



SOUTHEASTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON – DEEP STRUCTURE AND LATE MESOZOIC GEODYNAMICS

L.V. Kungurtsev ¹✉, Ye.Yu. Goshko ², M.M. Buslov ¹

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State Technical University, 20-1 Karl Marx Ave, Novosibirsk 630073, Russia

ABSTRACT. The 3-DV seismic profile data interpretation was used to obtain a geodynamic model for the deep structure of the southeastern margin of the Siberian craton and the South Verkhoyansk sector of the Verkhoyansk fold and thrust belt (VFTB). A determination has been made of the craton boundary, as well as of its reflection in the geological structure and geophysical fields. The model shows the mechanism of formation of thrust complexes on the craton margin and a compensatory underthrust beneath the craton of the lower crustal horizons of the fold-thrust belt, and explains the causes of abnormal RT-conditions reflected in the nature of the manifestation of metamorphism, magmatism, metallogeny and disjunctive tectonics. Using tectonic zoning, the parameters of the model are extended to the structures of the Southern Verkhoyanye and adjacent areas, which made it possible to determine the deep boundaries of the cratonic structures and their borders formed on the oceanic crust. The first are the margins of the Siberian craton and the Okhotsk terrane, the second are the adjacent VFTB structures. The boundary zone between the craton and the VFTB exhibited tectonomagmatic structures with high metallogenic potential. The obtained data make it possible to interpret the tectonic structure and development of the orogenic belt on the craton margin, and to relate the stages of its evolution to large Late Mesozoic geodynamic events in northeast Asia.

KEYWORDS: southeastern boundary of the Siberian craton; Verkhoyansk fold and thrust belt; geodynamic model; deep structure, tectonics; 3-DV geophysical profile

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the ИГМ СО РАН (project No. FWZN-2026-0018).



EDN: UXBLQB

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Leonid V. Kungurtsev, geos5@mail.ru

Received: October 26, 2025

Revised: January 28, 2026

Accepted: February 13, 2026

FOR CITATION: Kungurtsev L.V., Goshko Ye.Yu., Buslov M.M., 2026. Southeastern Margin of the Siberian Craton – Deep Structure and Late Mesozoic Geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (2), 0882. doi:10.5800/GT-2026-17-2-0882

ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА – ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И ПОЗДНЕМЕЗОZOЙСКАЯ ГЕОДИНАМИКА

Л.В. Кунгурцев¹, Е.Ю. Гошко², М.М. Буслов¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20/1, Россия

АННОТАЦИЯ. По результатам интерпретации сейсмических данных по профилю 3-ДВ построена геодинамическая модель глубинного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона и Южно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП). Определена граница кратона и ее отражение в геологическом строении и геофизических полях. Модель показывает механизм формирования надвиговых комплексов на окраине кратона и компенсационный поддвиг под кратон нижних горизонтов коры складчато-надвигового пояса, объясняет причины возникновения аномальных РТ-условий, отражающихся в характере проявления метаморфизма, магматизма, металлогении и дизъюнктивной тектоники. Параметры модели с помощью тектонического районирования распространены на структуры Южного Верхоянья и прилегающие районы, что позволило определить глубинные границы кратонных структур и обрамляющих структур, образованных на океанической коре. К первым относится окраина Сибирского кратона и Охотский террейн, ко вторым – прилегающие структуры ВСНП. В пограничной полосе кратона и ВСНП выделены тектономагматические структуры с высоким металлогеническим потенциалом. Полученные данные позволяют расшифровать тектоническое строение и развитие орогенного пояса на окраине кратона, увязать этапы его эволюции с крупными позднемезозойскими геодинамическими событиями на северо-востоке Азии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: юго-восточная граница Сибирского кратона; Верхоянский складчато-надвиговый пояс; геодинамическая модель; глубинное строение; тектоника; геофизический профиль 3-ДВ

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИГМ СО РАН (проект № FWZN-2026-0018).

1. ВВЕДЕНИЕ

Сибирский (Северо-Азиатский) кратон рассматривается в понимании Ю.А. Косыгина [Kosygin et al., 1964] как Сибирская платформа и внешние зоны примыкающих складчато-надвиговых поясов, имеющие тот же докембрийский кристаллический фундамент. Южно-верхоянская окраина Сибирского кратона представлена Южно-Верхоянским сектором форланда Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП), который отделяет структуры окраины кратона от структур Охотского террейна (рис. 1). На образование структур Южно-Верхоянского сектора существует две основные точки зрения. В.С. Шкодзинский [Parfenov, Kuzmin, 2001, с. 497] связывает его формирование «со сближением Охотского террейна с Сибирской платформой под влиянием приращения Колымо-Омолонского супертеррейна и закрытия существовавшего здесь морского бассейна с континентальной корой». Особенностью этого процесса он считает субдукцию мантийной литосферы под Охотский террейн, обусловленную давлением Колымо-Омолонского супертеррейна. Геодинамику Южно-Верхоянского сектора он связывает со сдвигово-надвиговым коллизионным взаимодействием Охотского террейна с пассивной окраиной платформы. А.В. Прокопьев приоритет в образовании Южно-Верхоянского сектора отдает субдукционным и аккрецион-

ным процессам, происходившим вдоль Восточно-Азиатской активной континентальной окраины, выделяя сектор в Южно-Верхоянский орогенный пояс [Prokopyev et al., 2018a].

За восточную границу платформы большинство исследователей принимает Фронтальную систему надвигов, по которой дислоцированные породы верхоянского комплекса ВСНП и нижележащие отложения чехла платформы надвинуты на слабдеформированные комплексы Приверхоянского краевого прогиба и Алданской антеклизы. Вопрос проведения восточной границы Сибирского кратона, т.е. окончания погруженного платформенного фундамента, является остро дискуссионным. Л.М. Парфёнов с коллегами [Parfenov, Kuzmin, 2001] комплексы фундамента платформы продолжали на восток под ВСНП до Адыча-Тарынской зоны разломов. В.И. Шпикерман смещает эту границу восточнее, включая в структуры окраины платформы Кулар-Нерский террейн [State Geological Map..., 2016]. Ф.Ф. Третьяков включил в состав ВСНП уже все восточные террейны и продолжил платформенный фундамент до Колымо-Омолонского супертеррейна [Tretyakov, 2017, 2021].

История геодинамического развития Южно-Верхоянского сектора и примыкающих структур наиболее полно освещена в работах [Parfenov, Kuzmin, 2001;

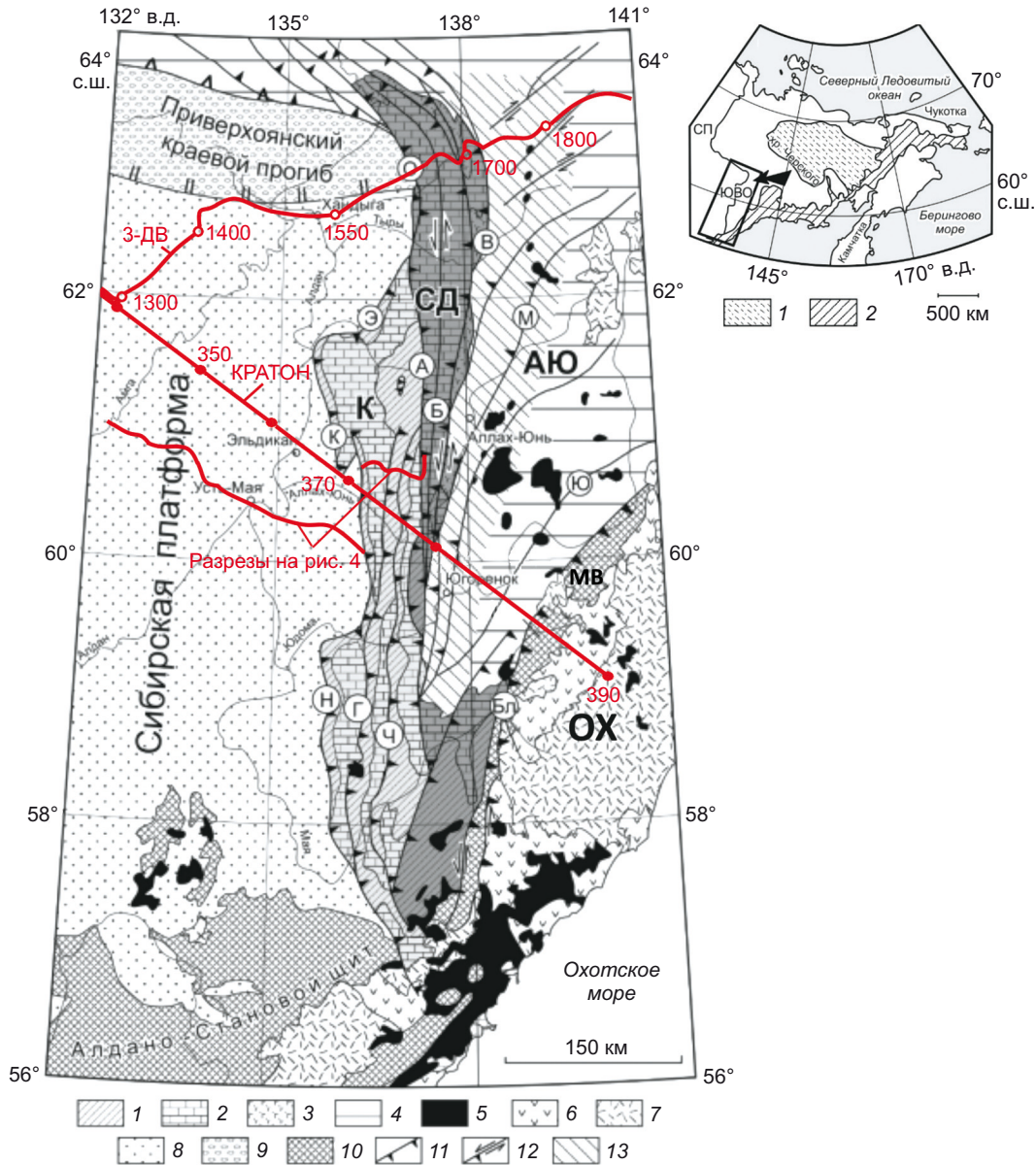


Рис. 1. Тектоническая карта Южно-Верхоянского орогенного пояса ([Prokopiev et al., 2018b], с дополнениями). 1–4 – отложения: 1 – рифейские, 2 – венд-нижнепалеозойские, 3 – среднедевонские – нижнекаменноугольные, 4 – верхнепалеозойские – мезозойские; 5–7 – вулканоплутонические пояса: 5 – мезозойские гранитоиды, 6 – Удской пояса, 7 – Охотско-Чукотский пояса; 8 – осадочный чехол Сибирской платформы; 9 – Приверхоянский краевой прогиб; 10 – раннедокембрийские образования Алдано-Станового щита и Верхнемайского поднятия (МВ) Охотского террейна (ОХ); 11 – надвиги: К – Кыллахский, О – Украинский, М – Минорский, Ю – Юдомский, Н – Нельканский, Г – Гувиндинский, Ч – Чагдинский, А – Акринский, В – Восточно-Сетте-Дабанский; 12 – сдвиги и взбросо-сдвиги: Бл – Билякчанский, Б – Бурхалинский; 13 – Южно-Верхоянский метаморфический пояс. Тектонические зоны: К – Кыллахская, СД – Сетте-Дабанская, АО – Аллах-Юньская. Красным показаны сейсмические профили с пикетами.

На врезке – местоположение региона: 1 – Колымо-Омолонский микроконтинент; 2 – Восточно-Азиатская активная континентальная окраина. ЮВО – Южно-Верхоянский орогенный пояс, СП – Сибирская платформа.

Fig. 1. Tectonic map of the South Verkhoyansk orogenic belt (supplemented after [Prokopiev et al., 2018b]). 1–4 – deposits: 1 – Riphean, 2 – Vendian-Lower Paleozoic, 3 – Middle Devonian-Lower Carboniferous, 4 – Upper Paleozoic-Mesozoic; 5–7 – volcanoplutonic belts: 5 – Mesozoic granitoids, 6 – Uda belt, 7 – Okhotsk-Chukotka belt; 8 – sedimentary cover of the Siberian platform; 9 – Priverkhoyansk foredeep; 10 – Early Precambrian rocks of the Aldan-Stanovoy shield and Verkhnyaya Maya uplift (MB) of the Okhotsk terrane (OX); 11 – thrusts: K – Kyllakh, O – Okrainnyy, M – Minor, Ю – Yudoma, Н – Nekan, Г – Guvinda, Ч – Chagda, А – Akra, В – East Sette-Daban; 12 – strike-slips and reverse-slips: Бл – Bilyakchan, Б – Burkhala; 13 – South Verkhoyansk metamorphic belt. Tectonic zones: К – Kyllakh, СД – Sette-Daban, АО – Allakh-Yun. Red shows seismic profiles' pickets.

Inset map shows the location of the region: 1 – Kolyma-Omolon microcontinent; 2 – East-Asian active continental margin. ЮВО – South Verkhoyansk orogenic belt, СП – Siberian platform.

Prokopiev et al., 2018a, 2018b; Tretyakov, 2021]. Предполагается, что в пределах восточной окраины Сибирского кратона в среднем девоне – раннем карбоне заложилась система рифтов, приведшая к отчленению от него крупных континентальных блоков, включая Охотский кратонный террейн, и образованию Оймяконского океанического бассейна. После этапа рифтогенеза в пределах бассейна накапливались отложения верхоянского терригенного комплекса. Кардинальная перестройка структуры региона связана с закрытием Оймяконского бассейна с поздней юры до конца мела, вызванным коллизией Колымо-Омолонского супертеррейна и Охотского террейна с Сибирским кратоном. В результате образовался ороген, сложенный дислоцированными отложениями верхоянского терригенного комплекса и чехла кратона, перекрывший его окраину по Фронтальной системе надвигов. Одновременно структуры Южного Верхоянья испытывали тектономагматическое влияние субдукционно-коллизионных процессов на Восточно-Азиатской активной континентальной окраине [Parfenov, Kuzmin, 2001; Prokopiev et al., 2018a]. Существует еще несколько альтернативных моделей развития ВСНП: от полного отрицания существования Оймяконского океана [State Geological Map..., 2013, 2020] до отнесения к рифтогенным бассейнам только Иньяли-Дебинского террейна [Oxman, 2000; State Geological Map..., 2016], а также окраинно-морская модель с малыми океанскими бассейнами [Tretyakov, 2022].

Глубинное строение региона изучено достаточно хорошо благодаря материалам по опорному геофизическому профилю 3-ДВ, пересекающему северную часть Южного Верхоянья. Интерпретации данных по профилю посвящено множество публикаций [Goshko et al., 2014; Tretyakov, Prokopyev, 2015; Solov'ev et al., 2016; Polyansky et al., 2017; Kashubin et al., 2018a, 2018b; Kungurtsev, Goshko, 2023; Suvorov et al., 2023; и др.]. По детальным построениям [Tretyakov, Prokopyev, 2015] глубинная структура верхней части земной коры центрального сегмента орогенного пояса определяется крупными дуплексами и вдвиговыми клиньями, а в фундаменте выделяются деструктивные структуры рифейского и среднепалеозойского рифтогенеза. Платформенный фундамент авторы продолжают на восток под структуры ВСНП. По сейсмической скоростной модели [Suvorov et al., 2023] в верхней коре Южного Верхоянья выделяют передовой Приверхоянский и Тыловой прогибы с мощностью осадочного чехла 23 и 13 км соответственно, разделенные Сетте-Дабанской тектонической зоной. За границу кратона авторы принимают разломную зону, наклоненную на восток $\sim 15^\circ$, пересекающую границу Мохо под восточным окончанием Сетте-Дабанской зоны.

Более детально глубинное строение Южно-Верхоянского сектора в увязке с тектоническим строением ВСНП и прилегающих структур рассмотрено в статье [Kungurtsev, Goshko, 2023]. По сейсмическому разрезу определена форма фундамента кратона в виде кли-

на, заканчивающегося под Южно-Верхоянским синклиноморфом на глубине 30–40 км. В основании структур, расположенных восточнее границы кратона, предполагается кора океанического типа (Оймяконский океан). В коллизионную стадию эта кора была пододвинута под прилегающие структуры Сибирского кратона. В полосе коллизии кратона с ВСНП выделены две зоны активных внутрикоровых флюидно-магматических процессов.

Приведенный обзор показывает, что глубинное строение Южно-Верхоянского сектора и его поздне-мезозойская геодинамика требуют дополнительных исследований. Прежде всего необходимо уточнить, где проходит глубинная граница фундамента платформы, т.е. граница Сибирского кратона. Решение этого вопроса позволит более обоснованно судить о роли и последствиях взаимодействия кратона со смежными структурами ВСНП. Актуальность этих исследований обусловлена тем, что структуры сектора контролируют размещение Аллах-Юньской металлогенической зоны, включающей крупное Нежданское месторождение золота [Fridovsky, 2023]. С учетом роли глубинных источников и характера дизъюнктивной тектоники в локализации рудного вещества актуальна модель глубинного строения территории необходима для рационального направления геологоразведочных работ.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РЕГИОНА

В геологическом строении Южно-Верхоянского сектора с запада на восток по структурному, вещественному и возрастному признакам выделяются три зоны [Parfenov, Kuzmin, 2001] (рис. 1). Кыллахская зона сложена рифей-ордовикскими отложениями чехла платформы, которые образуют типичный передовой чешуйчатый веер – систему надвигов, ответвляющихся от общего базального срыва, с наибольшим перемещением по передовым надвигам. Фронт надвиговой системы является обнаженным, что подразумевает значительную эрозию их внешних частей [Pavlovskaya, Khudoley, 2024]. Сетте-Дабанская зона осевой части сектора выполнена венд-нижне- и среднепалеозойскими комплексами чехла платформы, имеющими в разрезе форму «пальмового дерева». Осложняющие зону разломы, наряду с надвиговой, имеют значительную левосдвиговую компоненту. Расположенная на востоке Аллах-Юньская зона представлена Южно-Верхоянским синклиноморфом и выполнена верхоянским терригенным комплексом, образующим крупные складки линейного типа. Вдоль западного борта зоны узкой полосой (50–60 на 600 км) протягивается Южно-Верхоянский метаморфический пояс. Он имеет зональное строение с более высокой степенью метаморфизма – от зеленосланцевой фации местами до ставролитовой субфации эпидот-амфиболитовой фации в центральной его части, шириной до 20–25 км и протяженностью до 150 км. В крайних частях пояса уровень метаморфизма снижается до фации начального метаморфизма [Parfenov,

Kuzmin, 2001]. Осложняющие зону разломы имеют северо-восточную ориентировку, на севере – правостороннюю кинематику (рис. 1). Продольная зональность Южно-Верхоянского сектора выражена в косо эшелонированной смене структур с юго-востока на северо-запад по системе сдвигов и в выклинивании Сетте-Дабанской и Аллах-Юньской зон на юге, что связано с инденторным влиянием Охотского террейна.

В прилегающих районах Сибирской платформы на севере выделяется широтный участок позднеюрско-раннемелового Приверхоянского краевого прогиба, частично перекрытый палеоген-неогеновыми осадками Нижнеалданской предгорной впадины. На юге сектор граничит со структурами Алдано-Станового щита, которые, погружаясь на север, образуют обширную Алданскую антеклизу, выполненную породами рифея, венда и кембрия, плащеобразно перекрытыми континентальными отложениями юры (рис. 1). В восточной части антеклизы выделяется Усть-Майская котловина (авлакоген), выполненная верхнекарельско-нижнерифейскими отложениями мощностью до 3 км [Gubin et al., 2022]. В северной части антеклизы расположено Якутское поднятие фундамента с мощностью чехла около 1 км и менее [Parfenov, Kuzmin, 2001; Obolkin, 2019]. Пограничные структуры Южно-Верхоянского сектора надвинуты на структуры платформы по Фронтальной системе надвигов (Нельканский, Кыллахский, Эбейке-Хаятинский и Краинный) (рис. 1). Главной особенностью тектонического строения Южного Верхоянья, согласно работе [Prokopiev et al., 2017], является смена вергентности складчатых и надвиговых дислокаций с западной на восточную с формированием структурно-географической зоны в центральной части орогенного пояса.

3. ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЮЖНО-ВЕРХОЯНСКОЙ ОКРАИНЫ КРАТОНА

Глубинное строение Южно-Верхоянского сектора достаточно хорошо изучено, так как его пересекает опорный геофизический профиль 3-ДВ, интерпретации данных по которому посвящено множество публикаций, перечисленных выше. Южную часть сектора пересекает восточный участок глубинного сейсмического профиля ГСЗ пос. Березово – пос. Усть-Мая (КРАТОН), дающий лишь общие представления о строении земной коры региона [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013] (рис. 1). Для структур восточной части Алданской антеклизы и Кыллахской зоны в рамках изучения перспектив нефтегазоносности выполнена серия малоглубинных сейсмических профилей, материалы по которым обобщены в работах [Obolkin, 2019; Gubin et al., 2022; Razvozzhaeva, Taltykin, 2023].

С учетом перечисленных материалов авторами выполнена комплексная интерпретация сейсмического разреза ОГТ (метод общей глубинной точки) и разреза суммарной энергии (отражает скоростную и плотностную дифференцированность геологической среды) по профилю 3-ДВ. При интерпретации учитывался характер распределения потенциальных полей над

разрезом и геологическое строение в полосе профиля. По результатам сформирована геодинамическая модель глубинного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона и прилегающих структур Южного Верхоянья (рис. 2). На сейсмическом ОГТ и энергетическом разрезах (рис. 2, б, в) в западной, платформенной части профиля четко прослеживается верхняя граница фундамента платформы и слоистые комплексы чехла с ярко проявленным слоем сейсмической полупрозрачности в его средней части. В подошве этого слоя фиксируется региональный отражающий горизонт, который опознается по угловому несогласию, выраженному выклиниванием нижележащих комплексов чехла в западном направлении в районе ПК 1450 км, и наличию наклонных площадок, срезаемых отражающим горизонтом (VR на рис. 2, а). В восточной части Алданской антеклизы данный отражающий горизонт (VR) приурочен к подошве венда и является реперным [Gubin et al., 2022]. Фиксация этого реперного горизонта позволяет оценить мощность довендских и пострифейских комплексов чехла платформы в створе профиля 3-ДВ. Мощность довендских комплексов чехла увеличивается от зоны их выклинивания в районе ПК 1450 км до 4.5 км в районе ПК 1625 км. Мощность вышележащих V-Mz комплексов постепенно наращивается от 2 км в районе ПК 1350 км до 5.5 км на ПК 1625 км (рис. 2, а, б). Таким образом, общая мощность чехла платформы на рассматриваемом участке профиля увеличивается к окраине платформы от 2 до 10 км.

Начиная с ПК 1600 км на границе чехла и фундамента платформы фиксируется серия наклонных и субвертикальных разломов сбросовой кинематики, по которым граница фундамента ступенеобразно опускается под углом около 12° до глубины 21 км в районе ПК 1670 км. Далее, по резкому подъему границы чехла (задиру) можно предположить, что комплексы чехла окраины кратона сорваны с фундамента и надвинуты на расположенные западнее структуры чехла. При этом сформированы два разбитых локальными разломами блока. Нижний, разделенный разломом на два фрагмента, сложен довендскими комплексами и формирует дуплекс с клиновидным вдвигом (Д на разрезе). По размеру (65×7 км) он соответствует размеру участка края фундамента кратона с отсутствующим чехлом (рис. 2, б, ПК 1675–1750 км). Верхний блок, разбитый на пять фрагментов, сложен вышележащими комплексами чехла, формирует веерную структуру Сетте-Дабана. Блоки разделяет Краинный надвиг, nasledующий, по нашему мнению, поверхность регионального отражающего горизонта (VR) в основании венда. Вклинивание (вдвиг) нижнего блока объясняет подъем и развал вышележащих комплексов Сетте-Дабана в форме «пальмового дерева», фиксируемый на разрезе и в поверхностном геологическом строении. В такой модели образования Сетте-Дабанский антиклинорий полностью аналогичен дуплекс-антиклинориям, находящимся на его продолжении в Западно-Верхоянском секторе ВСНП, с той лишь разницей, что

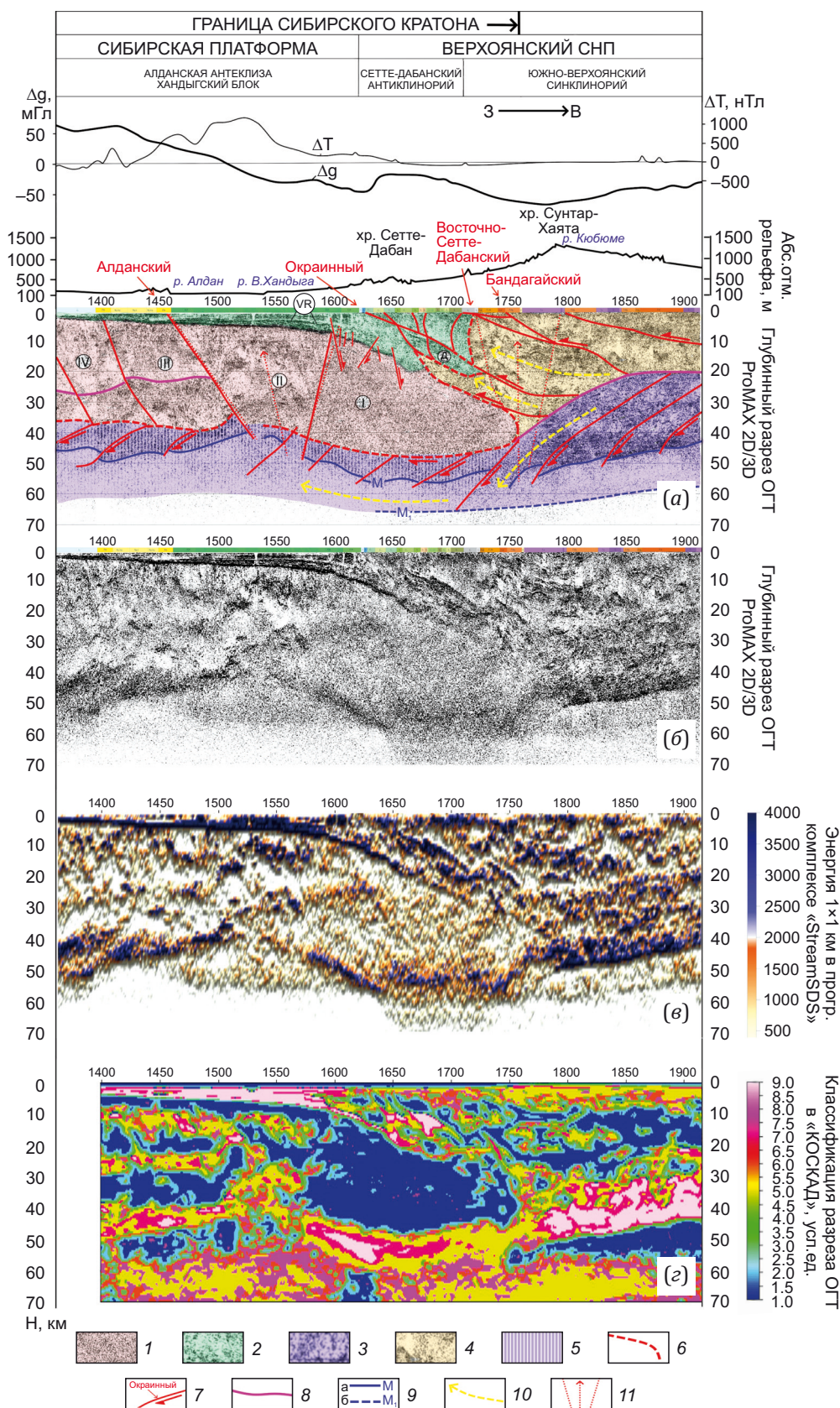


Рис. 2. Геодинамическая модель глубинного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона и Южного Верхоянья по профилю 3-ДВ (а) на основе: сейсмического разреза ОГТ (б), разреза суммарной энергии (в) и классификации динамических характеристик разреза ОГТ по А.В. Петрову [Sal'nikov et al., 2014] (г). 1-4 – геодинамические комплексы: Сибирского кратона: 1 – фундамент (римские цифры – номера блоков), 2 – чехол (Д – дуплекс с клиновидным вдвигом); ВСНП: 3 – основание, сложенное океаническими комплексами, 4 – складчатый верхоянский терригенный комплекс; 5 – трансформированные комплексы нижней коры ВСНП, нарастившие фундамент Сибирского

кратона; 6 – тектонические границы кратона; 7 – межблоковые разломы ВСНП, направления смещения по ним и названия; 8 – нижняя граница волновода; 9 – границы М (а) и М₁ (б); 10 – направления тектонического транспорта; 11 – зоны интенсивной переработки коры. VR – реперный опорный горизонт по подошве венда.

Fig. 2. Geodynamic model of the deep structure of the southeastern margin of the Siberian craton and Southern Verkhoyanye along the 3-DV profile (a) based on: CDP seismic section (б), total energy section (в) and classification of dynamic characteristics of the CDP section according to A.V. Petrov [Sal'nikov et al., 2014] (г).

1–4 – geodynamic complexes: Siberian craton: 1 – basement (Roman numerals – block numbers), 2 – cover (D – duplex with a wedge-shaped zone); VFTB: 3 – basement, composed of oceanic complexes, 4 – folded Verkhoyansk terrigenous complex; 5 – transformed complexes of the lower crust of the VFTB, which built up the basement of the Siberian craton; 6 – tectonic boundaries of the craton; 7 – interblock faults of the VFTB, directions of the displacement therealong and the names; 8 – lower boundary of the waveguide; 9 – boundaries М (а) and М₁ (б); 10 – directions of tectonic transport; 11 – zones of intensive crustal reworking. VR – reference horizon along the Vendian base.

в нем на поверхность выведены более древние комплексы чехла платформы, т.е. он также является дуплекс-антиклинорием.

Фронтальная часть надвигового комплекса верхнего блока (рис. 2, а, ПК 1625 км), подстилаемая Украинским надвигом, по данным [Prokopiev et al., 2022], залегает практически субгоризонтально, т.е. имеет минимальную мощность. Это согласуется с тем, что только начиная с ПК 1635 км по резкому повышению уровня гравитационного поля можно говорить о существенном увеличении мощности более плотных карбонатных, с дайками базитов, надвиговых комплексов Сетте-Дабанского дуплекс-антиклинория.

Нижнее ограничение кристаллического фундамента кратона проводится по верхней границе «слоя рефлексивности» (слой с аномально высокими коэффициентами отражения сейсмических волн, сложной внутренней структурой, с надвиговыми элементами и контрастными акустическими границами). Наиболее яркое отражение слой находит на энергетическом разрезе (рис. 2, в). На восточном, наиболее погруженном, участке нижняя граница фундамента опускается до глубины 48 км (ПК 1600–1750 км), затем плавно поднимается на запад до глубины 39 км. На участке профиля ПК 1525–1540 км граница фундамента практически не отражается, так же как и нижележащая граница М. В районе ПК 1515 км, по западному крылу наклонного разлома, граница фундамента резко поднята до уровня 34 км и далее на запад контролируется серией полого наклоненных чешуй, поэтому имеет волнообразную морфологию, располагаясь на глубинах 36–39 км, характерных для Хандыгского блока кратона (рис. 2, а).

Комплексы кристаллического фундамента кратона на рассматриваемом участке профиля по сейсмическим характеристикам делятся на четыре блока (рис. 2, а). Для западных блоков (II–IV) характерно неравномерное, пятнистое распределение областей повышенного уровня отражающего сигнала и наклонные на запад вытянутые области с пониженным количеством отражающих площадок, наблюдаемые выше границы волновода – слоя пониженного уровня отражений (рис. 2, а, б). Блоки разделены разломами, также наклоненными на запад, лишь разлом, ограничивающий I блок, имеет восточную вергентность. В III и IV блоках до-

статочно надежно прослеживается нижняя граница волновода.

В I блоке комплексы фундамента отражаются относительно равномерным, на всю его мощность, распределением площадок с невысокой отражательной способностью, формируя наклоненную на восток клинообразную структуру длиной примерно 100 км и мощностью от 35 до 15 км в районе ПК 1760 км. Фронтальная граница фундамента выделяется дугообразной зоной сгущения отражательных площадок, расположенной в ромбовидной линзе сейсмической полупрозрачности (рис. 2, а, в). В тектоническом плане окончание комплексов кристаллического фундамента маркирует юго-восточную границу Сибирского кратона.

Отложения верхоянского терригенного комплекса, развитые на востоке рассматриваемого участка профиля 3-ДВ, образуют серию мощных, пологих надвигов и покровов, выполнение которых интенсивно тектонизировано. Об этом свидетельствует пятнистое расположение зон повышенного и пониженного уровня отражений, их разнообразные формы. Лишь на участке ПК 1725–1825 км на глубине от 5 до 15 км фиксируется наклоненный на восток блок, в котором сохранились элементы слоистой, складчатой структуры (рис. 2, а, б). Остальные участки развития верхоянского комплекса существенно переработаны, о чем говорят обширные области сейсмической полупрозрачности. За нижнюю границу распространения верхоянского терригенного комплекса принимается нижняя граница волновода, проходящая на уровне –20 км и опускающаяся от ПК 1850 км к клиновидному окончанию комплексов фундамента кратона до глубины более 40 км (рис. 2, а). Нижняя часть земной коры ВСНП на рассматриваемом участке профиля контрастно отличается как от вышележащих отложений верхоянского комплекса, так и от комплексов фундамента кратона. Наиболее ярко структура этого слоя проявлена в интервале ПК 1750–1910 км (рис. 2, б, в), где фиксируется нижнекоревая дуплекс-система, сложенная полого залегающими фрагментами океанической коры – хорсами, более детально рассмотренная в статье [Kungurtsev, Goshko, 2023]. Хорсы погружаются в западном направлении, поддвигаясь друг под друга, формируя характерный зубчатый тип границы М (рис. 2, а). Далее на запад этот слой коры погружается под окраину фундамента кратона

на глубину 48–56 км. По сходству отображения в энергетическом разрезе и характерному строению, выраженному эшелонированной серией полого залегающих линзовидных чешуй со следами скольжения и погружения друг относительно друга в западном направлении, дуплекс-система прослеживается на запад до ПК 1250 км [Kungurtsev, Goshko, 2023]. На этом участке она формирует нижний слой земной коры платформы, подстилающий кристаллический фундамент. Наиболее наглядно это видно на основе классификации динамических характеристик разреза ОГТ по А.В. Петрову в программном комплексе КОСКАД-3D [Sal'nikov et al., 2014] на рис. 2, г. Слой нижней коры ВСНП, имеющий максимальные динамические характеристики (желто-розовый цвет) на востоке разреза, прослеживается в виде непрерывной полосы на запад под структуры фундамента платформы, надстраивая последний снизу. Мощность коры на описываемом участке на 5–10 км превышает мощность коры блоков платформы, расположенных западнее [Kungurtsev, Goshko, 2023].

С описанным строением земной коры Южно-Верхоянского сектора ВСНП согласуются данные по участку глубинного сейсмического разреза по профилю ГСЗ КРАТОН [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013] (рис. 3). На профиле на границе Сетте-Дабана и Южно-Верхоянского синклинория фиксируется максимальное погружение границы М до глубины 46 км с наклоном под Сетте-Дабан (ПК 380 км), что соответствует поддвигу нижней коры ВСНП под кратон. В верхних горизонтах коры прилегающих структур кратона маркируется осадочный чехол (более 10 км), мощность которого увеличивается на восток, по аналогии с фиксируемым погружением фундамента по профилю З-ДВ. На этот мощный осадочный чехол по достаточно пологому разлому (выходит на ПК 372 км) надвинуты структуры Сетте-Дабанской и Кыллахской зон. Серия верхнекоровых разломов в Южно-Верхоянском синклинории и Охотском террейне полого наклонена в сторону кратона, как и по геологическим данным [State Geological Map..., 2021a]. На разрезе ГСЗ в районе Якутского поднятия фундамента фиксируется

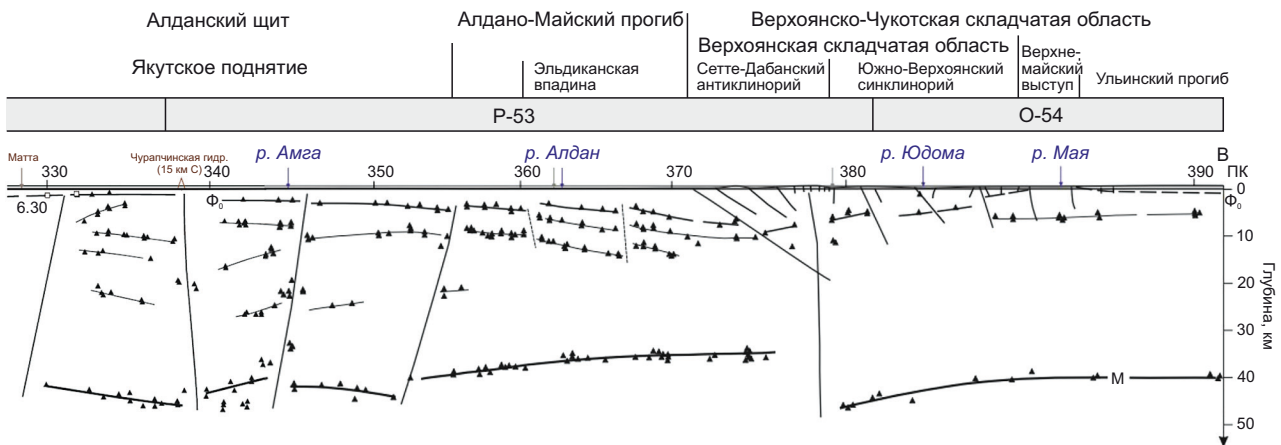


Рис. 3. Восточный участок глубинного сейсмического разреза по профилю ГСЗ пос. Березово – пос. Усть-Мая (КРАТОН) [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013]. Локализация разреза на рис. 1.

Fig. 3. Eastern segment of the deep seismic section along the DSS profile CRATON Berezovo – Ust-Maya) [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013]. See Fig. 1 for the section localization.

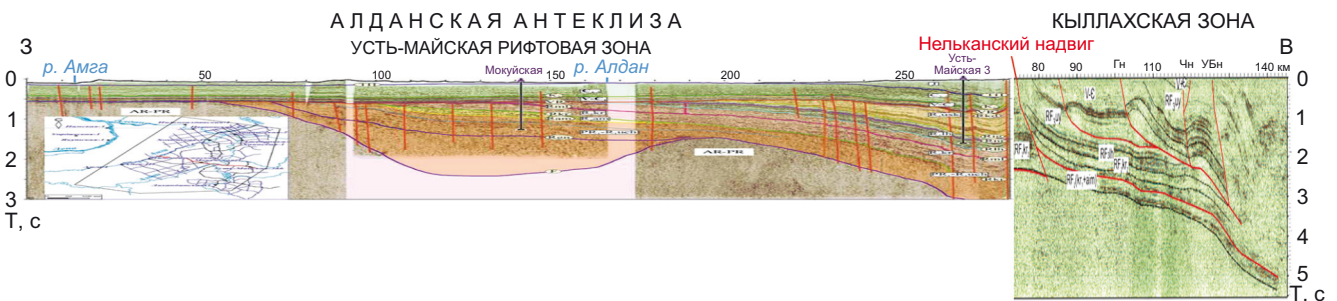


Рис. 4. Компиляция сейсмических временных разрезов через центральную часть Кыллахской зоны [Razvozzhaeva, Taltykin, 2023] и примыкающие структуры Алданской антеклизы [Gubin et al., 2022], состыкованных по Нельканскому надвигу. Локализация разрезов на рис. 1.

Fig. 4. Compilation of seismic time sections through the central part of the Kyllakh zone [Razvozzhaeva, Taltykin, 2023] and adjacent structures of the Aldan anticline [Gubin et al., 2022] adjoining each other along the Nelkan thrust. See Fig. 1 for the section localizations.

увеличение мощности коры на те же 5–10 км (рис. 3), согласующееся с описанным выше поддвигом комплексов ВСНП.

Для Кыллахской зоны Южного Верхоянья профильные сейсморазведочные работы [Razvozzhaeva, Taltykin, 2023] подтвердили представления о сложном надвиговом строении зоны, уточнили общую мощность осадочного чехла, строение надвиговых пластин, положение детачментов, величины минимального смещения аллохтонов. Важно отметить, что на всех выполненных профилях мезозойских отложений Приверхоянского краевого прогиба в автохтоне надвигового пакета Кыллахской зоны не обнаружено. В примыкающих районах Алданской антеклизы по данным сейсморазведки [Obolkin, 2019; Gubin et al., 2022] уточнено строение крупной отрицательной структуры Усть-Майской (Улкано-Кыллахской) рифтовой зоны, которая ранее выделялась как Усть-Майский авлакоген. Зона выполнена отложениями PR_1-R_1 мощностью 2–3 км. В вышележащих отложениях, мощность которых моноклинально увеличивается на восток, рифтовая зона практически не находит отражения. Компильционный разрез через центральную часть Кыллахской зоны и примыкающие структуры Алданской антеклизы, по-

казывающий строение верхних горизонтов коры этих структур, приведен на рис. 4.

4. ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЮЖНОГО ВЕРХОЯНЬЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ СТРУКТУР

Для распространения полученных по сейсмическим профилям данных о глубинном строении земной коры на структуры Южного Верхоянья и прилегающие районы выполнено тектоническое районирование рассматриваемой территории. В основу районирования положена комплексная интерпретация геолого-геофизических данных с использованием методики, примененной ранее для всей Верхояно-Колымской складчатой системы [Kungurtsev, Goshko, 2023]. По результатам районирования определены глубинные границы кратонных структур, в основании которых залегает докембрийский кристаллический фундамент, и структур, образованных на коре Оймяконского океана. К первым относится юго-восточная окраина Сибирского кратона и Охотский террейн, ко вторым – центральная часть Южно-Верхоянского синклиория, разделяющая упомянутые структуры (рис. 5, 6, 7).

Погруженная граница платформенного фундамента – граница Сибирского кратона – находит достаточно

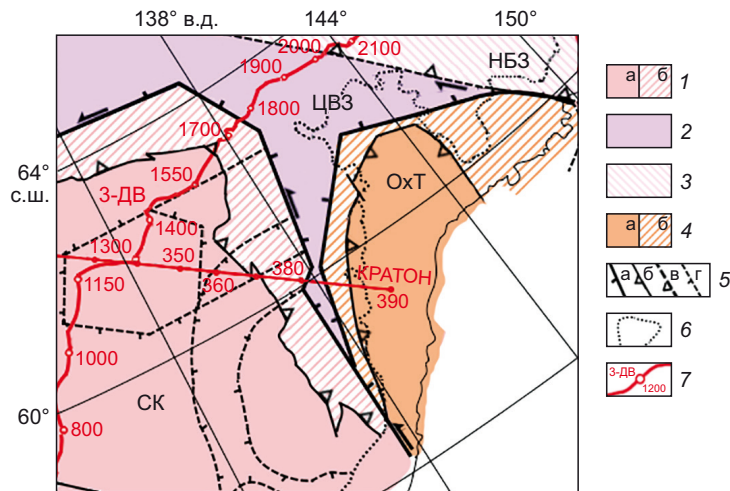


Рис. 5. Схема тектонического районирования Южного Верхоянья и прилегающих структур.

1 – Сибирский кратон: а – платформенная часть, б – погруженная кратонная окраина, перекрытая комплексами ВСНП; 2 – Центрально-Верхоянская зона – фрагмент Оймяконского палеоокеанического бассейна; 3 – Нелькано-Балыгычанская зона, сформированная комплексами Оймяконского палеоокеана в зоне субдукции Уяндино-Ясачненской островной дуги; 4 – Охотский кратонный террейн: а – ядерная часть, б – погруженная окраина, перекрытая комплексами ВСНП; 5 – тектонические границы, выделенные по геофизическим данным (кроме Фронтальной системы надвигов): а – кратонного фундамента, б – перекрывающих фундамент комплексов ВСНП, в – внешних структур Нелькано-Балыгычанской зоны, г – крупных структур в фундаменте кратона (кинематика разломов показана: треугольником – надвиговая, штрихом – сбросовая, стрелкой – сдвиговая); б – граница распространения магматических пород Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса; 7 – линии геофизических профилей с пикетами.

Fig. 5. Scheme of tectonic zoning of the Southern Verkhoyanye region and adjacent structures.

1 – Siberian craton: a – platform part, б – submerged cratonic margin, overlapped by the VFTB complexes; 2 – Central Verkhoyansk zone – a fragment of the Oymyakon paleoceanic basin; 3 – Nelkan-Balygychan zone formed by the Oymyakon paleoceanic complexes in the subduction zone of the Uyanda-Yasachnaya island arc; 4 – Okhotsk cratonic terrane: a – core part, б – submerged margin, overlapped by the VFTB complexes; 5 – tectonic boundaries based on the geophysical data (except for the Frontal Thrust System): a – cratonic basement, б – basement-overlying VFTB complexes, в – external structures of the Nelkan-Balygychan zone, г – large structures in the basement of the craton (fault kinematics symbols: triangle – thrust, dash – normal fault, arrow – strike-slip); б – distribution boundary of igneous rocks of the Okhotsk-Chukotka volcanoplutonic belt; 7 – lines of geophysical profiles with pickets.

слабое отражение в потенциальных полях в связи с тем, что окончания комплексов фундамента располагаются на глубине более 30 км под толщей пород верхоянского терригенного комплекса (см. рис. 2). На карте аномального магнитного поля (рис. 7, а) структуры кратона и ВСНП разделяет широкая полоса с отри-

цательными значениями поля, что можно объяснить большими глубинами расположения магнитоактивных объектов, намагниченность которых в этой зоне определяется минералами ильменитовой серии, имеющими невысокую магнитную восприимчивость [Mishin et al., 2022]. На Схеме гравитационных аномалий

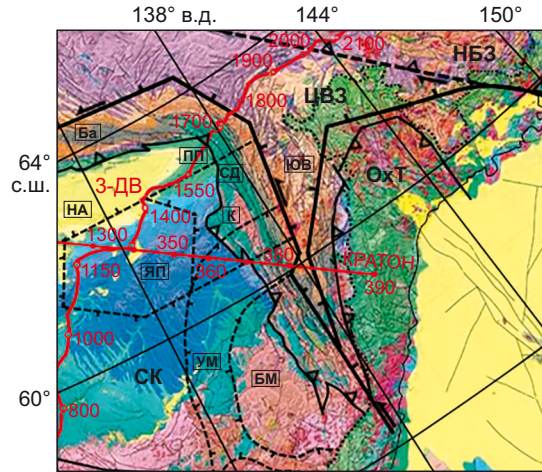


Рис. 6. Выделенные при районировании структуры Южного Верхоянья на Геологической карте России и прилегающих акваторий [Petrov, 2016].

Тектонические структуры: СК – Сибирский кратон, структуры платформенной части: Якутское поднятие фундамента (ЯП), Батомгско-Майский горст-антиклинорий (БМ), Усть-Майский прогиб (УМ), Приверхоянский краевой прогиб (ПП), Нижнеалданская предгорная впадина (НА); структуры на погруженной кратонной окраине: Кыллахская зона листрических надвигов (К), Сетте-Дабанский (СД) и Бараинский (Ба) дуплекс-антиклинорий; структуры Центрально-Верхоянской зоны – Южно-Верхоянский синклинорий (ЮВ). Остальные условные обозначения на рис. 5.

Fig. 6. The structures of the Southern Verkhoyan region identified during zoning on the Geological Map of Russia and adjacent waters [Petrov, 2016].

Tectonic structures: СК – Siberian craton, the structures of the platform part: Yakut uplift (ЯП), Batomga-Maya horst-anticlinorium (БМ), Ust-Maya trough (УМ), Priverkhoyansk foredeep (ПП), Lower Aldan piedmont basin (НА); structures on the submerged cratonic margin: Kyllakh zone of listric thrusts (К), Sette-Daban (СД) and Baray (Ба) duplex-anticlinoria; structures of the Central Verkhoyansk zone – South Verkhoyansk synclinorium (ЮВ). See Fig. 5 for other legend items.

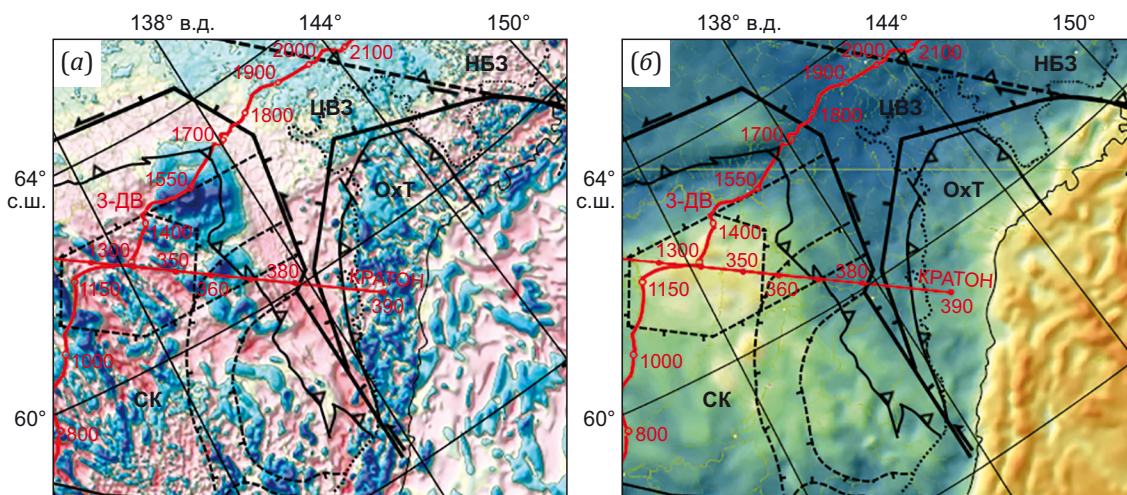


Рис. 7. Отражение выделенных при районировании структур Южного Верхоянья на Карте аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий [Map..., 2016] (а) и на Гравиметрической карте России и прилегающих акваторий [Gravimetric Map..., 2016] (б). Условные обозначения на рис. 5.

Fig. 7. Reflection of the structures of the Southern Verkhoyan region identified during zoning on the Map of the Anomalous Magnetic Field of Russia and Adjacent Waters [Map..., 2016] (а) and on the Gravimetric Map of Russia and Adjacent Waters [Gravimetric Map..., 2016] (б). Legend in Fig. 5.

масштаба 1:2500000 из [State Geological Map..., 2013] граница фиксируется по восточному ограничению серии заливообразных аномалий с повышенным уровнем поля над структурами западной части Южно-Верхоянского синклиория, прилегающими к Сетте-Дабану, что увязывается с влиянием фундамента кратона, перекрытого надвиговыми комплексами ВСНП, сложным строением надвигового пакета и влиянием деструктивных зон (рис. 8, а).

Над погруженной границей фундамента кратона (ПК 1760 км) располагается описанный выше Южно-Верхоянский метаморфический пояс – линейная зона смятия и дислокационного метаморфизма (см. рис. 1) [Parfenov, Kuzmin, 2001]. В этой полосе также располагается серия северо-восточно-ориентированных разломов надвигово-сдвиговой кинематики [Prokopyev et al., 2018b]. Наиболее ярко погруженная граница отражается на детальной карте аномального магнитного

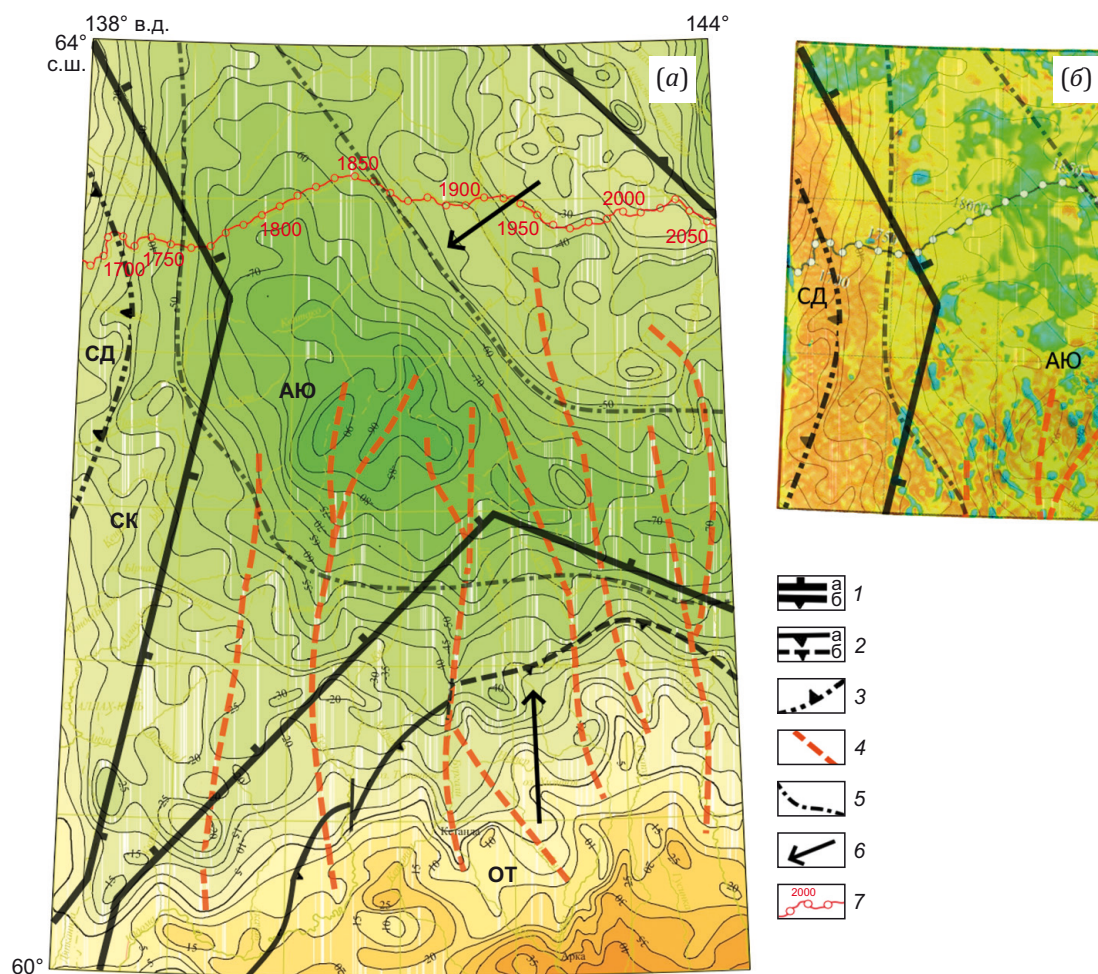


Рис. 8. Структурная схема Южного Верхоянья на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе Схемы гравитационных аномалий (редукция Буге, $\sigma_{ps}=2.67 \text{ г/см}^3$), уровень условный, лист Р-54 [State Geological Map..., 2013] (а), и северо-западный фрагмент Схемы на детальной карте аномального магнитного поля (б).

1 – глубинные границы: а – фундамента Сибирского кратона (СК) и Охотского террейна (ОТ), б – Нелькано-Балыгычанской зоны (НБ); 2 – надвиги структур ядерной части Охотского террейна (а), в т.ч. перекрытые вулканитами Охотско-Чукотского пояса (б); 3 – взбросовые ограничения структур Сетте-Дабанского дуплекс-антиклинория (СД); 4 – разломные зоны, контролирующие проявление магматизма Восточно-Азиатской активной окраины; 5 – контуры Сунтар-Хаятинской отрицательной гравитационной аномалии, отражающие наиболее погруженную зону Аллах-Юньского синклиория (АЮ); 6 – направления тектонических напряжений; 7 – положение профиля 3-ДВ с пикетами.

Fig. 8. Structural scheme of the Southern Verkhoyanye region compiled on the basis of comprehensive interpretation of geological and geophysical data including the Scheme of gravity anomalies (Bouguer reduction, $\sigma_{ps}=2.67 \text{ g/cm}^3$), reference level, sheet P-54 [State Geological Map..., 2013] (a) and northwestern fragment of the scheme on a detailed map of the anomalous magnetic field (b).

1 – deep boundaries: а – basement of the Siberian craton (СК) and the Okhotsk terrane (ОТ), б – Nelkan-Balygychan zone (НБ); 2 – thrusts of the structures of the core part of the Okhotsk terrane (a) including those overlain by volcanics of the Okhotsk-Chukotka belt (б); 3 – reverse fault boundaries of the structures of the Sette-Daban duplex-anticlinorium (СД); 4 – fault zones that control the manifestation of magmatism of the East Asian active margin; 5 – contours of the Suntar-Khayata negative gravity anomaly, reflecting the most submerged zone of the Allah-Yun synclinorium (АЮ); 6 – directions of tectonic stresses; 7 – position of the 3-DV profile with pickets.

поля (рис. 8, б), отделяя зону со слабыми вариациями магнитного поля над погруженной окраиной фундамента от области с повышенным уровнем поля и многочисленными положительными локальными аномалиями, маркирующими тела гранитоидов, развитых восточнее, что соответствует модели на рис. 2.

Яркое отражение граница кратона находит на скоростном сейсмическом разрезе по профилю 3-ДВ [Solovyev et al., 2014; Kashubin et al., 2018a] контрастной субвертикальной аномальной зоной пониженных (на 0.2–0.4 км/с) скоростей продольных волн шириной 30 км, прослеживаемой до глубины 35 км (рис. 9). Такое отражение логично увязывается с пересечением профилем на данном участке поперечно расположенного пояса смятия и дислокационного метаморфизма, в котором зоны наиболее высокого метаморфизма тяготеют к сдвиговым субдолготным разломам. Они фиксируются в виде полос повышенной деформации пород шириной 5–10 км, протяженностью десятки – первые сотни километров и описываются как зоны смятия [Prokopiev, Fridovsky, 1989]. Смену направления погруженной границы с северо-восточного на северо-западное (см. рис. 5) маркируют трещинные интрузии и дайки позднеюрской габбро-диоритовой формации, картируемые на северном фланге Неждановского рудного поля [Parfenov, Kuzmin, 2001].

Погруженная северо-западная граница фундамента Охотского террейна в пределах Южного Верхоянья выделяется при районировании гравитационного поля (см. рис. 8). Центральная часть террейна, где обнажаются комплексы его фундамента, отражается региональной положительной аномалией. От этой аномалии в северном направлении прослеживаются локальные зоны повышенного уровня поля, вызванные влиянием погруженных комплексов фундамента террейна. Окончание этих зон фиксирует северную границу террейна. Над погруженной границей картируется серия средних и мелких гранитоидных массивов, а также она ограничивает крупные складчатые дислокации, развитые южнее, на опущенной поверхности фундамента террейна [State Geological Map..., 2013].

Учитывая прямолинейный характер разломов, ограничивающих погруженные окраины Сибирского кратона и Охотского террейна, их возникновение логично связать с этапом среднепалеозойского рифтогенеза на восточной окраине платформы (см. рис. 5, 6, 7). Геодинамические процессы на этих погруженных границах жесткого кристаллического фундамента во многом определили основные черты тектоники, глубинного строения и развития структур Южного Верхоянья в позднем мезозое.

Между рассмотренными кратонными структурами выделена Центрально-Верхоянская зона, объединяющая структуры внутренней области ВСНП с корой океанического типа в основании [Kungurtsev, Goshko, 2023]. Зона относится к структурам орогенного пояса на месте замкнувшегося океанического бассейна. Зоне соответствует спокойное магнитное поле с некоторым

повышением его уровня до слаболожительных значений на северо-восток, согласующееся с меньшей глубиной залегания подстилающих комплексов океанической коры. На гравитационной карте зоне отвечает Сунтар-Хаятинская региональная отрицательная аномалия, отражающая максимальные мощности верхоянского терригенного комплекса (см. рис. 2, а; рис. 8). Волновые характеристики нижнего слоя коры зоны на профиле (ПК 1750–1900 км) соответствуют скоростям в третьем слое океанической коры (скорость продольных волн от 6.8 до 7.4 км/с и выше [Solov'ev et al., 2016]). По исследованиям [Kouzin, 2019] «слой рефлексивности» в нижней части консолидированной коры связан, прежде всего, с серпентинитовым слоем океанической коры, содержащим большое количество воды. Влияние процесса серпентинизации на породы нижней коры ВСНП подтверждается пониженными значениями плотности этого слоя, в пределах 2.85–2.95 г/см³ [Suvorov et al., 2023].

В прилегающей к Южному Верхоянью платформенной части кратона по результатам районирования оконтурены три региональные структуры: Якутское поднятие фундамента на севере и Батомгско-Майский горст-антиклинорий на юго-востоке с разделяющим их Усть-Майским прогибом (грабен-рифт). Первое имеет форму шестиугольника, ограниченного с севера и юга прямолинейными, субширотными разломами, прослеживаемыми до окраины кратона. Разломы выделяются по гравитационным ступеням, ограничивающим область повышенного уровня поля над поднятием (см. рис. 5, б). Глубина залегания фундамента в центре поднятия менее 500 м [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013; State Geological Map..., 2021b] и увеличивается к его окраинам до 3–4 км (см. рис. 2, ПК 1450–1500 км, см. рис. 3). Усть-Майская рифтовая зона выделяется по отложениям верхнекарельско-нижнерифейского структурного яруса [Obolkin, 2019; Gubin et al., 2022] (см. рис. 4). Повышенные мощности чехла в зоне коррелируют с пониженным уровнем гравитационного поля. Зона имеет с-образную в плане форму, открываясь на севере в сторону Кыллахской зоны. Центральная часть рифтовой зоны имеет субмеридиональное простираие. Во внутренней структуре зоны выделяется серия более погруженных участков с глубиной до фундамента более 5 км. В центральных частях расположенного юго-восточнее Батомгско-Майского горста-антиклинория глубина залегания фундамента составляет менее 1 км [Obolkin, 2019].

5. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Геодинамическая модель земной коры, построенная по сейсмическому разрезе профиля 3-ДВ с учетом данных потенциальных полей, и выполненное тектоническое районирование позволили выделить глубинные структуры региона, дать описание их внутреннего строения, условий образования и увязать с наблюдаемой поверхностной геологией. По сейсмическим данным надежно выделяется платформенный фундамент,

полого погружающийся на восток, под складчатые структуры ВСНП (см. рис. 2). Окончание комплексов фундамента маркирует юго-восточную границу Сибирского кратона. Выполненное тектоническое районирование позволило проследить эту границу на юг, до структур Монголо-Охотского складчатого пояса, и на северо-запад в Западно-Верхоянском секторе флоранда ВСНП (см. рис. 5, 6, 7). Предложенное положение границы Сибирского кратона опирается на надежные геофизические данные о глубинном строении земной коры рассматриваемого региона, в отличие от трактовок, упомянутых во Введении. Граница кратона существенно сдвинута на запад и располагается от Фронтальных надвигов на расстоянии от 50 до 130 км (см. рис. 5, 6, 7). Близкое место и контуры окончания комплексов фундамента кратона по профилю 3-ДВ приведены в статье [Kashubin et al., 2018b]. Аналогичная клиновидная форма окончания фундамента и обтекание его комплексами Байкало-Патомского складчатого пояса фиксируются на южной границе Сибирского кратона по профилю 1-СБ [Kungurtsev et al., 2025].

В дополнение к рассмотренной выше аргументации прохождения границы кратона приведем скоростной разрез продольных волн по профилю 3-ДВ по интерпретации авторов работ [Solovyev et al., 2014; Kashubin et al., 2018a] (рис. 9). На разрезе видна разница в строении земной коры Сибирского кратона и структур ВСНП. В обеих структурах в коре выделяются три слоя, но скоростные характеристики этих слоев резко различаются. Для структур кратона характерна повышенная мощность нижнего слоя и повышенные скорости продольных волн во всех трех слоях по сравнению с расположенными восточнее структурами ВСНП. Граница, на которой происходит скачок скорости продольных волн, расположена на восточной окраине Сетте-Дабана и выражена субвертикальным флексуорообразным уступом, прослеживаемым через два верхних

слоя до глубины 35 км. Продолжение этой границы не менее контрастно проявлено в подкоровом слое до глубины 70 км.

Из приведенного анализа глубинного строения земной коры по профилю 3-ДВ выделяются три фактора, создающие особую геодинамическую обстановку на границе кратона и ВСНП (см. рис. 2):

1) поддвиг нижнего слоя коры ВСНП на глубину до 60 км (а резкое, до 0.5 км/с, снижение скоростей сейсмических волн в подкоровом слое прослеживается под этой зоной до глубины не менее 70 км (рис. 9) [Solovyev et al., 2014; Kashubin et al., 2018a]), что привело к активизации вещества верхней мантии на данном участке;

2) инденторное воздействие края фундамента кратона, приведшее к расщеплению коры ВСНП, что вызвало аномальные температуру и давление в зоне их взаимодействия. На разрезе это отражается ромбовидной линзой сейсмической полупрозрачности (поглощения энергии волн) размером 50×50 км на глубине 30–50 км (ПК 1730–1780 км);

3) максимальное погружение хорса нижней коры ВСНП в мантию до глубины порядка 60 км и разрыв в прослеживании границы М на данном участке (ПК 1735–1750 км).

Влияние этих трех факторов вызвало активизацию флюидно-магматических систем в мантии и нижней коре на данном участке, которая в вышележащих комплексах отражается многочисленными зонами поглощения энергии волн, формирующими вертикальную, с расширением к поверхности, зону слабоинтенсивной сейсмической записи (см. рис. 2, а, б). Зона сформирована отдельными субвертикальными колоннами с характерным рисунком областей повышенного и пониженного сигнала дугообразной формы, расположенных одна над другой, что можно связать с восходящими флюидно-магматическими потоками. Такая

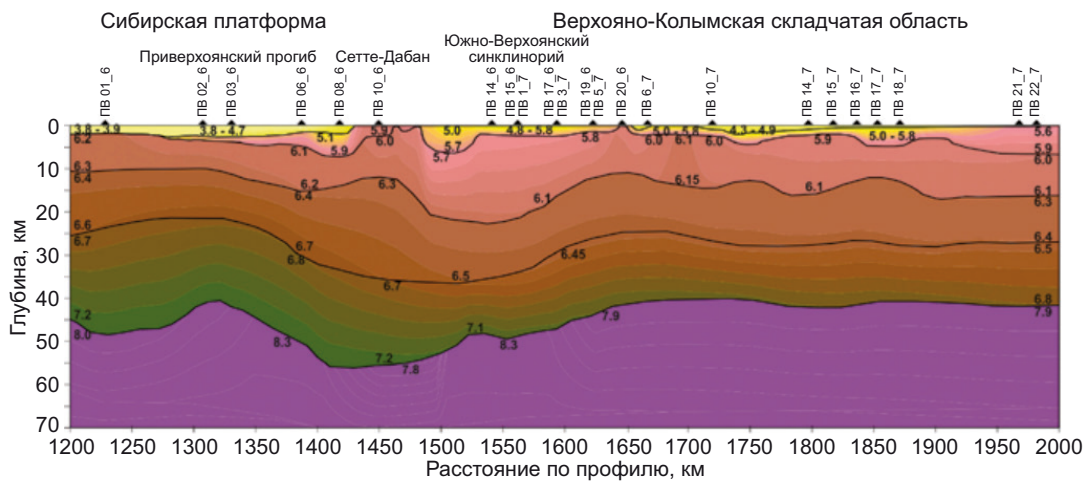


Рис. 9. Скоростная модель земной коры и верхней мантии по продольным волнам для северо-западного участка профиля 3-ДВ ([Solovyev et al., 2014; Kashubin et al., 2018a], с дополнениями).

Fig. 9. Velocity model of the Earth's crust and upper mantle based on longitudinal waves for the northwestern segment of the 3-DV profile (supplemented after [Solovyev et al., 2014; Kashubin et al., 2018a]).

интерпретация процессов на погруженной границе кратона увязывается с повышенным метаморфизмом вышележащих отложений верхоянского комплекса на западе Аллах-Юньского синклиория и проявлением интрузивного магматизма различного состава.

Еще одним независимым критерием оценки правильности предложенной интерпретации строения и тектонических процессов на окраине кратона является ее металлогеническая специализация. Над глубинной границей кратона на поверхности располагается Аллах-Юньская металлогеническая зона, в которой выделяются раннеорогенные и позднеорогенные месторождения золота. Раннеорогенные месторождения локализованы в Присетте-Дабанской полосе Южно-Верхоянского синклиория и образовались не позднее 155 млн лет [Fridovsky, 2023]. Более продуктивные позднеорогенные месторождения распространены восточнее и имеют возраст от 124–119 млн лет [Fridovsky, 2023] до 100–95 млн лет [Prokopiev et al., 2018a]. Такая возрастная миграция золотого оруденения логично увязывается с рассмотренными ниже этапами надвигообразования на окраине кратона и смещением на запад комплексов, вмещающих месторождения, образованные в раннеорогенный этап.

Полученная модель глубинного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона предполагает, что нижняя кора и литосферная мантия ВСНП в позднем мезозое были пододвинуты под окраину кратона. Расстояние пододвигания можно оценить по данным

распределения скоростей Р-волн в верхней мантии рассматриваемого региона [Jakovlev et al., 2012] (рис. 10). На глубине 100 км область низкоскоростных аномалий, отражающих пластичную литосферу, активно деформируемую тектоническими процессами, прослеживается внутрь юго-восточной окраины кратона примерно на 350 км, до средней части Якутского поднятия фундамента. Это совпадает с глубиной проникновения комплексов ВСНП, фиксируемых на профиле 3-ДВ [Kungurtsev, Goshko, 2023]. На глубине 220 км область низкоскоростных аномалий также фиксируется под краем кратона, смещаясь в сторону ВСНП до ПК 1450 км (рис. 10), т.е. нижняя кора и верхи литосферной мантии ВСНП формируют клиновидный вдавиг в окраину кратона вертикальной мощностью более 100 км. Подвиг океанической коры Оймяконского океана под кратон также предполагает Л.Ф. Мишин с соавторами на основе анализа окислительно-восстановительных условий формирования мезозойских магматических пород Восточной Якутии [Mishin et al., 2022].

Предложенная интерпретация согласуется с данными, обобщенными в работе [Khain, Lomize, 2005], о том, что аккреотируемые комплексы океанической коры могут пододвигаться под перекрывающую континентальную плиту на десятки и первые сотни километров, наращивая снизу мощность земной коры. Редкие проявления вулканизма свидетельствуют о том, что пододвигаемая плита не погружается в мантию. Это характерно для субдукции утолщенной океанской

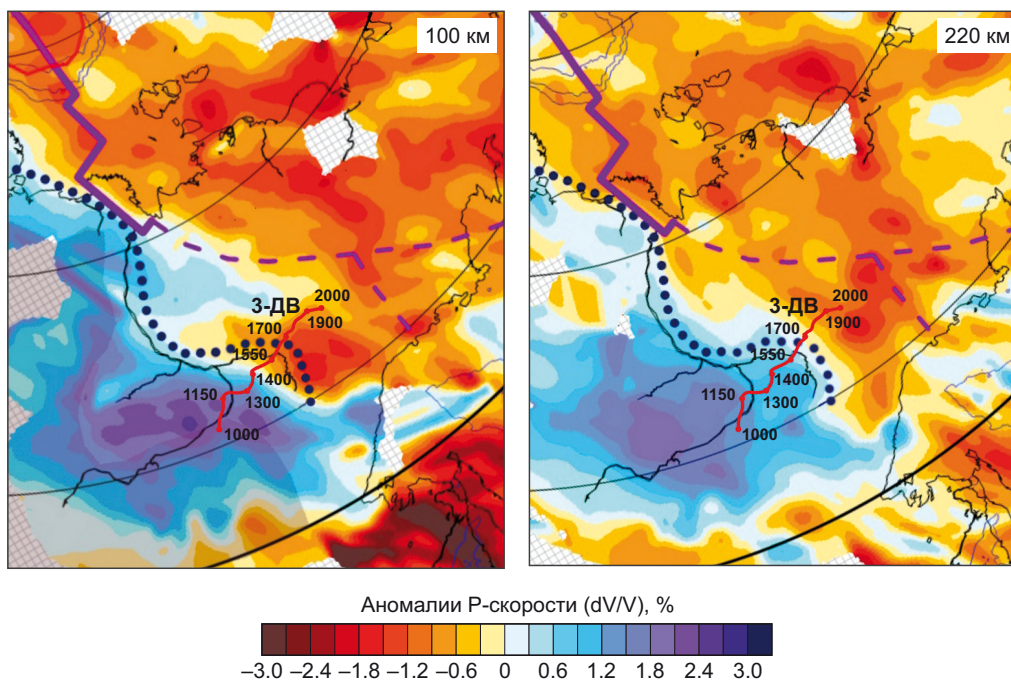


Рис. 10. Аномалии сейсмической скорости Р-волн на глубине 100 и 220 км по результатам региональной сейсмической томографии. Фиолетовая линия – срединно-океанический хребет с возможным продолжением. Пунктиром обозначены складчатые пояса ([Jakovlev et al., 2012], с изменениями). Красной линией показано положение профиля 3-ДВ.

Fig. 10. Anomalies of the seismic P-waves velocity at depths of 100 and 220 km according to the results of regional seismic tomography. The purple line is a mid-oceanic ridge with possible continuation. The dotted line indicates fold belts (modified after [Jakovlev et al., 2012]). The red line shows the position of the 3-DV profile.

литосферы, сопровождаемой резким выполаживанием зоны субдукции [Zakharov et al., 2025]. В современной структуре почти третья часть общей протяженности субдукционных границ приходится на такие авулканические участки. В нашем случае утолщение океанической коры происходит за счет ее дуплексирования [Kungurtsev, Goshko, 2023].

Подобная фиксируемая на профиле 3-ДВ обстановка столкновения континентальной плиты с океанической для Северо-Западного сектора Тихоокеанского пояса описывается в статье [Mitrofanov, 2018], когда при столкновении плит жесткий гранито-метаморфический клин платформы рассекает по высокопластичному слою океаническую плиту. Ее верхняя упругая часть сминает осадочные отложения пассивной континентальной окраины, нижняя пододвигается и компенсационно деформирует образования нижней пластичной части континентальной плиты. Все это приводит к утолщению континентальной коры.

Предлагаемая в статье модель взаимодействия юго-восточной окраины Сибирского кратона и ВСНП близка строению коллизионного орогена Альп, где Адриатическая плита-индентор вдвигается по границе между нижней и верхней корой индентруемой Европейской плиты (рис. 11, б). Возможность такого же взаимодействия [Fuis et al., 1997] предполагается и для хребта Брукса Северной Аляски (рис. 11, а).

По аналогии с этими моделями закономерен вопрос: какой плите принадлежит «слой рефлексивити», подстилающий комплексы архейского фундамента Сибирского кратона от ПК 1750 до ПК 1350 км (см. рис. 2, а). Учитывая увеличение мощности кратона на величину «слоя рефлексивити» и его чешуйчатое строение на этом интервале, логично предположить, что он принадлежит пододвинутым комплексам нижней (океанической) коры ВСНП, которые нарастили снизу кору кратона по аналогии с орогенами Альп и Аляски.

Еще одна область проявления тектономагматической переработки коры выявляется на профиле 3-ДВ в пограничных с Южным Верхояньем структурах кратона, ограниченных в фундаменте блоком II. Эта область фиксируется на всю мощность коры конусовидной зоной с контрастными сейсмическими характеристиками, с крупными участками слабоинтенсивной сейсмической записи в средней коре (см. рис. 2, б–г, ПК 1460–1620 км). На глубинных уровнях зоне соответствует куполовидный подъем границы М до глубины 40 км. Такое строение коры объясняется изгибанием и погружением окраины фундамента кратона под тяжестью накопившихся осадков и давлением надвинутых коллизионных масс в обстановке нарастающего сжатия со стороны ВСНП. В результате в области максимального изгиба в жестком фундаменте появилась веерная система зон трещиноватости и повышенной проницаемости, а в нижней части коры возникли напряжения сильного горизонтального сжатия, приводящие в таких условиях, согласно [Kisin, Koroteev, 2017], к возникновению магматического очага. На разрезе

такие очаги фиксируются в нижней части блока на глубине ниже 37 км областями сейсмической полупрозрачности в «слое рефлексивити», подстилающем кристаллический фундамент платформы, и прослеживаются в подкоровом слое (см. рис. 2, а, в, ПК 1525–1575 км). На этом участке фиксируются перерывы в прослеживании границы М и «размытая» граница фундамента (см. рис. 2, а, б, г). Большая часть разогретого до пластического состояния вещества из очага выжимается вверх, в зону растяжения, что приводит к анатексису, высокоградиентному метаморфизму и метасоматозу в средних и верхних горизонтах коры [Kisin, Koroteev, 2017]. Результаты этих процессов ярко проявлены на скоростном разрезе, где данная зона отражается резким снижением скорости продольных волн до 5.2–6.3 км/с, прослеживаемым до глубины более 25–28 км [Suvorov et al., 2023]. На разрезе ОГТ в осадочном чехле над этой зоной (см. рис. 2, а, ПК 1440–1620 км) фиксируются несколько субвертикальных и послойных участков акустической прозрачности, связанных, по всей вероятности, с внедрением интрузий по раздвигам при изгибе (растяжении) верхних горизонтов коры кратона. Широкое проявление позднемелового интрузивного магматизма среднего субщелочного состава в верхних 5 км разреза на данном участке профиля 3-ДВ обосновано в работе [Polyansky et al., 2017]. Серия высокоинтенсивных положительных аномалий, образующих тектономагматическую кольцевую структуру (см. рис. 7, а, ПК 1400–1700 км), А.Е. Соболевым связывается с крупным базит-гипербазитовым массивом, оказавшим существенное влияние на металлогению северной части Сетте-Дабанской тектонической зоны [Sobolev, 1992].

Описанный механизм возникновения протяженных ослабленных зон повышенной проницаемости вдоль окраин платформы логично объясняет отрыв от последней узких протяженных блоков при среднепалеозойском рифтогенезе (Омулёвский, Приколымский блоки). Мощные толщи осадков, накопившиеся к этому времени, начиная с рифейских, прогнули окраины платформы и привели к возникновению в участках перегиба зон трещиноватости, повышенному тепловому и флюидному потокам из мантии, что облегчило отрыв при рифтогенезе узких краевых зон от платформы.

Сейсмический разрез по профилю позволяет также установить строение и понять механизм формирования Южно-Верхоянского синклиория, образованного как отраженная орогенная структура на окраине кратона. Нагрузка накопившихся осадков повышенной мощности и давление коллизионных масс в обстановке нарастающего сжатия со стороны ВСНП привели к прогибанию окраины кратона до глубины 30 км. Возникший большой угол наклона окраины при коллизионном взаимодействии с надвигающимися комплексами ВСНП привел к срыву платформенного чехла, скупиванию и дуплексированию комплексов на окраине кратона. Возникшая структура служила демпфером, обусловившим формирование перед ним мощного (более

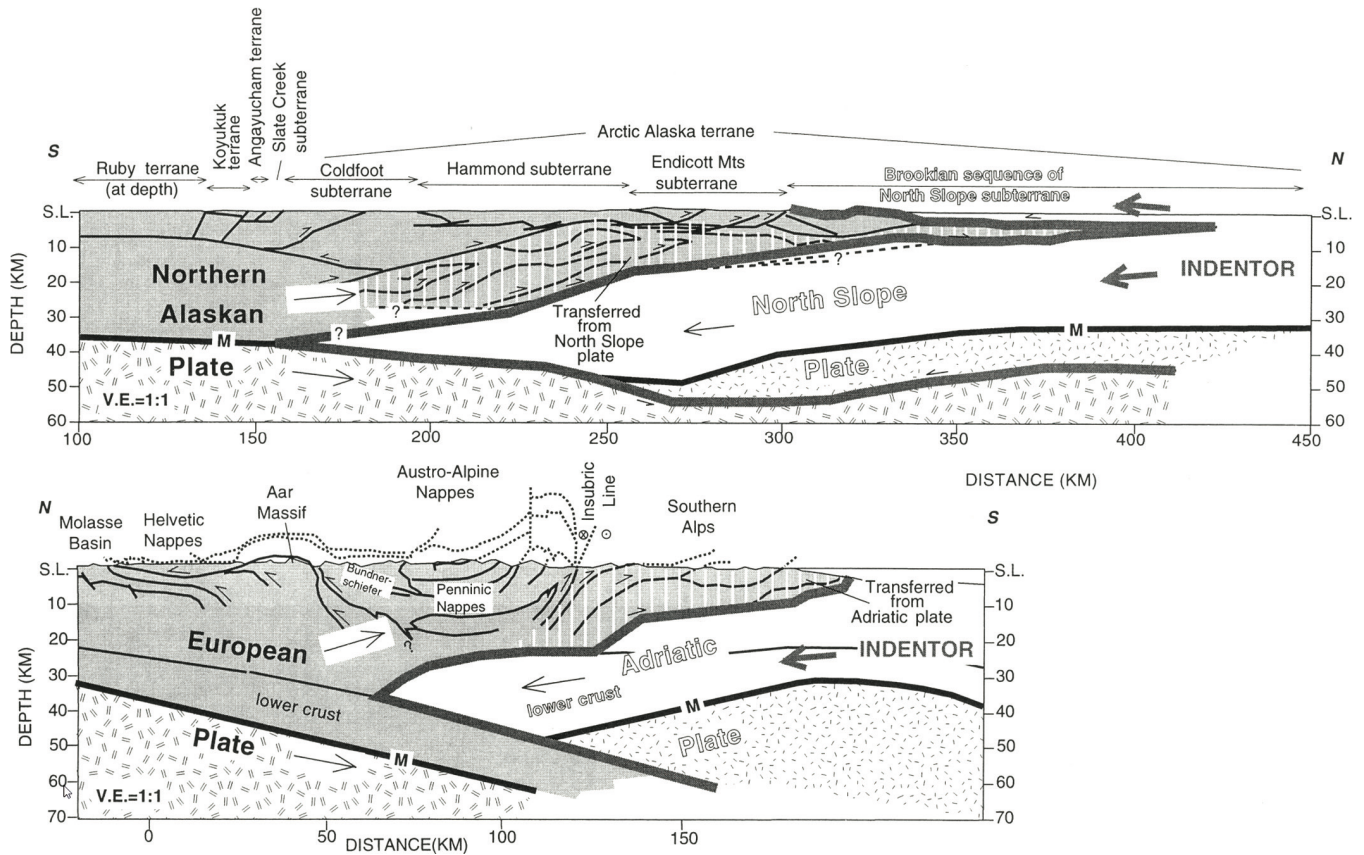


Рис. 11. Геолого-геофизические профили через коллизионные орогены хребта Брукса (Аляска) (вверху) и Альп (внизу) из [Fuis et al., 1997].

Серым цветом показана кора индентируемой плиты, белым – плиты индентора; двойными штрихами – мантия индентируемой плиты, одинарными – плиты индентора. Жирная серая линия отделяет индентируемые плиты (Северная Аляска и Европейская) от плит инденторов (Северный Склон и Адриатика). Трансформированные комплексы плиты-индентора, вошедшие в состав индентируемой плиты, обозначены вертикальными белыми линиями.

Fig. 11. Geological and geophysical profiles through the collisional orogens of the Brooks Range (Alaska) (top) and the Alps (bottom) from [Fuis et al., 1997].

The gray color shows the crust of the indented plate, white color – the crust of the indenter plate; double hatch marks indicate the mantle of the indented plate, single hatch marks – the indenter plates. The thick gray line separates the indented plates (Northern Alaskan and European) from the indenter plates (North Slope and Adriatic). The transformed complexes of the indenter plate, incorporated into the indented plate, are indicated with white vertical lines.

30 км) орогенного комплекса Южно-Верхоянского синклиниория, отражающегося на поверхности хребтом Сунтар-Хаята и одноименным региональным гравитационным минимумом (см. рис. 2, а, 8, а).

Составленная по профилю 3-ДВ геодинамическая модель позволяет расшифровывать тектоническую структуру всего орогенного пояса и определить этапы ее эволюции. Строение складчато-надвигового пакета центральной и южной части Южного Верхоянья (см. рис. 1) аналогично разрезу его северной части отличается только большим продвижением надвигового пакета на платформу, соответственно, повышенным эрозионным срезом. Большая амплитуда надвигания на юге и в центре Южного Верхоянья объясняется коллизионным давлением со стороны Охотского террейна, северная граница которого проходит на широте выхода Кыллахской зоны из-под Крайнего надвига (62° с.ш.) (см. рис. 1, 5). Севернее на окраину платфор-

мы оказывал удаленное воздействие Колымо-Омолонский супертеррейн, что выразилось в меньшей амплитуде надвигания и, соответственно, меньшем уровне эрозионного среза орогена. В связи с этим на профиле 3-ДВ, проходящем через северную часть Южного Верхоянья, нижний надвиговый блок – латеральный аналог Кыллахской зоны – не выведен на поверхность и располагается на глубине от 5 до 20 км. Это полностью согласуется с данными термохронологии [Malyshchev et al., 2018], по которым амплитуда подъема и размыва во фронтальной части Кыллахской зоны составляет 5 км, в Горностахской антиклинали – 8–13 км и в Сетте-Дабанской зоне – более 15 км.

Время формирования надвиговых пакетов Южного Верхоянья также определяется по результатам трекового датирования циркона и апатита. Самые ранние датировки около 160 млн лет, полученные для Кыллахской зоны, фиксируют начало позднемезозойского

надвигообразования в Южном Верхоянье и зеленосланцевый динамометаморфизм [Malyshev et al., 2018]. Эти тектонические события можно связать с заклиниванием зоны субдукции Уяндино-Ясачненской дуги в конце киммериджа – начале титона, в которую погружалась кора Оймяконского бассейна [Kungurtsev, Goshko, 2023]. Следующий этап надвигообразования и складчатости приходится на ранний мел в интервале 130–115 млн лет [Malyshev et al., 2018; Prokopiev et al., 2017]. С ним связано формирование складчатости и внедрение гранитных массивов в Аллах-Юньской зоне, надвигообразование и эксгумация аллохтонов в Кыллахской зоне. Из внешних тектонических событий с этим интервалом совпадает аккреция Охотского террейна в составе Удско-Мургальской дуги к Сибирскому кратону [Prokopiev et al., 2018a; Tikhomirov et al., 2021]. Вхождение Охотского и Омолонского террейнов в состав Евразийской плиты в раннем мелу подтверждают и палеомагнитные данные [Didenko et al., 2002].

Более масштабное надвигообразование фиксируется в Кыллахской зоне в позднем мелу, в интервале 92–67 млн лет [Malyshev et al., 2018]. Этот возрастной интервал совпадает с коллизией Охотоморской плиты, которая заклинила зону субдукции под Охотско-Чукотским вулканоплутоническим поясом. По данным [Bogdanov, Dobretsov, 2002] это произошло в конце турона (90 млн лет), в работе [Yang, 2013] обосновывается интервал 79–77 млн лет. С последним интервалом коррелирует возраст «верхних платобазальтов» [Akinin, 2020; Tikhomirov et al., 2021], специфику которых связывают с возникновением мантийного «окна» при отрыве слэба [Yang, 2013]. Коллизия такой крупной структуры вполне может объяснить масштабные надвиговые процессы в Центральном и Южном Верхоянье сближением с Охотским кратонным террейном, располагавшимся на момент коллизии в структуре Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса. О движении Охотского террейна в северном направлении свидетельствует возникновение по его северной периферии дугообразной системы надвигов и взбросов, включая систему Кюбюменских грабен. Инденторным воздействием со стороны Охотского террейна объясняется смена в рассматриваемый этап доминирующих направлений тектонических движений в Южном Верхоянье на северо-северо-западные и преобладание левосторонних сдвиговых деформаций на границе с платформой [Prokopiev, 1998; Parfenov, Kuzmin, 2001; Pavlovskaya et al., 2025]. Северный дрейф Охотоморской плиты и левосдвиговый характер ее западной границы в позднем мезозое подтверждаются палеомагнитными данными [Lebedev, 2023].

В предложенном варианте геодинамического развития Южного Верхоянья находят отражение обе основные точки зрения на его развитие [Parfenov, Kuzmin, 2001; Prokopiev et al., 2018a]. Формирование юго-восточной окраины Сибирского кратона в позднем мезозое обусловлено как коллизионным воздействием со стороны Колымо-Омолонского супертеррейна на пер-

вых этапах развития, так и влиянием на заключительных этапах субдукционно-коллизионных процессов со стороны Восточно-Азиатской активной континентальной окраины.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплексной интерпретации геологических и геофизических материалов построена геодинамическая модель глубинного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона и Южного Верхоянья. Предпринята попытка взаимоувязки позднемезозойских тектонических процессов, характера проявления магматизма и металлогении на базе построенной модели. Получены следующие основные выводы.

1. Определено положение границы Сибирского кратона в пределах Южного Верхоянья, которую маркирует окончание погруженного платформенного фундамента. Граница прослеживается на расстоянии от 50 до 130 км от Фронтальной системы надвигов. Она отражается линейной зоной дислокационного метаморфизма вдоль западной окраины Южно-Верхоянского синклинория, разломами надвигово-сдвиговой кинематики, контролирует расположение крупных гранитоидных массивов и орогенных месторождений золота.

2. В вертикальном сечении окончание фундамента имеет форму клина, который расщепляет кору ВСНП с надвиганием ее верхней части на кратон и поддвижением нижней части, сложенной комплексами океанической коры, под его фундамент. Над этой зоной фронтального коллизионного взаимодействия наблюдается вертикальная, с расширением к поверхности, колонна с контрастными сейсмическими характеристиками, отражающими восходящие флюидно-магматические потоки.

3. В пограничной полосе кратона, примыкающей к Южно-Верхоянскому сектору, выделена веерная зона трещиноватости и повышенной проницаемости на всю мощность коры, связанная с изгибом и погружением окраины фундамента кратона под тяжестью накопившихся осадков и давлением надвинутых коллизионных масс со стороны ВСНП. В нижней части зоны при сильном горизонтальном сжатии предполагаются условия магнообразования и выжимания магматических продуктов вверх, в зону растяжения. Таким механизмом объясняется специфический характер магматизма пограничной зоны – от щелочно-ультраосновного до среднего субщелочного. В тектоническом плане такой механизм возникновения протяженных ослабленных зон повышенной проницаемости вдоль окраины платформы можно рассматривать как пример, логично объясняющий отрыв от платформы узких протяженных блоков при среднепалеозойском рифтогенезе.

4. Большая амплитуда надвигания на юге и в центре Южного Верхоянья объясняется коллизионным давлением со стороны Охотского террейна, северная граница которого проходит на широте выхода Кыллахской зоны из-под Окраинного надвига. Севернее на

окраину платформы оказывал удаленное воздействие Колымо-Омолонский супертеррейн, что выразилось в меньшей амплитуде надвигания и, соответственно, меньшем уровне эрозионного среза орогена. Это подтверждается выделением на профиле 3-ДВ блока – погруженного аналога Кыллахской зоны. Для Сетте-Дабанского блока установлена структура дуплекс-антиклинория.

5. Три основных позднемезозойских этапа формирования надвиговых пакетов Южного Верхоянья связаны с крупными геодинамическими событиями в окружающих структурах. Ранний этап, около 160 млн лет, фиксирующий начало надвигообразования, синхронен с заклиниванием зоны субдукции Уяндино-Ясачненской дуги, в которую погружалась кора Оймяконского бассейна. Следующий этап – складчатости и надвигообразования – в интервале 130–115 млн лет совпадает с аккрецией Охотского террейна к Сибирскому кратону. Третий, наиболее масштабный, этап надвигообразования в период 92–67 млн лет совпадает с коллизией Охотоморской плиты, которая заклонила зону субдукции под Восточно-Азиатской активной континентальной окраиной. В таком варианте геодинамического развития Южного Верхоянья находят отражение обе основные точки зрения на его развитие.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные советы и замечания, позволившие улучшить восприятие материала статьи, а также В.Ю. Фридовскому за консультирование по металлогении золота региона и В.С. Гриненко за помощь в поиске геологических материалов по теме исследования.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Akinin V.V., 2020. Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt: From Pioneers to the Present (on the 90th Anniversary of V.F. Bely). In: Cretaceous System of Russia and Neighboring Countries: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. Proceedings of the 10th All-Russia Meeting (September 20–25, 2020). NEISRI FEB RAS, Magadan, p. 7–9 (in Russian) [Акинин В.В. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс: от первопроходцев до современности (к 90-летию В.Ф. Белого) // Меловая система России и ближнего зарубежья: про-

блемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы Десятого всероссийского совещания (20–25 сентября 2020 г.). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2020. С. 7–9].

Bogdanov N.A., Dobretsov N.L., 2002. The Okhotsk Volcanic Plateau. Russian Geology and Geophysics 43 (2), 87–99.

Didenko A.N., Bondarenko G.Ye., Sokolov S.D., Kravchenko-Berezhnoy I.R., 2002. Jurassic-Cretaceous History of the Omolon Massif, Northeastern Russia: Geologic and Paleomagnetic Evidence. In: E.L. Miller, A. Grantz, S.L. Klemperer (Eds), Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses. Geological Society of America 360, p. 225–241. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2360-4.225>.

Fridovsky V.Yu., 2023. Origin and Geodynamic Conditions of Formation of Orogenic Gold Deposits of the Verkhoyansk-Kolyma Province. In: Geodynamics and Minerageny of Northern Eurasia. Proceedings of the VI International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (March 13–17, 2022). Buryat State University, Ulan-Ude, p. 551–553 (in Russian) [Фридовский В.Ю. Происхождение и геодинамические условия формирования орогенных золоторудных месторождений Верхояно-Колымской провинции // Геодинамика и минерагения Северной Евразии: Материалы VI международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (13–17 марта 2023 г.). Улан-Удэ: БГУ, 2023. С. 551–553].

Fuis G.S., Murphy J.M., Lutter W.J., Moore T.E., Bird K.J., Christensen N.I., 1997. Deep Seismic Structure and Tectonics of Northern Alaska: Crustal-Scale Duplexing with Deformation Extending Into the Upper Mantle. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 102 (B9), 20873–20896. <https://doi.org/10.1029/96JB03959>.

Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S., 2014. The Recent Structure and the Assumed History of Formation of the Crust in the South-Eastern Segment of the North Asian Craton along Reference Profile 3-DV. Geodynamics & Tectonophysics 5 (3), 785–798 (in Russian) [Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 785–798]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0155>.

Gravimetric Map of Russia and Adjacent Water Areas, 2016. Updated Version of the Base Map "Gravimetric Map of the USSR". Scale 1:250000. Bouguer Reduction ($\sigma=2.67 \text{ g/cm}^3$). VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Гравиметрическая карта России и прилегающих акваторий. Актуализированная версия базовой карты «Гравиметрическая карта СССР». Масштаб 1:250000. Редукция Буге ($\sigma=2.67 \text{ г/см}^3$). СПб.: ВСЕГЕИ, 2016].

Gubin I.A., Kontorovich A.E., Moiseev S.A., 2022. Seismogeological and Structural Characteristic of the Riphean Sediments Within Aldan-Maya Petroleum Region. In: Interexpo GEO-Siberia. Collection of Materials of the XVIII

International Scientific Congress (May 18–20, 2022). Vol. 2. Iss. 1. SSUGT, Novosibirsk, p. 120–129 (in Russian) [Губин И.А., Конторович А.Э., Моисеев С.А. Сейсмогеологическая и структурная характеристика рифейских отложений Алдано-Майской НГО // Интерэкспо Гео-Сибирь: Сборник материалов XVIII международного научного конгресса (18–20 мая 2022 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 2. № 1. С. 120–129]. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-1-120-129>.

Jakovlev A.V., Bushenkova N.A., Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., 2012. Structure of the Upper Mantle in the Circum-Arctic Region from Regional Seismic Tomography. *Russian Geology and Geophysics* 53 (10), 963–971. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.001>.

Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D., Androsov E.A., Vinokurov I.Yu., Shokalsky S.P., 2018a. Crustal Types of Central and Northeast Asia, Far Eastern and Arctic Continent – Ocean Transition Areas. *Regional Geology and Metallogeny* 73, 6–18 (in Russian) [Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Шокальский С.П. Типы земной коры Центральной и Северо-Восточной Азии, дальневосточной и арктической областей перехода континент – океан // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 6–18].

Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D., Kudryavtsev I.V., Androsov E.A., Vinokurov I.Yu., Tarasova O.A., Erinchek Yu.M., 2018b. Deep Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle in Northeastern Eurasia. *Regional Geology and Metallogeny* 76, 9–21 (in Russian) [Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 9–21].

Khain V.E., Lomize M.G., 2005. *Geotectonics with Fundamentals of Geodynamics*. University Book House, Moscow, 560 p. (in Russian) [Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.].

Kisin A.Yu., Koroteev V.A., 2017. Block Folding and Orogenesis. IGG UrB RAS, Ekaterinburg, 349 p. (in Russian) [Кисин А.Ю., Коротеев В.А. Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 349 с.].

Kosygin Yu.A., Basharin A.K., Berzin N.A., Volontey G.M., Votakh O.A., Krasilnikov B.N., Parfenov L.M., 1964. Precambrian Tectonics of Siberia. *Nauka, Novosibirsk*, 126 p. (in Russian) [Косыгин Ю.А., Башарин А.К., Берзин Н.А., Волонтэй Г.М., Вотях О.А., Красильников Б.Н., Парфенов Л.М. Докембрийская тектоника Сибири. Новосибирск: Наука, 1964. 126 с.].

Kouzina A.M., 2019. On the Fluid Zonality of the Consolidated Earth's Crust According to CDPM-DSS Acquisition. Part 2. The Continental Crust (Water Content). *Actual Problems of Oil and Gas* 1 (24), 1–23 (in Russian) [Кузина А.М. О флюидной зональности консолидированной земной коры по данным наблюдений МОГТ-ГСЗ. Часть 2. Континентальная кора (водосодержание) // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 1. № 24. С. 1–23]. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art3>.

Kungurtsev L.V., Goshko E.Y., 2023. Deep Structure and Formation Model of Continental Crust of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt in the Late Mesozoic. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0706 (in Russian) [Кунгурцев Л.В., Гошко Е.Ю. Глубинное строение и модель формирования континентальной коры Верхоянского складчато-надвигового пояса в позднем мезозое // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 3. 0706]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0706>.

Kungurtsev L.V., Goshko E.Yu., Buslov M.M., Liseikin A.V., 2025. Deep-Seated Boundary Structures of the Siberian Craton and the Baikal-Patom Fold-and-Thrust Belt in the Cross-Section of the 1-SB-Vostochny Profile and Its Continuation Along the Vitim River. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (5), 0848 (in Russian) [Кунгурцев Л.В., Гошко Е.Ю., Буслов М.М., Лисейкин А.В. Глубинное строение пограничных структур Сибирского кратона и Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса в створе профиля 1-СБ-Восточный и его речного продолжения по р. Витим // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 5. 0848]. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-5-0848>.

Lebedev I.E., 2023. Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of Northeastern Eurasia Based on New Paleomagnetic Data for the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt. In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of Scientific Meeting (October 17–20, 2023). Iss. 21. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 163–164 (in Russian) [Лебедев И.Е. Мезозой-кайнозойская тектоническая эволюция Северо-Восточной Евразии по новым палеомагнитным данным для Охотско-Чукотского вулканического пояса // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции (17–20 октября 2023 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2023. Вып. 21. С. 163–164].

Malyshev S.V., Khudoley A.K., Glasmacher U.A., Kazakova G.G., Kalinin M.A., 2018. Constraining Age of Deformation Stages in the South-Western Part of Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt by Apatite and Zircon Fission-Track Analysis. *Geotectonics* 52 (6), 634–646. <https://doi.org/10.1134/S0016852118060055>.

Map of the Anomalous Magnetic Field of Russia and Adjacent Water Areas, 2016 (Updated Version). The 1965 Era (The VSEGEI Model). Scale 1:2500000. VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Карта аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий (актуализированная версия). Эпоха 1965 г. (Модель ВСЕГЕИ). Масштаб 1:2500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016].

Mishin L.F., Konovalova E.A., Taltykin Y.V., 2022. Effects of Redox Conditions on Geochemical and Metallogenic Zoning: An Example of Mesozoic Magmatic Belts in Eastern Yakutia. *Petrology* 30 (3), 258–277. <https://doi.org/10.1134/S0869591122030055>.

Mitrofanov N.P., 2018. Geodynamic Problems of Metallogeny of Tin, Tungsten, Molybdenum. *National Geology* 6, 3–13 (in Russian) [Митрофанов Н.П. Геодинамические проблемы металлогении олова, вольфрама, молибдена //

Отечественная геология. 2018. № 6. С. 3–13]. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2018-10022>.

Obolkin A.P., 2019. Modeling of the Surface of the Crystalline Basement in the Aldan-Maya Trough Based on Seismic, Gravity, and Magnetic Exploration. In: *Tectonics, Deep Structure and Minerageny of East Asia. The X Kosygin Readings. Proceedings of the All-Russia Conference with International Participation (September 10–12, 2019)*. ITIG FEB RAS, Khabarovsk, p. 85–87 (in Russian) [Оболкин А.П. Построение поверхности кристаллического фундамента Алдано-Майского прогиба по материалам сейсмо-, гравитационной и магниторазведки // Тектоника, глубинное строение и минералогия востока Азии. X Косыгинские чтения: Материалы Всероссийской конференции с международным участием (10–12 сентября 2019 г.). Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2019. С. 85–87].

Oxman V.S., 2000. *Tectonics of Chersky Collision Belt (North-East Asia)*. GEOS, Moscow, 269 p. (in Russian) [Окман В.С. Тектоника коллизионного пояса Черского (северо-восток Азии). М.: ГЕОС, 2000. 269 с.].

Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Eds), 2001. *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, 571 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.].

Pavlovskaya E.A., Khudoley A.K., 2024. *Tectonics and Geological Structure of the Maya-Kyllakh Zone (South Verkhoyansk Region) Obtained from Balanced Cross-Sections*. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0742 (in Russian) [Павловская Е.А., Худолей А.К. Тектоника и геологическое строение Майско-Кыллахской зоны (Южное Верхоянье) по результатам построения сбалансированных разрезов // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 1. 0742]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0742>.

Pavlovskaya E.A., Khudoley A.K., Rukh I.B., Malyshev S.V., 2025. *Structural Evolution, Stress Field Reconstruction and U-Pb Dating of Calcite from the May-Kyllakh Zone (South Verkhoyansk Sector of the Verkhoyansk Fold-Thrust Belt)*. In: *Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle: Fundamental Problems – 2025. Proceedings of the LVI Tectonic Meeting (January 27 – February 1, 2025)*. GEOS, Moscow, p. 409–413 (in Russian) [Павловская Е.А., Худолей А.К., Рух И.Б., Малышев С.В. Структурная эволюция, реконструкция полей напряжений и U-Pb датирование кальцита из Майско-Кыллахской зоны (Южно-Верхоянский сектор Верхоянского складчато-надвигового пояса) // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2025: Материалы LVI тектонического совещания (27 января – 1 февраля 2025 г.). М.: ГЕОС, 2025. С. 409–413]. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2025.17.39149>.

Petrov O.V. (Ed.), 2016. *Geological Map of Russia and Adjacent Water Areas. Scale 1:2500000*. VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1:2500000 / Ред. О.В. Петров. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016].

Polyansky P.O., Salnikov A.S., Emanov A.F., Zhabin V.V., 2017. *Head Wave Time Sections of the Upper Earth's Crust Along the Survey Base Line 3-DV (Northwestern Block)*. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 2, 112–122 (in Russian) [Полянский П.О., Сальников А.С., Еманов А.Ф., Жабин В.В. Временные разрезы головных волн верхней части земной коры на опорном профиле 3-ДВ (северо-западный участок) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 2. С. 112–122].

Prokopyev A.V., 1998. *The Verkhoyansk-Chersky Collisional Orogenic Belt*. *Russian Journal of Pacific Geology* 17 (5), 3–10 (in Russian) [Прокопьев А.В. Верхояно-Черский коллизионный ороген // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 5. С. 3–10].

Prokopyev A.V., Borisenko A.S., Gamyarin G.N., Fridovsky V.Yu., Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., Trunilina V.A., Vasyukova E.A. et al., 2018a. *Age Constraints and Tectonic Settings of Metallogenic and Magmatic Events in the Verkhoyansk-Kolyma Folded Area*. *Russian Geology and Geophysics* 59 (10), 1237–1253. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.004>.

Prokopyev A.V., Fridovsky V.Yu., 1989. *Structural Studies in Southern Verkhoyansk*. In: *Geology and Ore Potential of Yakutia*. YSU, Yakutsk, p. 12–23 (in Russian) [Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю. Структурные исследования в Южном Верхоянье // Геология и рудоносность Якутии. Якутск: ЯГУ, 1989. С. 12–23].

Prokopyev A.V., Stockli D.F., Vasilyev D.A., 2022. *High-Amplitude Thrust Displacements in the South Verkhoyansk Orogenic Belt (NE Asia)*. In: *Geology and Mineral Resources of the Northeast Russia. Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 65th Anniversary of the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (March 23–25, 2022)*. North-Eastern Federal University, Yakutsk, p. 124–126. (in Russian) [Прокопьев А.В., Стокли Д.Ф., Васильев Д.А. Высокоамплитудные надвиговые перемещения в Южноверхоянском орогенном поясе (СВ Азии) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН (23–25 марта 2022 г.). Якутск: СВФУ, 2022. С. 124–126]. https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_25.

Prokopyev A.V., Toro H.P., Dumitru T.A., Miller E.L., 2017. *Mezozoic Orogeny in the Southern Verkhoyanye*. In: *Geology and Mineral Resources of the Northeastern Regions of Russia. Proceedings of the VII All-Russia Scientific and Practical Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the Institute of Diamond and Precious Metal Geology SB RAS (April 5–7, 2017)*. Vol. 2. North-Eastern Federal University, Yakutsk, p. 203–207 (in Russian) [Прокопьев А.В., Торо Х.П., Думитру Т.А., Миллер Э.Л. Мезозойский орогенез в Южном Верхоянье // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии

алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН (5–7 апреля 2017 г.). Якутск: СВФУ, 2017. Т. 2. С. 203–207].

Prokopyev A.V., Toro J., Miller E.L., 2018b. Late Paleozoic-Mesozoic Paleogeography of South-Verkhoyansk Region from U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Arctic and Subarctic Natural Resources* 26 (4), 5–15 (in Russian) [Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л. Позднепалеозойско-мезозойская палеогеография Южного Верхоянья по данным U-Pb датирования обломочных цирконов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 26. № 4. С. 5–15].

Razvozhzaeva E.P., Taltykin Yu.V. 2023. The Structure of the Kyllakh Zone (Southern Verkhoyansk Fold and Thrust Belt) from Seismic Profiling Data. *Russian Journal of Pacific Geology* 17 (1), 1–18. <https://doi.org/10.1134/S1819714023010074>.

Reference Geological and Geophysical Profiles of Russia, 2013. Deep Seismic Sections Along the DSS Profiles Performed from 1972 to 1995. Atlas (in Russian) [Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год: Атлас]. Available from: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/> (Last Accessed September 26, 2025).

Sal'nikov A.S., Starosel'tsev V.S., Sobolev P.N. et al., 2014. Report on the Results of Work to Establish the Geological and Geophysical Reference Profile 3 DV (Northeastern Segment). Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk (in Russian) [Сальников А.С., Старосельцев В.С., Соболев П.Н. и др. Отчет о результатах работ по объекту «Создание опорного геолого-геофизического профиля 3 ДВ (северо-восточный участок)». Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014].

Sobolev A.E., 1992. Vendian Mafites and Minerageny of the Southern Verkhoyanye. *Doklady Earth Sciences* 327 (4–6), 557–560 (in Russian) [Соболев А.Е. Вендские мафиты и минерогения Южного Верхоянья // Доклады РАН. 1992. Т. 327. № 4–6. С. 557–560].

Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Sal'nikov A.S., Shibaev S.V., Timofeev V.Yu., Liseikin A.V., Shenmaier A.E., 2016. Deep Seismic Structure of the Boundary Zone Between the Eurasian and Okhotsk Plates in Eastern Russia (Along the 3-DV Deep Seismic Sounding Profile). *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1613–1625. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.007>.

Solovyev V.M., Seleznev V.S., Salnikov A.S., Kashubina T.V., Shenmaier A.E., 2014. Effective Seismic Models of Media Used in DSS Operations on Base Lines in Eastern Russia. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 4, 74–86 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Кашубина Т.В., Шенмайер А.Е. Использование эффективных сейсмических моделей сред при работах ГСЗ на опорных профилях в восточной части России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 4. С. 74–86].

State Geological Map of the Russian Federation, 2013. Verkhoyansk-Kolyma Series. Scale of 1:1000000. Sheet P-54

(Oymyakon). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 400 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Верхояно-Колымская. Масштаб 1:1000000. Лист P-54 (Оймякон): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. 400 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2016. Verkhoyansk-Kolyma Series. Scale of 1:1000000. Sheet P-55 (Susuman). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 522 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Верхояно-Колымская. Масштаб 1:1000000. Лист P-55 (Сусуман): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 522 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2020. Yana-Indigirka Series. Scale of 1:200000. Sheet Q-54-II (Oyosordokh River). Explanatory Note. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 122 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Яно-Индибирская. Масштаб 1:200000. Лист Q-54-II (р. Ойосордох): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2020. 122 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2021a. Far Eastern Series. Scale of 1:1000000. Sheet O-54 (Okhotsk). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 504 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Дальневосточная. Масштаб 1:1000000. Лист O-54 (Охотск): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. 504 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2021b. Verkhoyansk-Kolyma Series. Scale of 1:1000000. Sheet P-53 (Khandyga). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 431 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Верхояно-Колымская. Масштаб 1:1000000. Лист P-53 (Хандыга): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. 431 с.].

Suvorov V.D., Pavlov E.V., Melnik E.A., 2023. On the Question of Signs for Folding in the Earth's Crust of the Aldan-Stanovoy Shield According to Seismic Density Data (Profile 3-DV). In: *Geodynamics and Minerageny of Northern Eurasia. Proceedings of the VI International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (March 13–17, 2023)*. Buryat State University, Ulan-Ude, p. 497–499 (in Russian) [Суворов В.Д., Павлов Е.В., Мельник Е.А. К вопросу о признаках складчатости земной коры Алдано-Станового щита по сейсмоплотностным данным (профиль 3-ДВ) // Геодинамика и минерогения Северной Евразии: Материалы VI международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (13–17 марта 2023 г.). Улан-Удэ: БГУ, 2023. С. 497–499].

Tikhomirov L.P., Lebedev I.E., Pasenko A.M., Lhuillier F.J.L., Alekseev D.V., Pavlov V.E., 2021. The "Upper Basalts" of the East Chukotka Segment of Okhotsk-Chukotka Belt: The Along Strike Migration of Volcanic Activity or the Overprint by Later Magmatic Event? *Doklady Earth Sciences* 501 (2), 1038–1042. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21120151>.

Tretyakov F.F., 2017. Some Structural Features of the Consolidated Crust of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt.

National Geology 5, 116–122 (in Russian) [Третьяков Ф.Ф. Некоторые аспекты строения консолидированной коры Верхоянского складчато-надвигового пояса // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 116–122].

Tretyakov F.F., 2021. Modern Aspects of the Tectonic Structure of the South Verkhoyansk Synclinorium. *Russian Journal of Pacific Geology* 15 (3), 268–277. <https://doi.org/10.1134/S1819714021030088>.

Tretyakov F.F., 2022. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoid System (Eastern Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources* 27 (2), 181–194 (in Russian) [Третьяков Ф.Ф. Тектоника Верхояно-Колымской системы мезозойд (Восточная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Т. 27. № 2. С. 181–194]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-181-194>.

Tretyakov F.F., Prokopiev A.V., 2015. Tectonic Pattern of the Northern South-Verkhoyansk Orogenic Belt (Eastern Yakutia) on Evidence Derived from Reference Seismic Profile 3-DV. *National Geology* 5, 96–99 (in Russian) [Третья-

ков Ф.Ф., Прокопьев А.В. Тектоническое строение северной части Южно-Верхоянского орогенного пояса (Восточная Якутия) по данным опорного геофизического профиля 3-ДВ // Отечественная геология. 2015. № 5. С. 96–99].

Yang Y.-T., 2013. An Unrecognized Major Collision of the Okhotomorsk Block with East Asia During the Late Cretaceous, Constraints on the Plate Reorganization of the Northwest Pacific. *Earth-Science Reviews* 126, 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.07.010>.

Zakharov V.S., Perchuk A.L., Gerya T.V., 2025. The Early Precambrian Effect of Oceanic Crustal Thickness on the Subduction Style Obtained by Numerical Petrological and Thermomechanical Modeling. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (5), 0844 (in Russian) [Захаров В.С., Перчук А.Л., Геря Т.В. Влияние мощности океанической коры на стиль субдукции в раннем докембрии по результатам численного петролого-термомеханического моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 5. 0844]. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-5-0844>.