигами. Аналогичные заключения о структуре деформаций и критериях нефтегазоносности получены для ареала развития Западно-Камчатской сдвиговой зоны.

Выполненные построения расширяют познания о закономерностях размещения структур, перспективных на углеводородное сырье, и новых нестандартных критериях нефтегазоносности региона, что может быть использовано для определения направлений дальнейших поисково-разведочных работ [40, 41]. Эти заключения открывают путь к выделению наиболее перспективных (по структурному критерию) площадей с целью постановки детальных поисковых работ в пределах северного фланга Охотской НГП для определения участков улучшенных коллекторских свойств пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Харахинов В.В.* Геодинамические условия формирования осадочных (нефтегазоносных и потенциально нефтегазоносных) систем Охотоморского региона // Геология нефти и газа. 2020. № 1. С. 81-99. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-81-99

2. *Fangzheng Jiao, Yu Yang, Qi Ran et al.* Distribution and gas exploration of the strike–slip faults in the central Sichuan Basin // Natural Gas Industry B. 2022. Vol. 9. Iss. 1. P. 63-72. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.08.018

3. *Guang Zhu, Cheng Liu, Chengchuan Gu et al.* Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone // Science China Earth Sciences. 2018. Vol. 61. Iss. 4. P. 386-405. DOI: 10.1007/s11430-017-9136-4

4. *Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л.* Сдвиговый континентальный рифтогенез восточной окраины Азии // Литосфера. 2016. № 4. С. 5-29.

5. *Уткин В.П.* Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 780-799. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799

6. *Петровская Н.А., Грецкая Е.В.* Перспективы нефтегазоносности Шелиховского осадочного бассейна // Разведка и охрана недр. 2017. № 2. С. 31-37.

7. *Setiadi I., Setyanta B., Nainggolan T.B., Widodo J.* Delineation of Sedimentary Subbasin and Subsurface Interpretation East Java Basin in the Madura Strait and Surrounding Area Based on Gravity Data Analysis // Bulletin of the Marine Geology. 2019. Vol. 34. № 1. P. 1-16. DOI: 10.32693/bomg.34.1.2019.621

8. *Mann P.* Comparison of Structural Styles and Giant Hydrocarbon Occurrences within Four Active Strike-slip Regions: California, Southern Caribbean, Sumatra, and East China // Tectonics and Sedimentation: Implications for Petroleum Systems. American Association of Petroleum Geologists, 2012. P. 43-93. DOI: 10.1306/13351548M100861

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *Caiwei Fan.* Tectonic deformation features and petroleum geological significance in Yinggehai large strike-slip basin, South China Sea // Petroleum Exploration and Development. 2018. Vol. 45. Iss. 2. P. 204-214. DOI: 10.1016/S1876-3804(18)30024-7

10. *Zhang Jing, Li Wei, Wu Zhiping et al.* Structural Characteristics of Tan-Lu Fault Zone in South Area of Bohai Sea and Its Control on Basin Structure // Earth Science. 2017. Vol. 42. № 9. P. 1549-1564. DOI: 10.3799/dqkx.2017.110

11. *Guang Zhu, Guo Sheng Liu, Man Lan Niu et al.* Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China // International Journal of Earth Sciences. 2009. Vol. 98. Iss. 1. P. 135-155. DOI: 10.1007/s00531-007-0225-8

12. *Smit J., Brun J.-P., Cloetingh S., Ben-Avraham Z.* Pull-apart basin formation and development in narrow transform zones with application to the Dead Sea Basin // Tectonics. 2008. Vol. 27. Iss. 6. № TC6018. DOI: 10.1029/2007TC002119

13. *Schattner U., Weinberger R.* A mid-Pleistocene deformation transition in the Hula basin, northern Israel: Implications for the tectonic evolution of the Dead Sea Fault // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. Vol. 9. Iss. 7. № Q07009. DOI: 10.1029/2007GC001937

14. *Heimann A., Zilberman E., Amit R., Frieslander U.* Northward migration of the southern diagonal fault of the Hula pull-apart basin, Dead Sea Transform, northern Israel // Tectonophysics. 2009. Vol. 476. Iss. 3-4. P. 496-511. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.07.024

15. *Arkle J.C., Weber J., Enkelmann E. et al.* Exhumation of the Coastal Metamorphic Belt Above the Subduction-to-Transform Transition, in the Southeast Caribbean Plate Corner // Tectonics. 2021. Vol. 40. Iss. 8. № e2020TC006414. DOI: 10.1029/2020TC006414

16. *Маргулис Л.С., Подольский Ю.В., Боровиков И.С., Пылина Л.М.* Состояние и проблемы воспроизводства сырьевой базы углеводородов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 5. С. 19-49.

17. *Игнатова В.А.* Сравнение геодинамических моделей и нефтегазоносности бассейнов Дальнего Востока России и Юго-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 2. С. 27-42.

18. *Алексеев В.И.* Глубинное строение и геодинамические условия гранитоидного магматизма Востока России // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 259-265. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.259

19. *Большакова Н.В.* Глубинное строение северного фланга Охотской нефтегазоносной провинции по данным комплексных геолого-геофизических исследований: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 20 с.

20. *Кашубин С.Н., Петров О.В., Шокальский С.П. и др.* Глубинное строение земной коры Северо-Восточной Евразии и ее континентальных окраин // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 2. С. 199-224. DOI: 10.5800/GT-2021-12-2-0521

21. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А.* Глубинное строение и геодинамика Охотского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70-82.

22. *Сакулина Т.С., Каленич А.П., Атаков А.И. и др.* Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ-М // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. С. 11-17.

23. *Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2010. Вып. 16. № 2. С. 126-132.

24. *Данильев С.М., Секерина Д.Д., Данильева Н.А.* Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсморазведочных данных // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 260-271.

25. *Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И.* Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

26. *Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I.* Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2022. Vol. 380. Iss. 2237. № 20210403. DOI: 10.1098/rsta.2021.0403

27. *Шапиро М.Н., Соловьев А.В.* Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 863-880.

28. *Калинин Д.Ф., Егоров А.С., Большакова Н.В.* Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2022. Вып. 53. № 1. С. 59-75. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75

29. *Крикун Н.С., Бабенко И.А., Таловина И.В., Дурягина А.М.* Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности неогеновых отложений южного сегмента Курильской островодужной системы // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2001. DOI: 10.2205/2024es000905

30. *Крикун Н.С., Абдрахманов И., Таловина И.* Изучение дизъюнктивной сети о. Кунашир (Курильские острова) с целью реконструкции особенностей его тектонического развития // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2012. DOI: 10.2205/2024es000915

31. *Егоров А.С., Большакова Н.В., Калинин Д.Ф., Агеев А.С.* Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структур его складчатого обрамления // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 703-719. DOI: 10.31897/PMI.2022.63

32. *Park R.G.* Geological Structures and Moving Plates. Springer, 1988. 337 p.

33. *Белонин М.Д., Григоренко Ю.Н., Маргулис Л.С. и др.* Разведочный потенциал Западной Камчатки и сопредельного шельфа (нефть и газ). СПб: Недра, 2003. 120 с.

34. *Алексеев С.Г., Сенчина Н.П., Шаткевич С.Ю., Штокаленко М.Б.* Достоинства и недостатки томографии потенциальных полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского, 26-30 января 2016, Воронеж, Россия. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 10-13.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

35. *Дмитриева Л.К., Атаков А.И., Матвеев Ю.И., Рослов Ю.В.* Создание геофизического обеспечения Госгеолкарты-1000/3 и изучение глубинного строения шельфа Российской Федерации по геотраверсам // Региональная геология и металлогения. 2007. № 33. С. 76-78.

36. *Горячев Ю.П., Добрынина М.И.* Новые возможности интерпретационной системы БАЛТИКА при поисках трубок взрыва по материалам аэромагнитных съемок // Геофизика. 2003. № 3. С. 64-66.

37. *Сенчина Н.П., Асосков А.Е., Горелик Г.Д.* Evaluation of Displacements Caused by Strike-Slip Deformations Using Correlation Characteristics Based on Potential Field Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. № 4. № ES4013 (in English). DOI: 10.2205/2023ES000847

38. *Сенчина Н.П., Асосков А.Е.* Реконструкционный подход к интерпретации сдвиговых структур по геофизическим данным // Недропользование XXI век. 2023. № 5-6 (101). С. 50-57.

39. *Сысоев А.П., Зайцев С.А.* Отдельные вопросы динамической инверсии волнового поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2023. № 3 (55). С. 52-58. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-52-58

40. *Litvinenko V.* The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas // Resources. 2020. Vol. 9. Iss. 5. № 264. DOI: 10.3390/resources9050059

41. *Prischepa O.M., Kireev S.B., Nefedov Yu.V. et al.* Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. № 1192051. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051

***Авторы*: Алексей Сергеевич Егоров,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3501-9145*, **Наталия Владимировна Большакова,** *канд. геол.-минерал. наук, старший преподаватель* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *bolshakova_nv@pers.spmi.ru*, *https://orcid.org/0000-0003-0278-8893*, **Дмитрий Федорович Калинин,** *д-р техн. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0597-263X*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0