



TECTONICS AND GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE MAYA-KYLLAKH ZONE (SOUTH VERKHoyANSK REGION) OBTAINED FROM BALANCED CROSS-SECTIONS

E.A. Pavlovskaya¹ , A.K. Khudoley^{1,2}

¹ Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

² Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny Ave, Saint Petersburg, 199106, Russia

ABSTRACT: A technique for balancing cross-sections is used to construct geometrically consistent structural sections through fold-thrust belts. Unlike the predecessor studies, the balanced cross-sections in this study were obtained using the deep seismic sounding and well data and Move Software. Two detailed balanced cross-sections pass through the central part of the South Verkhoyansk region: the 80 km long Yudoma cross-section running along 59°45' N, and the 122 km long Allakh-Yun cross-section within 60°40' – 61°00' N. Both sections are characterized by a thin-skinned structure, "mechanical stratigraphy", emergent leading imbricate fans in the foreland, thick Riphean strata, and eastward dip of the detachment surface. The surface shortening values are ~33 % for the Yudoma cross-section and ~26 % for the Allakh-Yun cross-section, showing an old-to-young-complex decrease from 39 % for the Yudoma cross-section to 19 % for the Allakh-Yun cross-section. On the Yudoma cross-section, the detachment occurs in the Middle Riphean deposits and dips down to 8 km; on the Allakh-Yun cross-section, it occurs in the Lower Riphean deposits and dips down to 15 km. The difference in the detachment level may indicate the presence of a ramp between the cross-sections or an inaccurate localization of a ramp between the Central and Kyllakh-Eibeke-Khayata segments. The changes in the geological structure across and along the strike of the orogen are traced; the obtained cross-sections are compared with each other, with other cross-sections across the South and West Verkhoyansk regions, and with the cross-sections through the foreland fold and thrust belts of the Urals, Appalachians, and Cordillera of North America.

KEYWORDS: Verkhoyansk fold-thrust belt; South Verkhoyansk; Kyllakh zone; structural interpretation, balanced cross-sections

FUNDING: The study was partially supported by the Karpinsky Russian Geological Research Institute project on ASE-200, sheet O-53-V.



EDN: XERAAO

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Elena A. Pavlovskaya, pavlovskaya.elena@gmail.com

Received: April 22, 2023

Revised: July 3, 2023

Accepted: July 12, 2023

FOR CITATION: 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. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0742

ТЕКТОНИКА И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАЙСКО-КЫЛЛАХСКОЙ ЗОНЫ (ЮЖНОЕ ВЕРХОЯНЬЕ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСТРОЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННЫХ РАЗРЕЗОВ

Е.А. Павловская¹, А.К. Худолей^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7/9, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, Санкт-Петербург, пр-т Средний, 74, Россия

АННОТАЦИЯ. Метод сбалансированных разрезов применяется для построения геометрически непротиворечивых структурных разрезов через складчато-надвиговые пояса. В отличие от работ предшественников, в настоящем исследовании построение сбалансированных разрезов производилось с учетом данных глубинной сейсморазведки, скважин и с использованием программного обеспечения Move. Построенные два детальных сбалансированных разреза проходят через центральную часть Южного Верхоянья и имеют субширотную ориентировку: Юдомский разрез протяженностью 80 км примерно по 59°45' с.ш. и Аллах-Юньский разрез протяженностью 122 км в пределах полосы 60°40' – 61°00' с.ш. Для обоих разрезов характерен тонкочешуйчатый структурный стиль, «механическая стратиграфия», обнаженные передовые чешуйчатые веера в форланде, увеличение мощностей рифея и погружение поверхности детачмента к востоку. Рассчитанные значения сокращения поверхности составляют ~33 % для Юдомского и ~26 % для Аллах-Юньского разреза, но от древних комплексов к молодым величина сокращения убывает от 39 % для Юдомского разреза до 19 % для Аллах-Юньского разреза. На Юдомском разрезе детачмент проходит в отложениях среднего рифея и погружается до 8 км, а на Аллах-Юньском – в нижнерифейских породах и погружается до 15 км. Различие в уровне базального надвига может указывать на наличие рампа между разрезами или на неточное определение положения рампа между Центральным и Кыллахско-Эбейке-Хаятинским сегментами. Прослежены изменения геологического строения вкрест и по простиранию орогена, проведено сравнение построенных разрезов между собой, с другими разрезами по Южному и Западному Верхоянью, а также с разрезами через форланды складчато-надвиговых систем Урала, Аппалачей и Кордильер Северной Америки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Верхоянский складчато-надвиговой пояс; Южное Верхоянье; Майско-Кыллахская зона; структурная интерпретация, сбалансированные разрезы

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование частично проводилось в рамках проекта Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского по ГДП-200, лист О-53-V.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод сбалансированных разрезов широко применяется для проверки корректности построения разрезов через складчато-надвиговые пояса [Cawood, Bond, 2019; Parfenov et al., 1995; Van der Pluijm, Marshak, 2004; Price, 1981]. Впервые он был использован К. Дальстромом в 1960-х годах при изучении строения передового прогиба и фронтальных частей складчато-надвиговых структур Скалистых гор в провинции Альберта, Канада [Dahlstrom, 1969; Woodward et al., 1989]. Ниже рассмотрены ключевые положения этого метода.

Сбалансированный разрез – это такой разрез, который может быть развернут путем распрямления складок и смещения слоев по разломам в обратном направлении в додеформационное состояние, а реставрированный разрез – это разрез, развернутый в додеформационное состояние. Если разрез сбалансирован, то на реставрированном разрезе все слои должны совместиться вдоль траектории надвигов без пробелов и перекрытий. При этом длина слоев для различных горизонтов должна приблизительно совпадать, а траектории разломов на реставрированном разрезе

должны иметь геометрически реалистичную форму с сохранением вергентности структур [Woodward et al., 1989; Gaiduk, Prokoviev, 1999]. Важным результатом построения сбалансированного и реставрированного разрезов является возможность рассчитать величину сокращения поверхности при складчатости, что дает количественную оценку деформации в масштабе складчато-надвиговой системы в целом.

Основным объектом настоящего исследования является внешняя часть Южного Верхоянья – Майско-Кыллахская зона, для которой построение сбалансированных разрезов уже производилось рядом исследователей [Khudoley, Guriev, 2003; Prokoviev, 1989; Prokoviev, Deikunenko, 2001]. Эти разрезы отличались упрощенным изображением структур и по этой причине могут рассматриваться как предварительные или же охватывали лишь незначительные фрагменты Майско-Кыллахской зоны. Оценка величины сокращения поверхности тоже приводилась [Razvozhzaeva, Taltykin, 2023], но сбалансированные разрезы в этой работе не приведены. Цель данной работы – на основе детальных сбалансированных разрезов, построенных с учетом новых

геофизических данных и с помощью современного программного обеспечения Move (Midland Valley), получить более подробные структурные характеристики Майско-Кыллахской зоны, которые позволят проследить изменения геологического строения вкрест и по простиранию складчато-надвиговой структуры.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Внешняя зона Верхоянского складчато-надвигового пояса (Верхоянского СНП), сложенного осадочными образованиями пассивной окраины Сибирского палеоконтинента, с севера на юг подразделяется на Оленёкский, Западно-Верхоянский и Южно-Верхоянский секторы (рис. 1, а) [Parfenov et al., 1995; Prokopiev, Deikunenko, 2001]. Характерной особенностью Южно-Верхоянского сектора является то, что везде, кроме его северной части, передовой прогиб отсутствует и форланд Верхоянского СНП надвинут непосредственно на чехол Сибирской платформы. Южно-Верхоянский сектор отделяется от Сибирской платформы Нелькано-Кыллахским надвигом, состоящим из нескольких фрагментов (Нельканский, Кыллахский, Эбейке-Хаятинский и Окраинной Цепи) и с запада на восток подразделяется на три различных по своему структурному стилю и возрасту отложений зоны: Майско-Кыллахскую и Сетте-Дабанскую, образующие хребет Сетте-Дабан, и Аллах-Юньскую, известную также как Южно-Верхоянский синклиниорий (рис. 1, б) [Prokopiev, Deikunenko, 2001].

Майско-Кыллахская зона представляет собой типичный передовой чешуйчатый веер, т. е. систему надвигов, ответвляющихся от общего базального срыва, при этом наибольшее перемещение фиксируется по внешнему Нелькано-Кыллахскому надвигу. В пределах Сибирской платформы перед фронтом складчато-надвиговой системы разрывные нарушения и складчатые деформации отсутствуют. Фронт надвиговой системы является обнаженным по классификации [Morley, 1986], и для структур такого типа характерна значительная эрозия их внешних частей.

Для складчато-надвиговой структуры Майско-Кыллахской зоны характерны узкие сжатые антиклинали, разделенные широкими корытообразными синклиналями. Висячих крыльях надвиговых пластин выделяются антиклинали окончания разлома (fault-propagation fold). Западные крылья антиклиналей в основном размыты эрозией и сохранились преимущественно в восточной части разреза. Осевые плоскости антиклиналей погружаются на восток. Восточнее антиклиналей находятся широкие синклинали, восточные крылья которых срезаны поверхностями надвигов [Khudoley, Guriev, 2003; Gusev, 1979; Prokopiev, 1989; Prokopiev, Deikunenko, 2001].

В Сетте-Дабанской зоне, имеющей структуру «пальмового дерева», важной особенностью является наличие крупных разломов со значительными левосдвиговыми перемещениями – Бурхалинского и Сетаньинского (рис. 1) [Prokopiev, Deikunenko, 2001].

Современная складчатая структура Майско-Кыллахской и Сетте-Дабанской зон была создана в ходе нескольких этапов деформаций, варьировавшихся по возрасту от поздней юры до олигоцена [Malyshev et al., 2018; Prokopiev et al., 2004, 2009].

Выделяются три основных цикла осадконакопления, соответствующие основным этапам тектонической эволюции Южно-Верхоянского сектора: ранне-позднерифейский, вендско-раннепалеозойский и среднепалеозойско-мезозойский [Khudoley, Prokopiev, 2007; Prokopiev, Deikunenko, 2001]. Каждая из зон сложена преимущественно отложениями одного из циклов осадконакопления: Майско-Кыллахская – рифейскими, Сетте-Дабанская – вендско-раннепалеозойскими и Южно-Верхоянский синклиниорий – среднепалеозойско-мезозойскими отложениями (рис. 2).

На большей части Сибирской платформы мощность рифейских отложений не превышает первых сотен метров и достигает первых километров в авлакогенах, тогда как в пределах Майско-Кыллахской зоны рифейские отложения широко распространены и имеют значительную мощность. Стратиграфия и корреляция рифейских отложений отличаются сложностью и обсуждались в многочисленных работах советских и российских геологов [Khudoley et al., 2001; State Geological Map..., 1984, 1990, 1999, 2012; Nevolin et al., 1978; Prokopiev et al., 2001; Semikhatov, Serebryakov, 1983; Sobolev et al., 2017; Sukhorukov, 1986; Yan-Zhin-Shin, 1983]. Основу региональной стратиграфической шкалы рифейских отложений региона составляют крупные осадочные ритмы (серии), которые соответствуют главным этапам осадконакопления и обычно разделены региональными перерывами или несогласиями. Серии делятся на свиты, отвечающие стадиям осадконакопления и связанные постепенными переходами [Semikhatov, Serebryakov, 1983].

В Майско-Кыллахской зоне отложения рифея представлены учурской серией нижнего рифея, аимчанской и керпыльской сериями среднего рифея, лахандинской и уйской сериями верхнего рифея и имеют мощность ~12–14 км (рис. 2, а) [Khudoley et al., 2001; Prokopiev et al., 2001; Semikhatov, Serebryakov, 1983]. Учурская, аимчанская, керпыльская и лахандинская серии имеют терригенно-карбонатный состав и отлагались преимущественно в мелководных обстановках, тогда как уйская серия имеет терригенный состав, и в ее средней части распознаются осадки турбидного происхождения [Khudoley, Guriev, 2003; Yan-Zhin-Shin, 1983].

Отложения юдомской серии венда залегают на рифейских с угловым несогласием и глубоким размывом и представлены мелководно-морскими кварцевыми песчаниками и перекрывающими их доломитами и известняками. Также в Майско-Кыллахской зоне распространены терригенно-карбонатные отложения кембрия, нижнего – среднего ордовика, нижнего карбона, терригенные нижней – средней перми, нижней – средней юры и четвертичные (рис. 2). Наибольшая суммарная

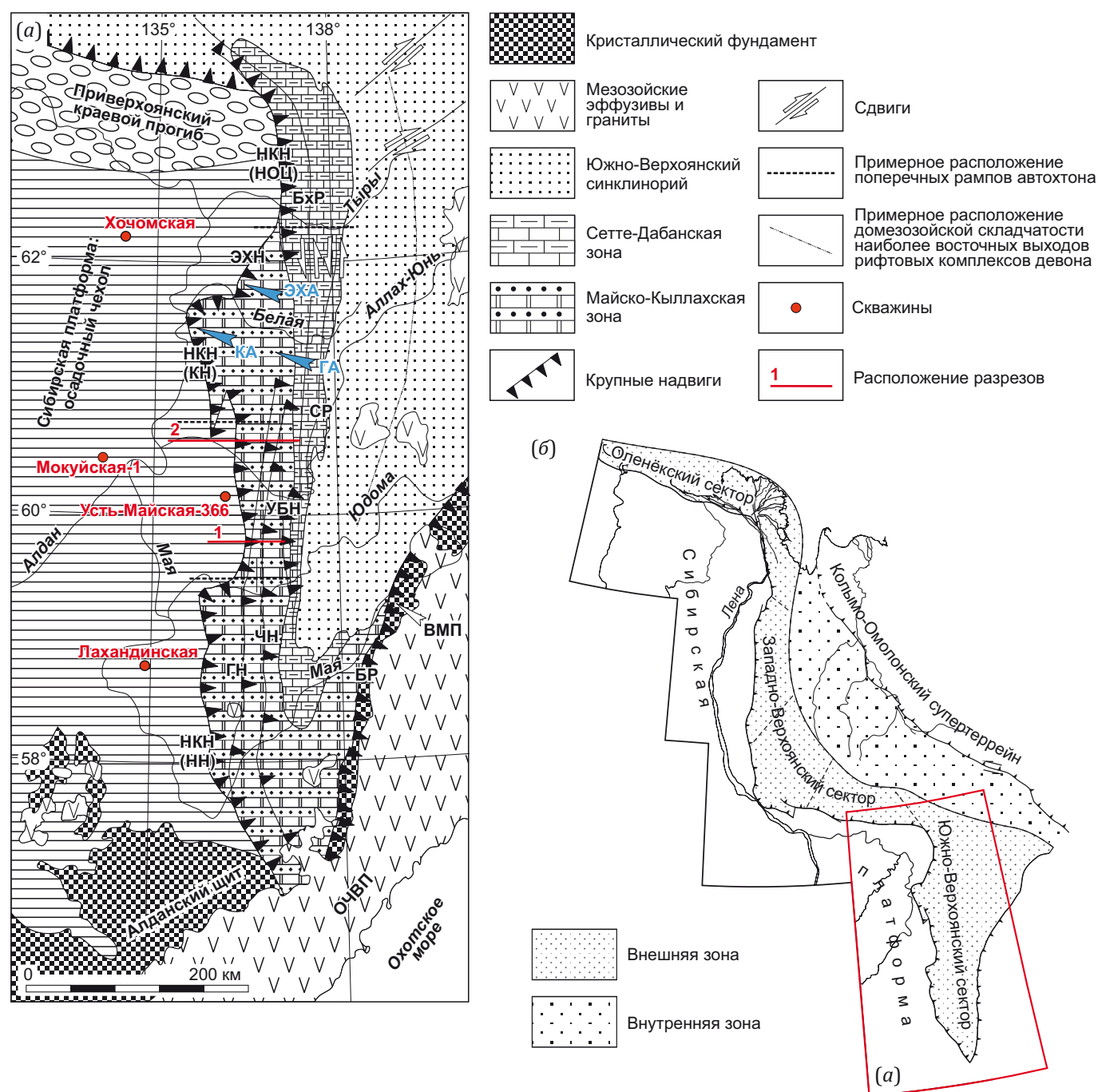


Рис. 1. Схема тектонического районирования Верхоянского складчато-надвигового пояса (а) и тектоническая схема Южно-Верхоянского сектора (б).

Надвиги: НКН – Нелькано-Кыллахский (НОЦ – Окраинной Цепи, ЭХН – Эбейке-Хаятинский, КН – Кыллахский, НН – Нельканский), УБН – Улахан-Бамский, ЧН – Чагдинский, ГН – Гувиндинский, БР – Билякчанский; разломы со значительной сдвиговой компонентой перемещения: БхР – Бурхалинский, СР – Сетаньинский; ВМП – Верхнемайское поднятие, ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканогенный пояс. Антиклинали: КА – Кыллахская, ГА – Горностахская, ЭХА – Эбейке-Хаятинская [Khudoley, Guriev, 2003; Prokopiev, Deikunenko, 2001; Sobolev et al., 2017].

Fig. 1. Scheme of tectonic zoning of the Verkhoyansk fold-thrust belt (a) and tectonic scheme of the South Verkhoyansk sector (b). Thrusts: НКН – Nelkano-Kyllakh (НОЦ – Marginal Chain, ЭХН – Ebeike-Khayata, КН – Kyllakh, НН – Nelkan), УБН – Ulakhan-Bam, ЧН – Chagda, ГН – Guvinda, БР – Bilyakchan; faults with a significant shear displacement component: БхР – Burkhal, СР – Setanya; ВМП – Upper Maya uplift; ОЧВП – Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt. Anticlines: КА – Kyllakh, ГА – Gornostakh, ЭХА – Ebeike-Khayata [Khudoley, Guriev, 2003; Prokopiev, Deikunenko, 2001; Sobolev et al., 2017].

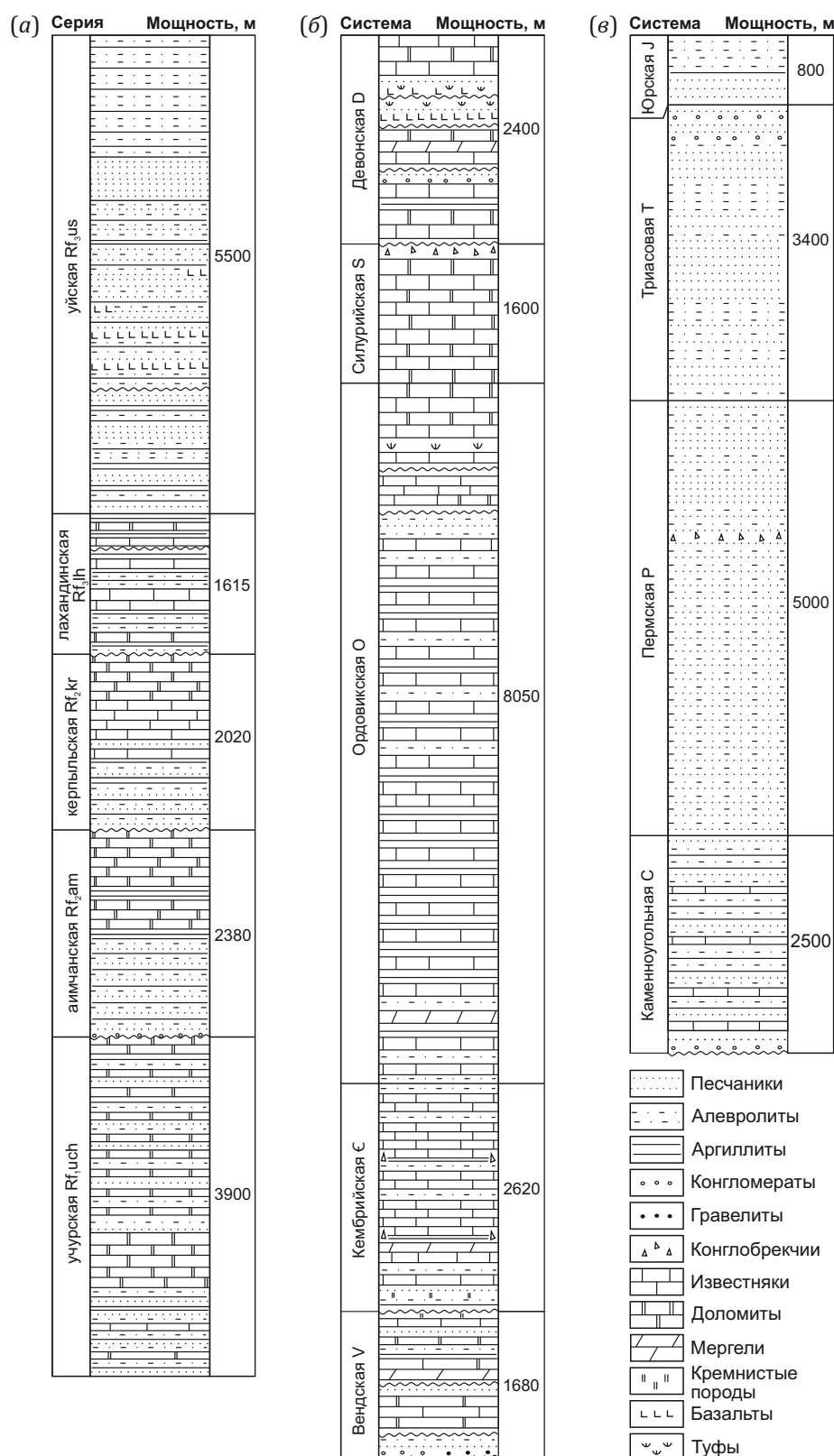


Рис. 2. Сводная стратиграфическая колонка для Южно-Верхоянского сектора.

(а) – рифей Майско-Кыллахской зоны, (б) – «карбонатный палеозой» Сетте-Дабанской зоны, (в) – «Верхоянский комплекс» Южно-Верхоянского синклинория [Khudoley et al., 2001; State Geological Map..., 1984, 1990, 1999, 2012; Nevolin et al., 1978; Prokopiev et al., 2001; Semikhatov, Serebryakov, 1983; Sobolev et al., 2017; Sukhorukov, 1986; Yan-Zhin-Shin, 1983].

Fig. 2. Generalized stratigraphic column for the South Verkhoyansk sector.

(а) – Riphean of the Maya-Kyllakh zone, (б) – "carbonate Paleozoic" of the Sette-Daban zone, (в) – "Verkhoyansk complex" of the South Verkhoyansk synclinorium [Khudoley et al., 2001; State Geological Map..., 1984, 1990, 1999, 2012; Nevolin et al., 1978; Prokopiev et al., 2001; Semikhatov, Serebryakov, 1983; Sobolev et al., 2017; Sukhorukov, 1986; Yan-Zhin-Shin, 1983].

мощность отложений зоны составляет около 15–16 км [State Geological Map..., 1999, 2012].

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Построение детальных разрезов и их последующая обработка стали возможными благодаря наличию сейсмических профилей, идущих со стороны платформы через фронтальные надвиги во внутренние части Майско-Кыллахской зоны. Как и в статьях [Razvozzhaeva, 2020; Razvozzhaeva, Taltykin, 2023], использовались данные производственных отчетов по профильным сейсморазведочным работам в регионе. Сейсмический разрез 070302 проходит в субширотном направлении к северу от р. Юдома (см. рис. 1, б) и продолжается в западном направлении в пределах Сибирской платформы практически до р. Алдан. Сейсмический разрез 140303 начинается от пос. Эльдикан на западе и проходит в субширотном направлении к северу от р. Аллах-Юнь, изгибаясь к северо-востоку в восточной части (см. рис. 1, б).

Сейсмические разрезы для последующей геологической интерпретации и балансировки были спроецированы на плоскость, соединяющую начальную и конечную точку разрезов. Длина спроецированного разреза 070302 (см. рис. 1, разрез 1) составляет 80 км, из которых 40 км проходят в пределах Сибирской платформы, а 40 км – в пределах складчато-надвиговой системы. Длина спроецированного разреза 140303 (см. рис. 1, разрез 2) составляет 122 км, из них 46 км в пределах Сибирской платформы и 76 км в пределах складчато-надвиговой системы. Сейсмический разрез 070302 оканчивается на востоке на границе Майско-Кыллахской и Сетте-Дабанской зон. Сейсмический разрез 140303 продолжается на восток в Сетте-Дабанскую зону, где имеет хаотическую картину сейсмической записи, интерпретация которой затруднительна, что является одной из причин, по которой разрез был сбалансирован только в пределах Майско-Кыллахской зоны.

Для построения разрезов применялся метод сохранения равной длины линий (линейная балансировка) [Dahlstrom, 1969; Gaiduk, Prokopiev, 1999], реализованный в программе Move (Midland Valley). Основное допущение связано с предположением о сохранении длины слоев в процессе деформации, что предполагает преобладание простых по форме складок с сохранением мощности слоев. Изменение объема пород за счет внутрислоевых деформаций, которые должны учитываться методами стрейн-анализа, может влиять на балансировку разрезов [Ramsay, Huber, 1987], что является второй причиной, по которой сбалансированные разрезы не затрагивали Сетте-Дабанскую зону. Здесь породы подвергались метаморфизму до зеленосланцевой фации [Prokopiev, Deikunenko, 2001], что вместе со сложной формой складок указывает на наличие внутрислоевых деформаций.

Развертка структуры производится относительно вертикальной линии – линии сколки или пин-линии (pin-line), размещенной в недеформированной части разреза перед фронтом надвиговой системы.

Для сбалансированного разреза можно рассчитать сокращение поверхности, произошедшее в результате образования складчато-надвиговой системы, по формуле:

$$A = \frac{L - L_0}{L} \cdot 100\%,$$

где A – сокращение поверхности в процентах, L – длина линий между двумя точками в недеформированном состоянии (на реставрированном разрезе), L_0 – расстояние между этими точками на сбалансированном разрезе [Ramsay, Huber, 1987].

Для расчета положения точек затухания надвигов и реконструкции над поверхностью рельефа размытых слоев висячих крыльев использовался метод, основанный на линейной зависимости величины перемещения стратиграфических горизонтов по надвигу от расстояния точек отсечки этих горизонтов до произвольно выбранной точки отсчета на линии надвига в

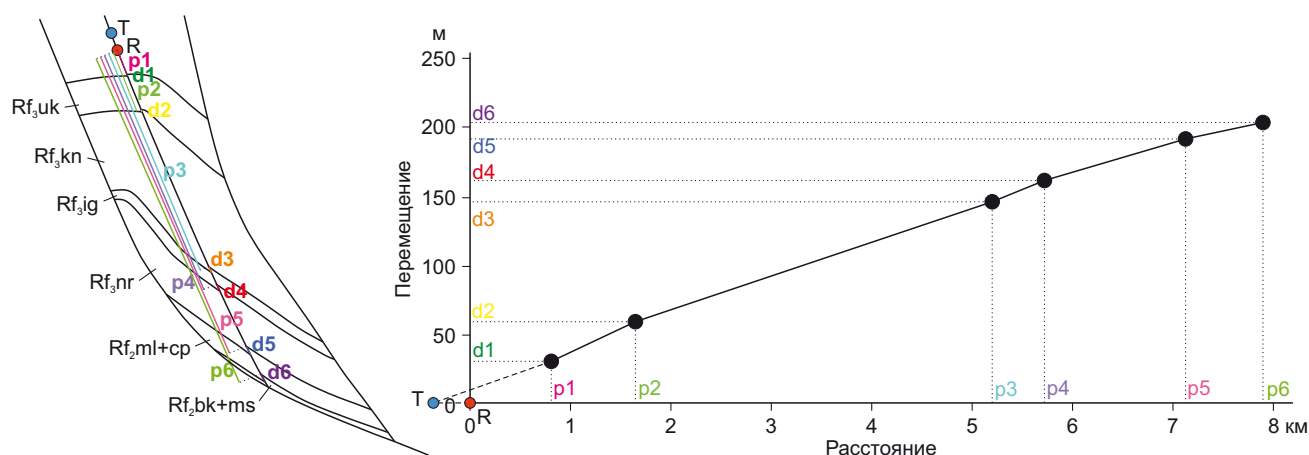


Рис. 3. Расчет точки затухания надвига (Т) в пределах Кюнкуюйской надвиговой пластины на разрезе 070302.

По оси Х откладывается расстояние от выбранной точки R на линии надвига до точек пересечения различных стратиграфических горизонтов с этим надвигом, по оси Y – величина перемещения горизонтов по надвигу. Точка Т находится на пересечении

построенной линии с осью X, расстояние от точек пересечения горизонтов с надвигом до точки затухания соответствует разности их координат по оси X. Верхний рифей: Rf_3uk – устькирбинской свиты уйской серии, Rf_3kn – кандыкской свиты уйской серии, Rf_3ig – игниканской свиты лахандинской серии, Rf_3nr – нерюенской свиты лахандинской серии, среднего рифея: Rf_2ml+cp – малгинской и ципандинской свит керпыльской серии, Rf_2bk+ms – бикской и мускельской свит керпыльской серии.

Fig. 3. The displacement/distance method of calculation of the calculating thrust attenuation point (T) within the Kyunkuy thrust sheet in section 070302.

The X-axis plots the distance from the selected point R on the thrust line to the points of intersection of various stratigraphic horizons with this thrust, the Y-axis plots the amount of displacement of the horizons along the thrust. Point T is located at the intersection of the constructed line with the X axis, the distance from the points of intersection of horizons with the thrust to the attenuation point corresponds to the difference in their coordinates along the X axis. Upper Riphean: Rf_3uk – Ust-Kirba formation of the Ui group, Rf_3kn – Kandyk formation of the Ui group, Rf_3ig – Ignikan formation of the Lakhanda group, Rf_3nr – Neryuen formation of the Lakhanda group; Middle Riphean: Rf_2ml+cp – Malga and Tsypana formations of the Kerpyl group, Rf_2bk+ms – Bik and Muskel formations of the Kerpyl group.

геологическом разрезе [Williams, Chapman, 1983; Gaiduk, Prokopiev, 1999]. На рис. 3 приведен пример расчета точки затухания для надвига в пределах Кюнкюйской надвиговой пластины на разрезе 070302.

При построении разрезов использовались стратиграфические данные и элементы залегания слоистости, взятые с геологических карт [State Geological Map..., 1977, 1990, 1999, 2012], а также данные скважин Усть-Майская-366 [Sobolev et al., 2017] и Мокуйская-1 [Prokopiev et al., 2001]. По доступным сейсмическим разрезам горизонты прослежены от скважины Усть-Майская-366 до пересечения с разрезами 070302 и 140303, что позволяет надежно определить мощности горизонтов перед фронтом складчато-надвиговой системы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате были построены два сбалансированных и реставрированных разреза: Юдомский, проходящий к северу от р. Юдома примерно по широте $59^{\circ}45'$, и Аллах-Юньский, расположенный к северу от р. Аллах-Юнь на широте $60^{\circ}40' - 61^{\circ}00'$.

4.1. Юдомский разрез

Основными надвигами, проходящими в основании одноименных надвиговых пластин, являются, с запада на восток, Нельканский, Гувиндинский, Кюнкюйский, Акринский (Чагдинский) и Улахан-Бамский (рис. 4). К югу от линии Юдомского разреза наблюдается изгиб поверхностей надвигов к западу, наиболее выражен изгиб Нельканского надвига на широте р. Юдома (см. рис. 1), также проявлены изгибы поверхностей Гувиндинского и Кюнкюйского надвигов к югу от р. Хамна. Углы падения поверхностей сместителей основных надвигов у дневной поверхности составляют: $\sim 50^{\circ}$ у Нельканского, $\sim 60^{\circ}$ у Гувиндинского, $\sim 50^{\circ}$ у Кюнкюйского и $\sim 75^{\circ}$ у Акринского надвига. Крупные надвиги (Гувиндинский, Кюнкюйский и Акринский) выполаживаются с глубиной и присоединяются к единому надвигу подошвы, который является продолжением Нельканского надвига. Надвиги не затрагивают фундамент Сибирской платформы и не смещают поверхность Нельканского надвига, который, как следует из интерпретации сейсмических данных, является надви-

гом подошвы складчато-надвиговой системы. Надвиг подошвы погружается до глубины 5.5 км в Нельканской надвиговой пластине, до 6 км в Гувиндинской и до 8 км в Акринской. Как результат, складчато-надвиговая структура, ограниченная с запада фронтальным Нельканским надвигом, представляет собой клин, мощность которого увеличивается к востоку.

Наиболее древними породами Юдомского разреза, выходящими на поверхность, являются массивные карбонаты ципандинской и малгинской свит (верхняя часть керпыльской серии), которые обнажаются в виде крыла фронтального Нельканского надвига. Базальный надвиг, отделяющий деформированные породы от ненарушенного чехла и фундамента Сибирской платформы, скорее всего, находится под этими массивными карбонатами в пластичных аргиллитах и алевролитах бикской и мускельской свит (рис. 5). Отложения, предположительно, нижнего и/или среднего рифея (учурской и аимчанской серий) ненарушенного чехла Сибирской платформы залегают ниже поверхности Нельканского надвига (см. рис. 4). Судя по мощности остальных надвиговых пластин, в их основании также находятся породы бикской и мускельской свит. Отдельные надвиги проходят на более высоком стратиграфическом уровне, со срывами песчаных пачек кандыкской свиты уйской серии по алевролит-аргиллитовым пластичным горизонтам (рис. 5). Силлы долеритов, присутствующие в отложениях кандыкской свиты, придают песчаным пачкам дополнительную прочность. В нижней части Акринской пластины по сейсмическим данным определяется наличие дуплекса.

Для Юдомского разреза выделяются два основных уровня срыва – в алевролит-аргиллитовых толщах бикской и мускельской свит (нижний уровень) и внутри кандыкской свиты (верхний уровень). Чередование пачек прочных и пластичных пород, играющих роль смазки при формировании послойных срывов («механическая стратиграфия» [Van der Pluijm, Marshak, 2004]), типично для рифейского разреза Майско-Кылахской зоны и создает благоприятные условия для широкого развития пологих послойных надвигов.

Мощность рифейских толщ, вовлеченных в складчато-надвиговую структуру вдоль Юдомского разреза, достигает 4 км, убывая в западном направлении.

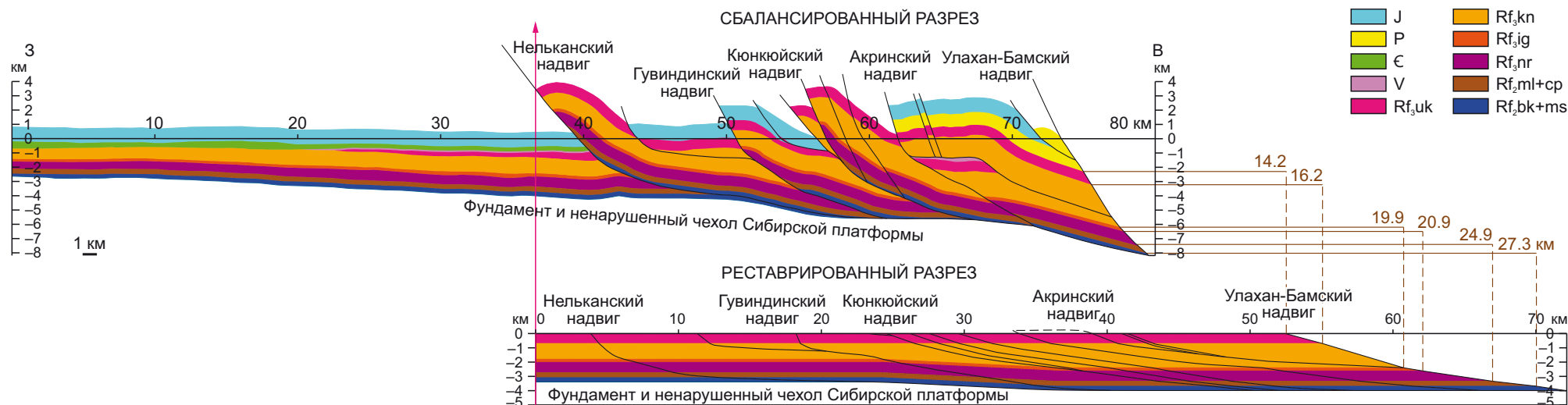


Рис. 4. Юдомский сбалансированный и реставрированный разрезы (см. рис. 1, разрез 1), построенные по сейсмическому разрезу 070302.

Отложения: J – юрские, P – пермские, € – кембрийские, V – вендские, верхнего рифея: Rf₃uk – устькирбинской свиты уйской серии, Rf₃kn – кандыкской свиты уйской серии, Rf₃ig – игниканской свиты лахандинской серии, Rf₃nr – нерюенской свиты лахандинской серии, среднего рифея: Rf₂ml+cp – малгинской и ципандинской свит керпыльской серии, Rf₂bk+ms – бикской и мускельской свит керпыльской серии.

Fig. 4. Yudoma balanced and restored sections (see Fig. 1, cross-section 1) obtained from the seismic section 070302.

Deposits: J – Jurassic, P – Permian, € – Cambrian, V – Vendian, Upper Riphean: Rf₃uk – Ust-Kirba formation of the Ui group, Rf₃kn – Kandyk formation of the Ui group, Rf₃ig – Ignikan formation of the Lakhanda group, Rf₃nr – Neryuen formation of the Lakhanda group, Rf₂ml+cp – Malga and Tsipanda formations of the Kerpyl group, Rf₂bk+ms – Bik and Muskel formations of the Kerpyl group.

Отложения венда и кембрия размыты, но присутствуют к северу и югу от Юдомского разреза. Отложения венда, мощностью до 300 м, реконструируются в ду-
плексе в нижней части Акринской пластины, но к запа-
ду от Нельканского надвига постепенно выклинива-
ются. Кембрийские отложения в пределах платформы
имеют мощность ~300 м. В восточной части разреза в
Акринской надвиговой пластине также развиты перм-
ские отложения мощностью до 900 м, залегающие на
отложениях верхнего рифея. Юрские отложения рас-

пространены как на платформе, так и в пределах склад-
чато-надвиговой системы, имеют мощность до 1000 м,
но преимущественно размыты и реконструированы
выше дневной поверхности.
Вверх по разрезу надвиги затухают, поэтому вели-
чина перемещения по ним, измеренная для разных
горизонтов, различается. Величина горизонтальной
составляющей перемещения по надвигам, измерен-
ная по кровле уйской серии, составляет ~3.8 км для
Нельканского надвига, ~0.7 км для Гувиндинского,

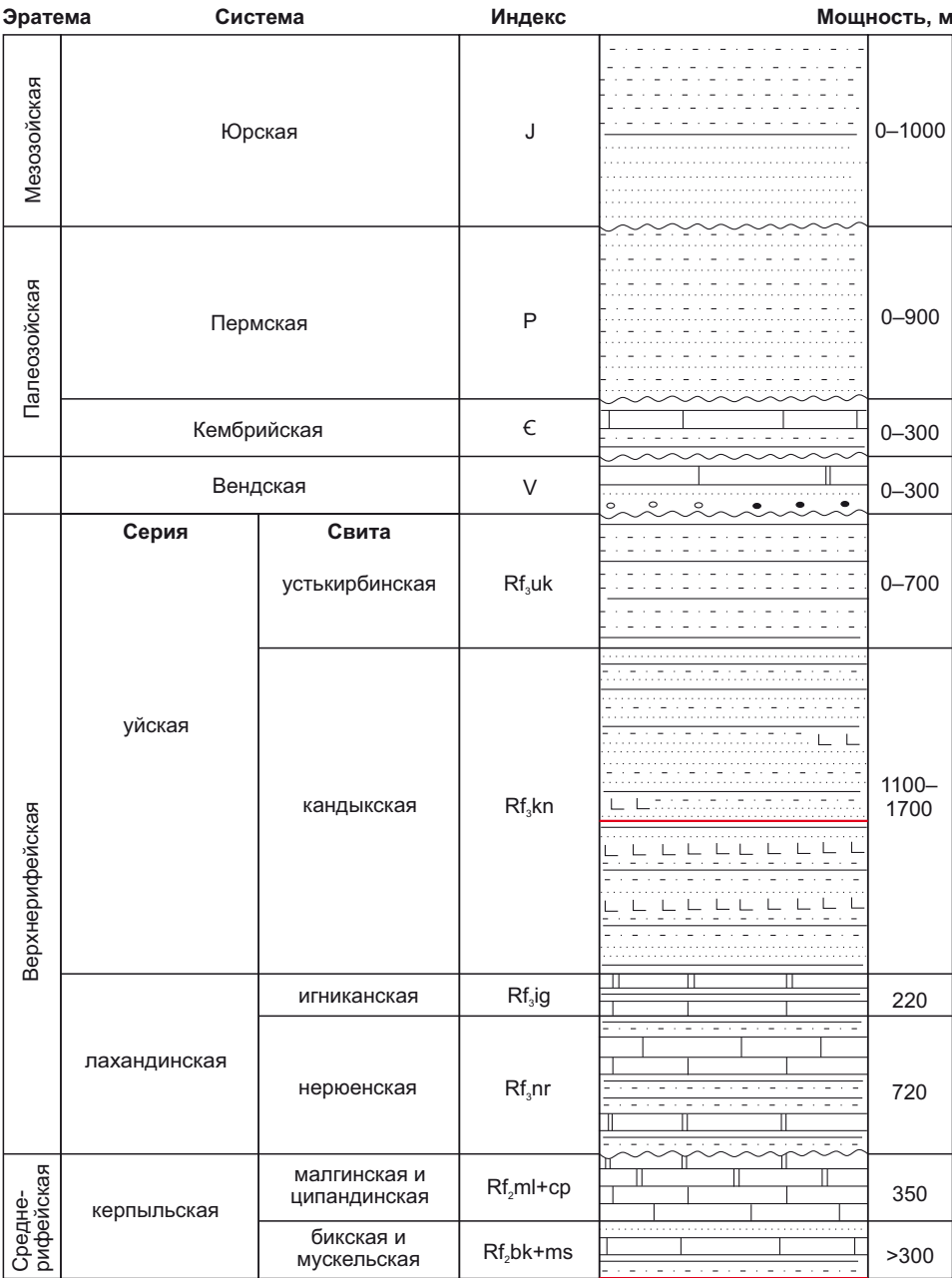


Рис. 5. Стратиграфическая колонка для Юдомского разреза.
Красным цветом обозначены уровни срыва. Условные обозначения см. на рис. 2 [Nevolin et al., 1978; Semikhatov, Serebryakov, 1983; State Geological Map..., 1990; Sukhorukov, 1986; Yan-Zhin-Shin, 1983].
Fig. 5. Stratigraphic column for the Yudoma cross-section.
Detachments are marked in red. See Fig. 2 for the legend [Nevolin et al., 1978; Semikhatov, Serebryakov, 1983; State Geological Map..., 1990; Sukhorukov, 1986; Yan-Zhin-Shin, 1983].

~2.7 км для Кюнкюйского и не более 0.1 км для Акринского. Суммарная величина горизонтального сокращения поверхности, рассчитанная по кровле отложений уйской серии, составляет ~14.2 км, из которых на долю крупных надвигов приходится ~7.3 км, а на долю мелких надвигов и складок – ~6.9 км. Вниз по разрезу горизонтальное сокращение поверхности для различных горизонтов последовательно увеличивается (см. рис. 4). Для кровли мускельской свиты, находящейся в основании базального надвига, величина горизонтальной составляющей перемещения по надвигам составляет ~9.2 км для Нельканского надвига, ~5.6 км для Гувиндинского, ~8.4 км для Кюнкюйского и ~0.2 км для Акринского. Суммарная величина горизонтального сокращения поверхности, рассчитанная по кровле отложений мускельской свиты, составляет ~27.3 км, из которых на долю крупных надвигов приходится ~23.4 км, а на долю мелких надвигов и складок – ~3.9 км.

Горизонтальное сокращение поверхности в процентном отношении составило ~27 % для устькирбинской свиты уйской серии, ~29 % для кандыкской свиты уйской серии, ~33 % для игниканской свиты лахандинской серии, ~34 % для нерюенской свиты лахандинской серии, ~37 % для малгинской и ципандинской свит керпыльской серии и ~39 % для бикской и мускельской свит керпыльской серии. Среднее значение сокращения поверхности для Юдомского разреза составило ~33 %.

4.2. Аллах-Юньский разрез

Как и в Юдомском разрезе, с запада на восток здесь выделяются Нельканский, Гувиндинский и Чагдинский надвиги, залегающие в основании одноименных пластин. Западнее Нельканского надвига отмечается ряд менее протяженных разломов, наиболее удаленным из которых является южное окончание Кыллахского надвига. Надвигом подошвы здесь также является Нельканский надвиг. Углы падения поверхностей сместителей основных надвигов у поверхности составляют: ~60° у Нельканского, ~55° у Гувиндинского и ~50° у Чагдинского надвига. Надвиги выполаживаются с глубиной, присоединяются к единому надвигу подошвы и не затрагивают фундамент Сибирской платформы. Надвиг подошвы погружается на восток, по сейсмическим данным прослеживается до ~7 км на уровне Нельканского надвига, ~9 км на уровне Гувиндинского надвига, ~11 км на уровне Чагдинского надвига и ~14 км на уровне Улахан-Бамского надвига, формируя клиновидную структуру.

Наиболее древними породами, выходящими на поверхность в пределах Аллах-Юньского разреза (рис. 6), являются карбонаты малгинской свиты керпыльской серии среднего рифея, обнаженные в висячем крыле Нельканского надвига, как и на Юдомском разрезе, однако базальный надвиг проходит здесь на другом уровне. От скважины Мокуйская-1 до фронта складчато-надвиговой системы прослежена кровля учурской

серии нижнего рифея, при этом по сейсмическим данным базальный надвиг прослеживается на большую глубину – более 6.5 км во фронте складчато-надвиговой системы.

Судя по мощности надвиговых пластин стратиграфических подразделений рифея, в их основании повсеместно находятся алевролиты учурской серии. Отдельные надвиги проходят на более высоком стратиграфическом уровне, со срывами по алевроит-аргиллитовым пластичным горизонтам в кандыкской и устькирбинской свитах уйской серии, нерюенской свите лахандинской серии и бикской и мускельской свитах керпыльской серии (рис. 7). В целом, здесь отмечается такая же «механическая стратиграфия», как и в Юдомском разрезе. В нижней части Чагдинской пластины по сейсмическим данным определяется наличие дуплекса (см. рис. 6). Чагдинский надвиг к югу переходит в Акринский на Юдомском разрезе, где дуплекс прослеживается в той же надвиговой пластине (см. рис. 4).

Стратиграфическая колонка для разреза с уровнями срывов («механической стратиграфией») приведена на рис. 7. В восточном направлении от Нельканского надвига мощность всех стратиграфических подразделений возрастает. Для рифейских толщ с запада на восток мощность увеличивается примерно от 5200 до 6500 м, главным образом за счет уйской серии. В пределах Сибирской платформы отложения аимчанской и уйской серий выклиниваются в западном направлении. Мощность вендских отложений также увеличивается с запада на восток с 250 до 500 м. Мощность кембрийских отложений растет от ~800 м на западе разреза в пределах Сибирской платформы до 2000 м на востоке разреза. В западной части разреза также развиты юрские образования мощностью до ~200 м.

Вверх по разрезу надвиги затухают, поэтому величина перемещения по ним последовательно уменьшается от более древних к более молодым горизонтам. Величина горизонтальной составляющей перемещения по надвигам, измеренная по кровле уйской серии, составляет ~2.6 км для Нельканского надвига, ~0.2 км для Гувиндинского и ~1.1 км для Чагдинского.

Суммарная величина горизонтального сокращения поверхности, рассчитанная по кровле отложений уйской серии, составляет ~15.3 км. Для кровли учурской серии, находящейся в основании базального надвига, величина горизонтальной составляющей перемещения по надвигам составляет ~11.2 км для Нельканского надвига, ~19.9 км для Гувиндинского и ~0.3 км для дуплекса в основании Чагдинского надвига. Суммарная величина горизонтального сокращения поверхности, рассчитанная по кровле учурской серии, составляет ~36.2 км (см. рис. 6).

Горизонтальное сокращение поверхности в процентном отношении составило для венда ~19 %; верхнего рифея: ~19 % для устькирбинской свиты и ~25.5 % для кандыкской свиты уйской серии, ~26 % для игниканской и нерюенской свит лахандинской серии;

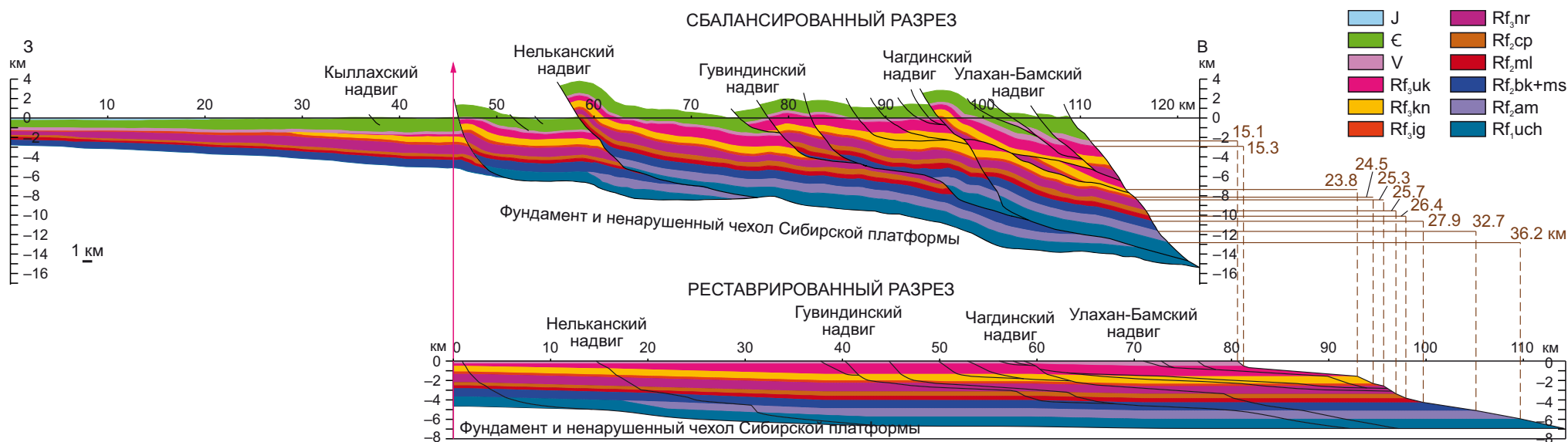


Рис. 6. Аллах-Юньский сбалансированный и реставрированный разрезы (см. рис. 1, разрез 2), построенные по сейсмическому разрезу 140303.

Отложения: J – юрские, € – кембрийские, V – вендские, верхнего рифея: Rf₃uk – устькирбинской свиты уйской серии, Rf₃kn – кандыкской свиты уйской серии, Rf₃ig – игниканской свиты лахандинской серии, Rf₃nr – нерюенской свиты лахандинской серии, среднего рифея: Rf₂cp – ципандинской свиты керпыльской серии, Rf₂ml – малгинской свиты керпыльской серии, Rf₂bk+ms – бикской и мускельской свит керпыльской серии, Rf₂am – аимчанской серии; Rf₁uch – учурской серии нижнего рифея.

Fig. 6. Allakh-Yun balanced and restored cross-sections (see Fig. 1, cross-section 2) obtained from the seismic section 140303.

Deposits: J – Jurassic, € – Cambrian, V – Vendian, Upper Riphean: Rf₃uk – Ust-Kirba formation of the Ui group, Rf₃kn – Kandyk formation of the Ui group, Rf₃ig – Ignikan formation of the Lakhanda group, Rf₃nr – Neryuen formation of the Lakhanda group, Rf₂cp – Tsipanda formation of the Kerpyl group, Rf₂ml – Malga formation of the Kerpyl group, Rf₂bk+ms – Bik and Muskel formations of the Kerpyl group, Rf₂am – Aimchan group, Rf₁uch – Uchur group.

Эратема	Система		Индекс	Мощность, м
MZ	Юрская		J	200
Палеозойская	Кембрийская		Є	800–1230
	Вендская		V	250–500
Верхнерифейская	Серия	Свита		
		устькирбинская	Rf ₃ uk	250–1065
	уйская	кандыкская	Rf ₃ kn	580–750
		игниканская	Rf ₃ ig	250
		нерюенская	Rf ₃ nr	800–890
Среднерифейская	керпыльская	ципандинская	Rf ₂ cp	330–450
		малгинская	Rf ₂ ml	300–440
		бикская и мускельская	Rf ₂ bk+ms	840
	аимчанская	талынская и светлинская	Rf ₂ am	0–850
Нижне-рифейская	учурская	пионерская, трехгорная и димская	Rf ₁ uch	1000

Рис. 7. Стратиграфическая колонка для Аллаха-Юньского разреза. Красным обозначены уровни срыва. Условные обозначения см. на рис. 2 [State Geological Map..., 1977, 2020; Semikhatov, Serebryakov, 1983; Yan-Zhin-Shin, 1983].

Fig. 7. Stratigraphic column for the Allakh-Yun cross-section. Detachments are marked in red. See Fig. 2 for the legend [State Geological Map..., 1977, 2020; Semikhatov, Serebryakov, 1983; Yan-Zhin-Shin, 1983].

среднего рифея: ~27 % для малгинской и ципандинской свит и ~28 % для бикской и мускельской свит керпильской серии, ~33 % для аимчанской серии; нижнего рифея: ~33 % для учурской серии.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Юдомский и Аллах-Юньский разрезы имеют сходную структуру и геометрические характеристики разломов и складок. Наиболее древними породами, выходящими на поверхность на обоих разрезах, являются карбонаты ципандинской и малгинской свит. Оба разреза сложены преимущественно рифейскими толщами с характерной для них механической стратиграфией. Для обоих разрезов складчато-надвиговая структура имеет форму клина, расширяющегося в восточном направлении за счет погружения надвига подошвы под близким для обоих разрезов углом около 8° (см. рис. 4, 6).

В то же время при очевидном сходстве складчато-надвиговая структура Юдомского и Аллах-Юньского разрезов имеет и ряд различий. Наиболее существенным является различие в толщине надвигового клина, обусловленное тем, что в основании базального надвига на Юдомском разрезе находятся отложения бикской и мускельской свит керпильской серии среднего рифея, а на Аллах-Юньском – отложения учурской серии нижнего рифея. Мощность надвиговых пластин на Аллах-Юньском разрезе также больше, чем на Юдомском разрезе за счет появления в их нижней части отложений нижнего рифея. В пределах Аллах-Юньского разреза выделяется больше поверхностей срыва, чем на Юдомском разрезе (см. рис. 5; рис. 7). Столь значительные различия в строении разрезов внешних зон не характерны для складчато-надвиговых поясов и связаны, скорее всего, с наличием поперечных уступов (рампов). Наличие таких уступов для этого региона уже предполагалось ранее (см. рис. 1) [Khudoley, Guriev, 2003; Prokopiev, 1989], но при этом Юдомский и Аллах-Юньский разрезы оказываются расположенными в пределах одного сегмента. Проведенное авторами исследование указывает на наличие еще одного рампа между Юдомским и Аллах-Юньским разрезами или на неточное определение положения рампов в предыдущих публикациях.

Построенные авторами разрезы имеют сходную структуру с разрезами через Майско-Кыллахскую зону А.К. Худолея и Г.А. Гурьева [Khudoley, Guriev, 2003], но ими предполагалось, что увеличение с запада на восток мощности отложений верхнего рифея при переходе через надвиги происходит скачкообразно, указывая на то, что, по крайней мере, часть разломов сформировалась еще в рифее в виде синхронных осадконакопления сбросов, реактивированных в меловое время как надвиги. Построенные Юдомский и Аллах-Юньский разрезы показывают возможность того, что мощности верхнерифейских отложений увеличиваются постепенно в пределах надвиговых пластин, и в таком случае разломы могут быть образованы как в рифее,

так и во время мезозойского тектогенеза. Не исключая возможности наличия рифейских сбросов, можно отметить, что по сейсмическим данным разломов со смещениями в фундаменте не наблюдается. Также следует отметить, что, в Майско-Кыллахской зоне не отмечается столь значительных перемещений, как предполагаемое [Prokopiev, Deikunenko, 2001] перемещение около 90 км аллохтонной пластины на разрезе через Горностахскую антиклиналь.

Среднее значение сокращения поверхности составляет ~33 % для Юдомского разреза и ~26 % для Аллах-Юньского, что близко к оценкам, сделанным для этого региона ранее [Khudoley, Guriev, 2003] и заметно больше величины сокращения поверхности (~16–19 %) по данным [Razvozzhaeva, Taltykin, 2023]. В то же время в предыдущих исследованиях не отмечалось различие в величинах сокращения, рассчитанных в пределах единой складчато-надвиговой структуры по разным стратиграфическим уровням [Khudoley, Guriev, 2003; Parfenov et al., 1995; Razvozzhaeva, Taltykin, 2023].

Относительно высокое среднее значение сокращения поверхности для Юдомского разреза (~33 %) определяется тем, что в области его расположения структура Майско-Кыллахской зоны наиболее сжата и основные надвиги расположены ближе друг к другу, чем севернее и южнее от разреза. Синклинали на Аллах-Юньском разрезе в среднем шире, чем на Юдомском. Чагдинский надвиг на Аллах-Юньском разрезе к югу переходит в Акринский надвиг на Юдомском разрезе, и на обоих разрезах в нижней части надвиговой пластины после данного надвига присутствует дуплекс.

Строение внешней зоны Верхоянского СНП к северу от Южно-Верхоянского сектора, в пределах Западно-Верхоянского сектора (см. рис. 1, а), характеризуется близкими величинами сокращения поверхности (от 15 до 32 %), но отличается разделением складчато-надвиговой структуры поверхностью регионального срыва на два различных по степени деформированности комплекса [Parfenov et al., 1995; Prokopiev, Deikunenko, 2001]. Верхний комплекс представлен палеозойскими и мезозойскими породами, и в них преобладают чешуйчатые надвиги. Нижний комплекс представлен породами рифея и, вероятно, нижнего палеозоя, в которых предполагается широкое развитие дуплексов, чего не наблюдается в рассматриваемых нами разрезах. Нижний комплекс отделен от подстилающих пород фундамента поверхностью регионального срыва – детачмента. Глубина до поверхности детачмента во фронтальной зоне Западно-Верхоянского сектора варьируется от ~2 до 15–18 км, что близко к наблюдаемым в Аллах-Юньском и Юдомском разрезах. Кроме того, в пределах Западно-Верхоянского сектора породы Верхоянского СНП повсеместно надвинуты на породы Приверхоянского краевого прогиба, отсутствующего к западу от Майско-Кыллахской зоны.

В табл. 1 приводится сравнение основных характеристик внешних зон Южного и Западного Верхоянья с другими складчато-надвиговыми поясами сходного

строения, образованными на месте пассивных окраин континентов: Уралом, Аппалачами и Кордильерами Северной Америки.

Для Урала, как и для Верхоянья, характерно увеличение полноты разрезов к востоку и сокращение поверхности около 30 %. Основными отличиями уралид являются сочетание тонкочешуйчатой и толстошешуйчатой тектоники в структурах форланда, распространение как слепых, так и обнаженных чешуйчатых веерообразных срывов в верхнерифейских, верхневендских или в нижнепалеозойских отложениях и большие глубины до детачмента (от 3.5 до 28 км и более) [Brown et al., 2006; Puchkov, 2010].

К сходствам Верхоянья и Аппалачей относится тонкошешуйчатая тектоника, близкие значения глубины до детачмента (до 15 км), а также наличие параллельных простиранию региональной структуры разломов со значительными сдвиговыми перемещениями: левосторонними в Сетте-Дабанской зоне и как лево-, так и

правосторонними в Аппалачах. Характерными отличиями Аппалачей являются большее развитие дуплексов, распространение как слепых, так и обнаженных чешуйчатых веерообразных с детачментом в кембрийских породах и наличием региональных срывов в вышележащих палеозойских породах, значительно большее сокращение поверхности (до 70 %) [Lammie et al., 2020; Van der Pluijm, Marshak, 2004]. Для Аппалачей характерно укорочение параллельной слоистости (layer parallel shortening), связанное с внутрислоевыми деформациями, которое в различных частях складчато-надвигового пояса составляет до 35 % [Reks, Gray, 1983; Whitaker, Bartholomew, 1999; Lammie et al., 2020].

Кордильеры Северной Америки и Верхоянье имеют сходную тектоническую эволюцию и строение. Их форланды представляют собой преимущественно обнаженные передовые чешуйчатые веера с тонкошешуйчатым структурным стилем, в обеих складчато-надвиговых системах распространены крупные параллельные

Таблица 1. Сравнение основных характеристик форланда складчато-надвиговых систем
Table 1. Comparison of the main characteristics of the foreland of fold-and-thrust belts

Характеристики	Южное Верхоянье	Западное Верхоянье	Урал	Аппалачи	Кордильеры Северной Америки
На месте чего образованы	Восточная пассивная окраина палеоконтинента	Сибирского	Восточная пассивная окраина Восточно-Европейского континента	Восточная пассивная окраина Лаврентии	Западная пассивная окраина Лаврентии
Возраст деформаций	Мезозоида: поздняя юра – эоцен. Раннемеловой и позднемеловой этапы деформаций		Уралиды: поздний девон – пермь. Локально деформации имеют триасовый возраст	Герциниды. Аллеганская фаза складчатости (средний карбон – пермь)	Мезозоида. Основной этап деформаций форланда – ларамийская фаза (поздний мел – палеоцен)
Отложения, вовлеченные в структуры форланда	RF ₁ -J	RF ₃ -T	RF ₁ -P	Є-C	RF ₁ -K
Вовлеченность фундамента в складчато-надвиговые структуры	Отсутствует («тонкошешуйчатая» тектоника)		Незначительная («тонкошешуйчатая» тектоника доминирует)	Отсутствует («тонкошешуйчатая» тектоника)	Незначительная («тонкошешуйчатая» тектоника доминирует)
Уровни срыва	В основании или внутри рифейских отложений, срыв внутри верхнерифейских толщ имеет подчиненное значение	Верхний срыв в основании верхнепалеозойских толщ, нижний – между верхнедевонскими отложениями и кристаллическим фундаментом	В верхнерифейских, верхневендских и в нижнепалеозойских отложениях. Восточнее форланда детачмент уходит в породы фундамента	Детачмент в породах среднего кембрия, надвиг кровли в ордовикских породах. Срывы в породах ордовика, силура и девона	В верхнеюрских–палеоценовых, нижне- и верхнепалеозойских, средне- и верхнепротерозойских породах
Глубина до детачмента	5–15 км	2–18 км	4–28 км	5–15 км	2–10 км
Характерные структуры	Обнаженный фронт надвигов, чешуйчатый веер	Обнаженный и погруженный фронты надвигов, слепой кровельный дуплекс, чешуйчатый веер	Обнаженный и погруженный фронты надвигов, чешуйчатый веер	Обнаженный и погруженный фронты надвигов, чешуйчатый веер, дуплексы	Обнаженный и погруженный фронты надвигов, чешуйчатый веер, дуплексы
Сокращение поверхности	26–33 %	Для нижней карбонатной части 15–21 %, для верхней терригенной части 30–32 %	От менее 20 до 30 %	От 18 до 70 %	30–60 %

простираю региональной структуры сдвиги: левосторонние в Сетте-Дабанской зоне и преимущественно правосторонние в Кордильерах. К отличиям относятся более многочисленные срывы на различных стратиграфических уровнях – от мезопротерозойских до верхнеюрских – палеоценовых и большие значения сокращения поверхности (до 60 %) в Кордильерах. Глубина до детачмента в форланде не превышает 10 км [Monger, Price, 2002; Price, 1981].

Несмотря на столь различные величины сокращения поверхности (от 30 до 70 %), все рассматриваемые выше регионы относятся к деформированным пассивным окраинам и развивались в сходных тектонических обстановках. В целом сходен и состав пород осадочных разрезов, везде доминируют карбонатные и терригенные породы. Скорее всего, различия в степени деформированности обусловлены различием в строении осадочных разрезов. Так, для внешних зон Верхоянского СНП характерно чередование массивных пачек карбонатов, песчаников и глинистых пород для разреза рифея и венда, тогда как для вышележащих толщ контраст физических свойств не столь значителен. В то же время как в Аппалачах, так и в Кордильерах чередование пачек относительно прочных и заметно более пластичных пород фиксируется по всему разрезу, что приводит к появлению большего числа поверхностей срыва и, как следствие, большим величинам сокращений поверхности [Lammie et al., 2020; Price, 1981].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования представлены следующими пунктами:

- через центральную часть Майско-Кыллахской зоны Южно-Верхоянского сектора построены два детальных сбалансированных разреза. При их построении учитывались данные глубинной сейсморазведки, стратиграфии, геологических карт и скважин, построение и последующая обработка разрезов производилась с использованием программного обеспечения Move;

- для обоих разрезов характерна «механическая стратиграфия», проявленная в формировании послонных срывов по пластичным горизонтам аргиллитов и алевролитов;

- на Юдомском разрезе детачмент проходит в отложениях керпильской серии среднего рифея и погружается до глубины ~8 км, а на Аллах-Юньском – по алевролитам учурской серии нижнего рифея и уходит на глубину ~15 км. Различие в глубине и стратиграфическом положении базального надвига, вероятно, указывает на наличие между разрезами поперечного уступа – рампа;

- средние значения сокращения поверхности составили ~33 % для Юдомского разреза и ~26 % для Аллах-Юньского разреза. При этом величина сокращения в пределах каждого из разрезов уменьшалась от нижних горизонтов к верхним, что связано с постепен-

ным уменьшением величины перемещений по надвигам и их затуханием;

- проведено сравнение построенных разрезов с разрезами Западно-Верхоянского сектора и разрезами чезрез форланды складчато-надвиговых систем Урала, Аппалачей и Кордильер Северной Америки, имеющих сходное строение и сформированных на месте пассивных окраин континентов. Показано, что различия в величинах сокращений обусловлены главным образом строением слагающих складчато-надвиговые пояса осадочных разрезов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Ф.А. Мигурскому (ВНИГНИ) за помощь в подборе сейсмических профилей и С.П. Нилу (СПбГУ) за консультации в работе с ПО Move. Рецензии А.В. Соловьева, Ф.А. Мигурского и К.О. Соборнова позволили существенно улучшить содержание статьи.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

Both 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.

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

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Brown D., Juhlin C., Tryggvason A., Friberg M., Rybalka A., Puchkov V., Petrov G., 2006. Structural Architecture of the Southern and Middle Urals Foreland from Reflection Seismic Profiles. *Tectonics* 25 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2005TC001834>.

Cawood A.J., Bond C.E., 2019. Broadhaven Revisited: A New Look at Models of Fault–Fold Interaction. In: C.E. Bond, H.D. Lebit (Eds), *Folding and Fracturing of Rocks: 50 Years of Research since the Seminal Text Book of J.G. Ramsay*. Geological Society, London, Special Publications 487, p. 105–126. <https://doi.org/10.1144/SP487.11>.

Dahlstrom C.D.A., 1969. Balanced Cross Sections. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6 (4), 743–757. <https://doi.org/10.1139/e69-069>.

Gaiduk V.V., Prokopiev A.V., 1999. *Methods for Studying Fold-Thrust Belts*. Nauka, Novosibirsk, 160 p. (in Russian) [Гайдук В.В., Прокопьев А.В. Методы изучения складчато-надвиговых поясов. Новосибирск: Наука, 1999. 160 с.].

Gusev G.S., 1979. *Folded Structures and Faults of the Verkhoyansk-Kolyma Masozoid System*. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [Гусев Г.С. Складчатые структуры и

разломы Верхояно-Колымской системы мезозой. М.: Наука, 1979. 208 с.].

Khudoley A.K., Guriev G.A., 2003. Influence of Syn-Sedimentary Faults on Orogenic Structure: Examples from the Neoproterozoic–Mesozoic East Siberian Passive Margin. *Tectonophysics* 365 (1–4), 23–43. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00016-7).

Khudoley A.K., Prokopiev A.V., 2007. Defining the Eastern Boundary of the North Asian Craton from Structural and Subsidence History Studies of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt. In: J.W. Sears, T.A. Harms, C.A. Evenchick (Eds), *Whence the Mountains? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems: A Volume in Honor of Raymond A. Price*. Geological Society of America Special Paper 433, p. 391–410. [https://doi.org/10.1130/2007.2433\(19\)](https://doi.org/10.1130/2007.2433(19)).

Khudoley A.K., Rainbird R.H., Stern R.A., Kropachev A.P., Heaman L.M., Zanin A.M., Podkovyrov V.N., Belova V.N., Sukhorukov V.I., 2001. Sedimentary Evolution of the Riphean–Vendian Basin of Southeastern Siberia. *Precambrian Research* 111 (1–4), 129–163. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00159-0).

Lammie D., McQuarrie N., Sak P.B., 2020. Quantifying Shortening across the Central Appalachian Fold-Thrust Belt, Virginia and West Virginia, USA: Reconciling Grain-, Outcrop-, and Map-Scale Shortening. *Geosphere* 16 (5), 1276–1292. <https://doi.org/10.1130/GES02016.1>.

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, 634–646. <https://doi.org/10.1134/S0016852118060055>.

Monger J., Price R.A., 2002. The Canadian Cordillera: Geology and Tectonic Evolution. *CSEG Recorder*, p. 17–36.

Morley C.K., 1986. A Classification of Thrust Fronts. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 70 (1), 12–25. <https://doi.org/10.1306/948878A2-1704-11D7-8645000102C1865D>.

Nevolin B.S., Potapov S.V., Stavtsev A.L., 1978. Upper Proterozoic (Riphean) and Lower Cambrian of the Southeastern Margin of the Siberian Platform, Yudoma-Maya Trough and Okhotsk Middle Massif. In: V.V. Khomentovsky (Ed.), *New in the Late Cambrian Stratigraphy and Paleontology of the Eastern and Northern Regions of Siberia*. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, p. 21–63 (in Russian) [Неволин Б.С., Потапов С.В., Ставцев А.Л. Верхний протерозой (рифей) и нижний кембрий юго-восточной окраины Сибирской платформы, Юдомо-Майского прогиба и Охотского срединного массива // Новое в стратиграфии и палеонтологии позднего докембрия восточных и северных районов Сибири / Ред. В.В. Хоментовский. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1978. С. 21–63].

Parfenov L.M., Prokopiev A.V., Gaiduk V.V., 1995. Cretaceous Frontal Thrusts of the Verkhoyansk Fold Belt, Eastern Siberia. *Tectonics* 14 (2), 342–358. <https://doi.org/10.1029/94TC03088>.

Price R.A., 1981. The Cordilleran Thrust and Fold Belt in the Southern Canadian Rocky Mountains. *Thrust and Nappe Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications 9, 427–448. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1981.009.01.39>.

Prokopiev A.V., 1989. Kinematics of Mesozoic Folding in the Western Part of the South Verkhoyansk Region. *Yakutian Scientific Center SB RAS, Yakutsk*, 128 p. (in Russian) [Прокопьев А.В. Кинематика мезозойской складчатости западной части Южного Верхоянья. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 128 с.].

Prokopiev A.V., Deikunenko A.V., 2001. Deformational Structures of Fold-and-Thrust Belts. In: L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin (Eds), *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, p. 156–198 (in Russian) [Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 156–198].

Prokopiev A.V., Parfenov L.M., Tomshin M.D., Kolodeznikov I.I., 2001. Sedimentary Cover of the Siberian Platform and Adjacent Fold and Thrust Belts. In: L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin (Eds), *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, p. 113–155 (in Russian) [Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томшин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 113–155].

Prokopiev A.V., Toro H., Dumitru T.A., Miller E.L., Hourigan J.K., 2004. History of the Formation of Thrust Structures in the South Verkhoyansk Region (East Yakutiya) Obtained by the AFTA Method. In: *Evolution of the Tectonic Processes in the History of the Earth. Proceedings of the XXXVII Tectonic Meeting (February 10–13, 2004)*. GEO, Novosibirsk, p. 86–88 (in Russian) [Прокопьев А.В., Торо Х., Думитру Т.А., Миллер Э.Л., Хоуриган Д.К. История формирования надвиговых структур Южного Верхоянья (Восточная Якутия) на основе метода трекового датирования (AFTA) // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Материалы XXXVII Тектонического совещания (10–13 февраля 2004 г.). Новосибирск: Гео, 2004. С. 86–88].

Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L., 2009. Middle Paleozoic–Mesozoic Boundary of the North Asian Craton and the Okhotsk Terrane: New Geochemical and Geochronological Data and Their Geodynamic Interpretation. *Stephan Mueller Special Publication Series* 4, 71–84. <https://doi.org/10.5194/smsps-4-71-2009>.

Puchkov V.N., 2010. *Geology of the Urals and Cisurals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)*. DizaynPoligrafServis, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики

и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].

Ramsay J.G., Huber M.I., 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology*. Vol. 2: Folds and Fractures. Academic Press, London, p. 309–700.

Razvozzhaeva E.P., 2020. A Seismostratigraphic Model of the Aldan–Maya Sedimentary Basin of the Southeastern Siberian Platform. *Russian Journal of Pacific Geology* 14, 505–525. <https://doi.org/10.1134/S1819714020060068>.

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

Reks I.J., Gray D.R., 1983. Strain Patterns and Shortening in a Folded Thrust Sheet: An Example from the Southern Appalachians. *Tectonophysics* 93 (1–2), 99–128. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90235-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90235-4).

Semikhatov M.A., Serebryakov S.N., 1983. Siberian Hypostratotype of the Riphean. Nauka, Moscow, 221 p. (in Russian) [Семихатов М.А., Серебряков С.Н. Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 221 с.].

Sobolev P.N., Shiganova O.V., Dykhan S.V., Akhmedova A.R., 2017. New Data on the Petroleum Potential of the Aldan–Maya Depression. *Russian Geology and Geophysics* 58 (3–4), 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.03.002>.

State Geological Map of the Russian Federation, 1999. New Series. Scale 1:1000000. Sheet P-52, 53 (Yakutsk). Explanatory Note. VSEGEI, Saint-Petersburg, 186 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия новая. Масштаб 1:1000000. Лист P-52, 53 (Якутск): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 186 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2012. Far East Series. Scale 1:1000000. Sheet O-53 (Nelkan). Explanatory Note. VSEGEI, Saint-Petersburg, 364 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Серия Дальневосточная. Лист O-53 (Нелькан): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 364 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2020. Yudoma Series. Scale 1:2000000. Sheet P-53-XXX (Akra). Explanatory Note. Moscow Branch of the VSEGEI, Moscow, 164 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:2000000. Серия Юдомская. Лист P-53-XXX (Акра): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2020. 164 с.].

State Geological Map of the USSR, 1977. Maya Series. Scale 1 :200000. Sheet P-53-XXIX (Akra). Explanatory Note. Aerogeology, Moscow, 60 p. (in Russian) [Государственная

геологическая карта СССР. Серия Майская. Масштаб 1 :200000. Лист P-53-XXIX (Акра): Объяснительная записка. М.: Аэрогеология, 1977. 60 с.].

State Geological Map of the USSR, 1984. Maya Series. Scale 1:2000000. Sheet O-53-VI: Explanatory Note. Aero-geologiya, Moscow, 99 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 :2000000. Серия Майская. Лист O-53-VI: Объяснительная записка. М.: Аэрогеология, 1984. 99 с.].

State Geological Map of the USSR, 1990. Maya Series. Scale 1:200000. Sheet O-53-V. Explanatory Note. Soyuzgeolfond, Moscow, 114 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта СССР. Серия Майская. Масштаб 1:200000. Лист O-53-V: Объяснительная записка. М.: Союзгеолфонд, 1990. 114 с.].

Sukhorukov V.I., 1986. Upper Riphean Reference Sections of the Ulakhan-Bam Ridge. In: V.V. Khomentovsky (Ed.), *Late Precambrian and Early Paleozoic of Siberia. Siberian Platform and External Zone of the Altai-Sayan Folded Area: Collection of Research Papers*. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, p. 23–64 (in Russian) [Сухоруков В.И. Опорные разрезы верхнего рифея хребта Улахан-Бам // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Сибирская платформа и внешняя зона Алтае-Саянской складчатой области: Сборник научных трудов / Ред. В.В. Хоментовский. Новосибирск: Изд-во ИГиГ АН СССР, 1986. С. 23–64].

Van der Pluijm B.A., Marshak S., 2004. *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. W.W. Norton & Company, New York, 672 p.

Whitaker A.E., Bartholomew M.J., 1999. Layer Parallel Shortening: A Mechanism for Determining Deformation Timing at the Junction of the Central and Southern Appalachians. *American Journal of Science* 299 (3), 238–254. <https://doi.org/10.2475/ajs.299.3.238>.

Williams G., Chapman T., 1983. Strains Developed in the Hanging Walls of Thrusts Due to Their Slip/Propagation Rate: A Dislocation Model. *Journal of Structural Geology* 5 (6), 563–571. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90068-8).

Woodward N.B., Boyer S.E., Suppe J., 1989. *Balanced Geological Cross-Sections: An Essential Technique in Geological Research and Exploration*. Vol. 6. Short Course in Geology. American Geophysical Union, Washington, 132 p.

Yan-Zhin-Shin V.A., 1983. Tectonics of the Sette-Daban Horst-Anticlinorium. Yakutsk Branch of the USSR Academy of Sciences, 155 p. (in Russian) [Ян-Жин-Шин В.А. Тектоника Сетте-Дабанского горст-антиклинория. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. 155 с.].