



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0155>

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

E. Yu. Goshko, A. S. Efimov, A. S. Sal'nikov

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

Abstract: The article presents results of specialized processing of the deep seismic profile along a part of Reference Profile 3-DV which crosses the Aldan-Stanovoi shield in the meridian direction and goes across its buried northern slope. The study is aimed at determining frequency-energy characteristics of the seismic wave field which are related to physical conditions of geological features of the crust. Based on analysis and interpretation of the dynamic profiles, it is possible to reveal and contour the Archean cores of consolidation of the Aldan shield and its buried continuation that is covered by sediments of the Middle Lena monocline and to input new facts in the proposed geodynamic model showing formation of the crust in the south-eastern segment of the North Asian craton.

Key words: seismic profile of reflected waves, dynamic characteristics of the seismic wave field, the Earth's crust, primary cores of the sialitic crust, tectonic block, terrain, fault zone, collisional zone, accretion, orogenic belt, geodynamic model.

Recommended by E.V. Sklyarov

Citation: 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. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0155.

СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮГО-ВОСТОКА СЕВЕРО-АЗИАТСКОГО КРАТОНА ВДОЛЬ ОПОРНОГО ПРОФИЛЯ 3-ДВ

Е. Ю. Гошко, А. С. Ефимов, А. С. Сальников

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия

Аннотация: Специализированная обработка глубинного сейсмического разреза вдоль части опорного профиля 3-ДВ, пересекающей в меридиональном направлении Алдано-Становой щит и его северный погребенный склон, выполнена с целью определения частотно-энергетических характеристик сейсмического волнового поля, связанных с физическим состоянием геологических объектов земной коры. Результаты анализа и интерпретации полученных динамических разрезов позволили «увидеть» и оконтурить архейские ядра консолидации Алданского щита и его погребенного продолжения, скрытого осадками Средлененской моноклизы, дополнить новыми фактами развиваемую геодинамическую модель формирования земной коры юго-восточной части Северо-Азиатского кратона.

Ключевые слова: сейсмический разрез отраженных волн, динамические характеристики сейсмического волнового поля, земная кора, первичные ядра сиалической коры, тектонический блок (террейн), разломная (коллизонная) зона, аккреция, орогенный пояс, геодинамическая модель.

1. ВВЕДЕНИЕ

Часть опорного геофизического профиля 3-ДВ пересекла юго-восток Северо-Азиатского кратона в меридиональном направлении вдоль федеральной трассы М–56 от района Сковородино до Якутска (рис. 1).

Вдоль профиля проведены сейсмические наблюдения продольных отраженных волн, возбужденных группой из четырех 30-тонных вибраторов СВ-30/150 «Русич» по системе общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). Полная кратность наблюдений равнялась 100 при центрально-симметричной расстановке 400 сейсмоприемников на расстоянии в 20 км. Длина годографа, равная 10 км, обеспечила реальные оценки скоростной характеристики среды до глубины 12–15 км.

В комплексе с методом МОВ-ОГТ на профиле 3-ДВ осуществлены также наблюдения корреляционным методом преломленных волн (КМПВ), инициированных вибраторами через каждые 10 км, с детальным шагом регистрации 50 м. Максимальное удаление сейсмической косы на 40 км позволило получить скоростные характеристики земной коры до глубин 5–10 км с использованием преломленных и отраженных волн. Проектные параметры вибрационного свип-сигнала были выбраны исходя из необходимости обеспечения глубинности исследований до 10 км и лучшего разрешения данных в верхней части разреза.

На опорном профиле 3-ДВ были выполнены глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) земной коры с возбуждением колебаний чередованием взрывов 3–6 тонн гранулолита и группы мощных передвижных 40-тонных вибраторов ЦВП-40. Методика глубинных сейсмических зондирований была отработана по системе наблюдений с многократными перекрытиями. Расстояние между источниками возбуждения составляло 15–30 км, расстояние между регистрирующими станциями равнялось 3–6 км. Максимальная дальность наблюдений составила 300–400 км, что позволило оценить скоростные характеристики земной коры и верхней мантии до глубины 90 км.

Таким образом, сейсмические исследования земной коры на опорном профиле 3-ДВ проведены совокупностью методов: ОГТ, КМПВ, ГСЗ. Каждый из методов использовался для выявления структурного образа земной коры соответствующей детальности и глубины, а также для расчета скоростных характеристик. Сопоставимость результатов, полученных разными методами на одних и тех же глубинах в земной коре, является указанием на достоверность выполненных построений. Комбинированием глубинно-скоростных характеристик была получена матрица преобразования временного сейсмического разреза ОГТ в глубинный масштаб. Она создавалась из сглаженных скоростей суммирования по ОГТ с учетом данных о времени вступления первых волн в сейсмограммах КМПВ, ГСЗ.

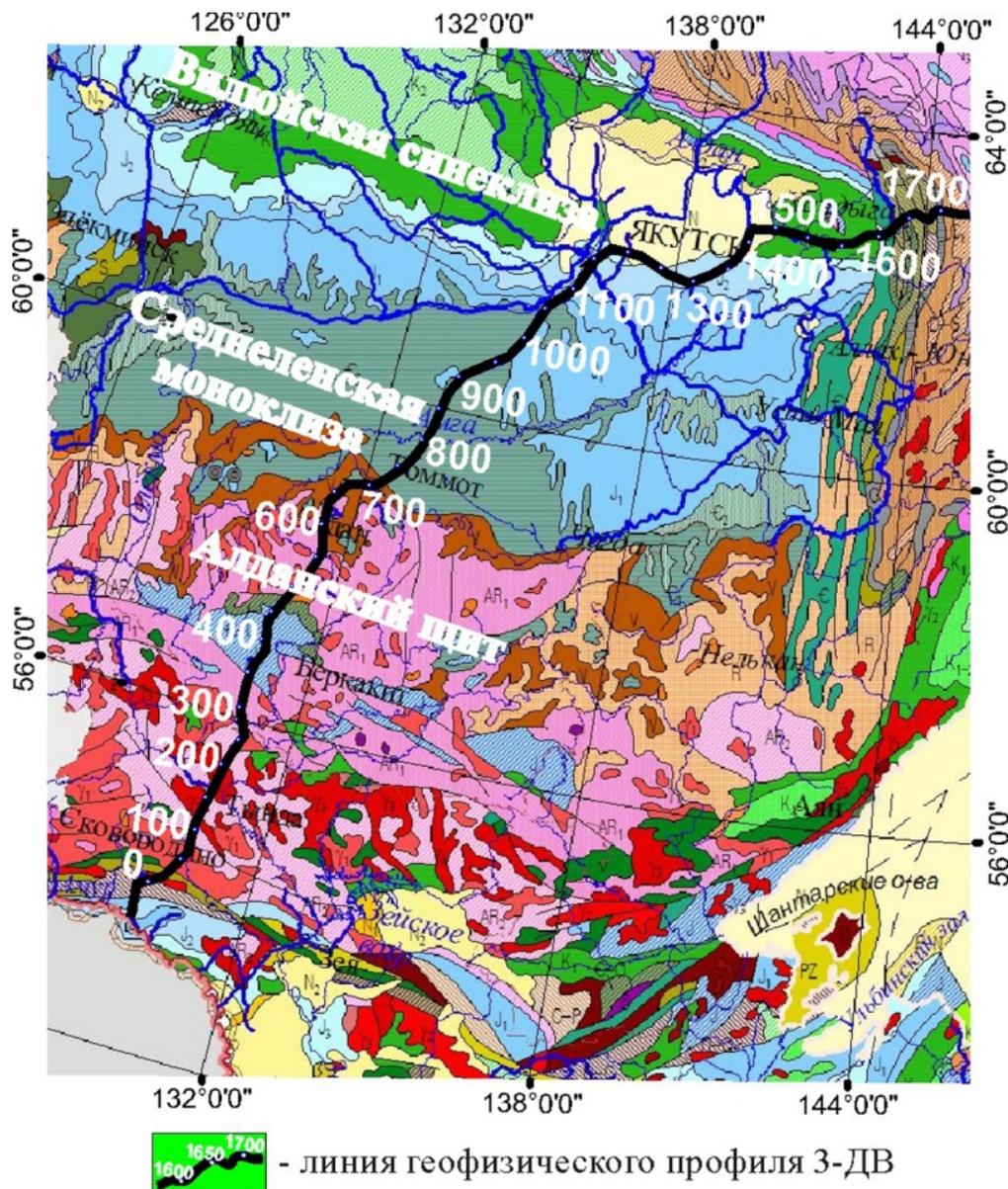
Из трех охарактеризованных выше разрезов вдоль

опорного профиля 3-ДВ наиболее детальной информацией о структуре и физических свойствах геологических объектов в земной коре обладает глубинный сейсмический разрез отраженных волн ОГТ. Параметры дискретизации волнового поля в разрезе составляют 25 м по горизонтальной оси (между трассами) и 8 м по вертикальной шкале глубин. Этой дискретизации достаточно для получения информации о сейсмических волнах в частотном диапазоне их регистрации 10–70 Гц при средней скорости в земной коре от 3500 до 6500 м/с. Так, в верхней части геологического разреза до глубины 5 км скорость в среде составляла 4000 м/с, минимальная длина волны λ в интерференционном пакете сейсмических волн равнялась 120 м. До глубины 40 км, отвечающей нижней части коры, средняя скорость составляла около 6500 м/с, минимальная длина волны λ увеличивалась до 300 м.

Основным физическим параметром, контролирующим взаимосвязь детальности рассмотрения целевых геологических объектов и характеристик сейсмической наблюдательной системы, является радиус первой зоны Френеля $R_{\text{фр}}$ – структурный параметр, зависящий от глубины H до отражающей границы, длины волны λ и, в случае близвертикальных отражений, равный: $R_{\text{фр}} = \sqrt{2\lambda H}$. Пределы изменения размеров первой зоны Френеля $R_{\text{фр}}$ для глубинного сейсмического разреза ОГТ вдоль профиля 3-ДВ от дневной поверхности до верхов мантии (>50 км) составляли 500–5000 м. Следовательно, выбранный частотный диапазон и шаги квантования записи возбужденного волнового поля в земной коре (с известными скоростными характеристиками) были достаточными для сохранения всей информации о сейсмических параметрах геологических объектов размером ≥ 500 м.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Целевыми объектами тектонического анализа и геодинамических реконструкций являются геологические блоки земной коры, зоны глубинных разломов, их разделяющие, а также аккреционные и коллизионные структуры, зоны тектонического меланжа и т.п. Каждый из названных геологических объектов имеет большие размеры (от 1 км до сотен километров) и, соответственно, находит отображение в наблюдаемом сейсмическом поле отраженных, дифрагированных, рассеянных и обменных волн. Для анализа сложного интерференционного волнового поля необходимо определить математическую модель, которая установила бы адекватную связь между сейсмическим полем и структурно-физическими параметрами крупных объектов гетерогенной геологической среды. При стандартном подходе к описанию данных сейсмического эксперимента используется аддитивная модель косвенных измерений [Goltsman, 1971, 1998]:



- линия геофизического профиля 3-ДВ

Рис. 1. Схема расположения опорного профиля 3-ДВ на геологической карте. Цифры вдоль профиля – его разметка в км (пикеты).

Fig. 1. The scheme showing the location of Reference Profile of 3-DV in the geological map. Numbers along the profile correspond to kilometre points.

$U = f(\rho) + n$, где $f(\rho)$ – известные полезные волны (детерминированные решения прямых задач), n – случайные расхождения реальных измерений U и модельных значений $f(\rho)$. Аддитивная модель устанавливает косвенную связь между искомым вектором параметров ρ волнового поля (временами вступления полезных волн t , их амплитудами A , частотами f и другими параметрами) и измеряемыми в сейсмическом эксперименте величинами U . При этом объективно присутствующая в измерениях неопределенность относится к аддитивному «шуму» n . Однако любую из величин в правой части уравнения можно рассматривать двояко: либо как случайную, либо как неслучайную. Выбор между

этим двумя возможностями определяется сущностью и характером имеющейся информации об этих величинах. В гетерогенной земной коре полезная составляющая наблюдаемого волнового поля $f(\rho)$ состоит из интерференционных волновых пакетов, практически неразделимых по типам волн из-за случайного характера их сложения. Вследствие этого $f(\rho)$ с неизбежностью также содержит случайную компоненту, как и «шум» n . В этой нестандартной ситуации, когда полезная составляющая является случайной функцией, необходим регуляризирующий алгоритм для выделения целевого объекта в сейсмическом волновом поле – локального интерференционного волнового пакета

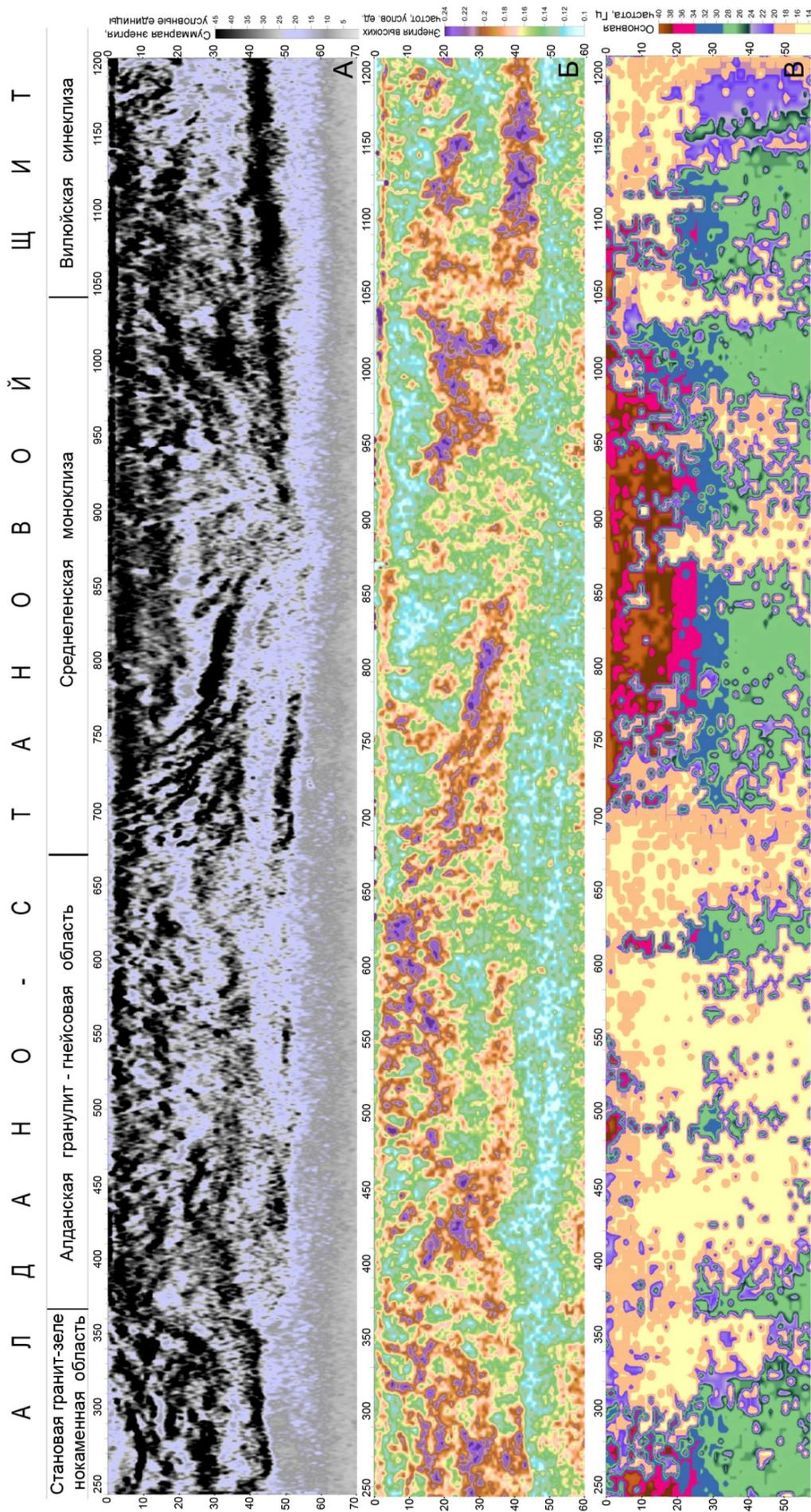


Рис. 2. Частотно-энергетические характеристики локальных волновых пакетов на опорном профиле 3-ДВ.

А – суммарная энергия полного диапазона частот (усл. ед.); Б – высокая частотная энергия в диапазоне 42–68 Гц (усл. ед.); В – основная частота, отвечающая максимуму амплитудного спектра (Гц).

Fig. 2. Frequency-energy characteristics of local wave packets at Reference Profile 3-DV.

A – total energy of the complete frequency range (conditional unit); B – high-frequency energy in the range from 42 to 68 Hz (conditional unit); V – main frequency corresponding to the maximum amplitude of the spectrum (Hz).

отраженных, дифрагированных, рассеянных и обменных волн, устойчиво характеризующего динамические свойства некоторого малого участка волнового поля.

Для анализа «гетерогенного» волнового поля нами применяется регуляризирующий алгоритм определения устойчивой формы локального интерференционного волнового пакета $f(\rho)$ на некотором малом участке сейсмического разреза [Goshko et al., 2008]. Использование алгоритма в малом окне, передвигающемся с равномерным шагом по горизонтальной (x) и вертикальной (h) координатам, позволяет перейти от сейсмического разреза, содержащего случайную компоненту, к информационной матрице $M_{f(\rho)}$ локальных волновых пакетов, аккумулирующей в сжатом виде устойчивые структурно-динамические характеристики полезной составляющей волнового поля. Указанный способ обработки был реализован в специализированной компьютерной технологии «StreamSDS» [Goshko et al., 2011].

3. ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ НА ОПОРНОМ ПРОФИЛЕ 3-ДВ

В комплексе «StreamSDS» были вычислены матрицы $M_{f(\rho)}$ локальных волновых пакетов в окнах 1×1 км и 3×3 км, передвигавшиеся по разрезу с 25%-ным перекрытием. Получены частотно-энергетические характеристики локальных интерференционных волновых пакетов: суммарная энергия полного диапазона частот 10–70 Гц, вычисленная в макроокне 3×3 км, суммарная энергия полного диапазона частот в микроокне 1×1 км, высокочастотная энергия в диапазоне частот 42–68 Гц, вычисленная в окне 3×3 км (все характеристики в условных единицах размерности квадрата амплитуды), а также основная частота, отвечающая максимуму амплитудного спектра в окне 3×3 км (Гц).

Частотно-энергетические характеристики локальных волновых пакетов непосредственно связаны с физическим состоянием некоторой области земной коры заданного размера. Суммарная энергия пропорциональна акустической жесткости среды в пределах локального окна (рис. 2, А). Высокочастотная энергия обратно пропорциональна поглощению в среде (рис. 2, Б). Основная частота интерференционного волнового пакета тем выше, чем меньше средний размер или тоньше слоистость геологических тел в пределах локального участка гетерогенной среды (рис. 2, В).

Наглядность частотно-энергетических изображений достигается выбором оптимальных способов визуализации и палитр для отображения геологических структур и особенностей их физических свойств в земной коре.

Физические неоднородности земной коры весьма консервативны. Медленно теряя контрастность, они способны сохраняться в течение сотен миллионов лет после завершения тектогенеза. Вследствие этого следы

перемещения и тип взаимодействия крупных блоков надолго фиксируются в породном веществе литосферы. Это позволяет использовать результаты современных глубинных геофизических исследований земной коры при воссоздании истории формирования древних областей наряду с традиционными данными о составе и возрасте ее пород. Полученные частотно-энергетические разрезы земной коры Центрально-Алданского орогенного пояса были сопоставлены в географических координатах с известными палеотектоническими построениями для данной территории.

4. АНАЛИЗ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ ПО ОПОРНОМУ ПРОФИЛЮ 3-ДВ

Варианты реконструкции строения Северо-Азиатского кратона были выполнены ранее [Nokleberg et al., 2000]. А.П. Смеловым с соавторами [Parfenov, Kuz'min, 2001] опубликована карта террейнов юго-восточной части кратона (рис. 3). Различия в составе слагающих террейны метаморфических и магматических образований, характере и степени метаморфизма послужили основой для выделения их на карте. При этом гранит-зеленокаменные террейны, большей частью относительно слабометаморфизованные, являются более древними, архейскими. Террейны же, испытавшие различный по Р-Т условиям гранулитовый метаморфизм, имеют разный, но преимущественно раннепротерозойский возраст. В этой схеме Батомгский (ЕВТ) и Учурский (ЕУС) террейны образуют Восточно-Алданский супертеррейн, а Нимнырский (АНМ) и Сутамский (АСТ) террейны – Центрально-Алданский супертеррейн.

О.М. Розен создал детальную тектоническую схему, близкую к рассмотренной выше [Rosen, 2003]. Он продолжил построения на север Северо-Азиатского кратона под осадочный чехол Среднеленской моноклизы и Вилюйской синеклизы (рис. 4, А), опираясь на карту аномального магнитного поля [Gafarov et al., 1978]. При создании схемы О.М. Розен считал, что структура кратона определяется двумя главными элементами: тектоническими блоками (террейнами) и разделяющими их разломными (коллизийными) зонами. Возраст вещества разных блоков (или время отделения от мантии) существенно различается: 3.5; 3.3; 3.0 и 2.5 млрд лет, что служит указанием на их независимое возникновение в форме микроконтинентов. Сталкивавшиеся микроконтиненты в ходе коллизийного сжатия и надвигания были превращены в тектонические блоки (террейны) в конце палеопротерозоя. Коллизийные зоны, разделяющие террейны, обычно имеют надвиговую природу и датируются гранитоидами возраста 1.9 и 1.8 млрд лет. Северо-Азиатский кратон возник как единое целое в конце палеопротерозоя в результате слипания архейских микроконтинен-

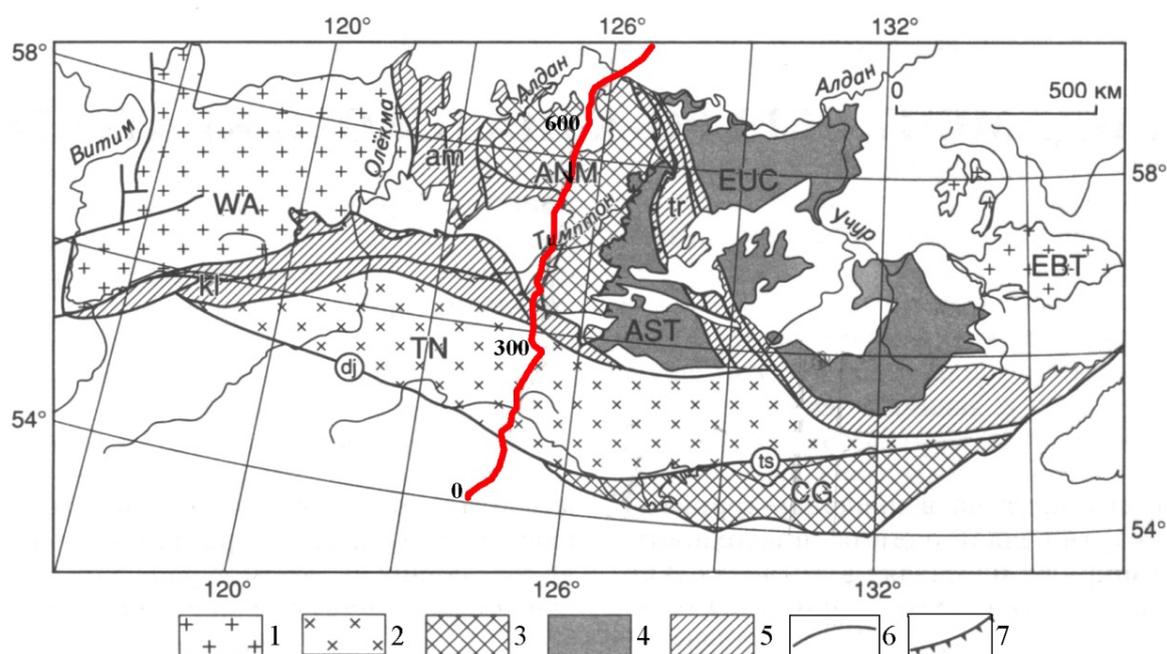


Рис. 3. Карта террейнов юго-восточной части Северо-Азиатского кратона [Smelov et al., 2007].

1 – гранит-зеленокаменные (WA – Западно-Алданский, EBT – Батомгский); 2 – тоналит-тронджемито-гнейсовые (TN – Тындинский); 3 – гранулит-ортогнейсовые (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 4 – гранулит-парагнейсовые (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, KL – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский); 7 – надвиги.

Fig. 3. The map showing terrains of the south-eastern segment of the North Asian craton [Smelov et al., 2007].

1 – granite-greenstone (WA – Western Aldan, EBT – Batomga); 2 – tonalite-trondjemite-gneiss (TN – Tynda); 3 – granulite-orthogneiss (ANM – Nimnyr, CG – Chogar); 4 – granulite-paragneiss (AST – Sutam, EUC – Uchur); 5 – zones of tectonic melange (am – Amga, KL – Kalar, tr – Tyrkanda); 6 – faults (dj – Dzheltulak, ts – Taksakanda); 7 – thrusts.

тов вместе с их палеопротерозойскими осадочно-вулканогенными чехлами возрастом 2.4–2.1 млрд лет, превращенными в процессе коллизии в складчатые пояса.

В то же время А.П. Смеловым и В.Ф. Тимофеевым была опубликована тектоническая схема фундамента Северо-Азиатского кратона [Smelov, Timofeev, 2003], в основных чертах совпадающая со схемой О.М. Розена (рис. 4, Б). История формирования континентальной коры Северо-Азиатского кратона, по А.П. Смелову [Parfenov, Kuz'min, 2001], имела три главных тектонических этапа: 1) в позднем архее (3.0–2.6 млрд лет) – образование ранних кратонов, 2) в палеопротерозое (2.1–1.9 млрд лет) – образование орогенных поясов в результате коллизии архейских микроконтинентов (этап формирования Северо-Азиатского кратона) и 3) мезопротерозое (<1.4 млрд лет) – образование орогенных поясов по его окраинам. После каждой стадии орогенеза происходит формирование разных по масштабам рифтогенных структур.

Несмотря на схожесть взглядов О.М. Розена и А.П. Смелова на основные тектонические блоки, формирующие земную кору региона и общие их возрастные оценки, определение положения границ раннедокем-

брийских террейнов юго-востока Северо-Азиатского кратона до настоящего времени является дискуссионным.

В схеме А.П. Смелова (рис. 4, Б) показана более сложная линия сочленения Центрально-Алданского и Учурского орогенных поясов, буквально повторяющая геометрию положительных линейных элементов аномального магнитного поля. Батомгский блок, представленный единым в схеме О.М. Розена, разделен А.П. Смеловым на две части: Батомгский блок – на юге и Тырынский блок – на севере. Кроме того, фигуры и площади распространения Центрально-Алданского и Учурского орогенных поясов существенно различаются в построениях этих авторов.

Глубинный сейсмический разрез и частотно-энергетические изображения земной коры позволили «увидеть» и проанализировать строение земной коры в сечении ее опорным профилем 3-ДВ. Линия профиля была нанесена на тектонические схемы (рис. 4) в географических координатах, что дало возможность отметить вдоль линии профиля положение предполагаемых границ, разделяющих блоки земной коры. Интерпретация энергетического разреза (рис. 5, А) позволила обосновать глубинные разломы в земной коре по

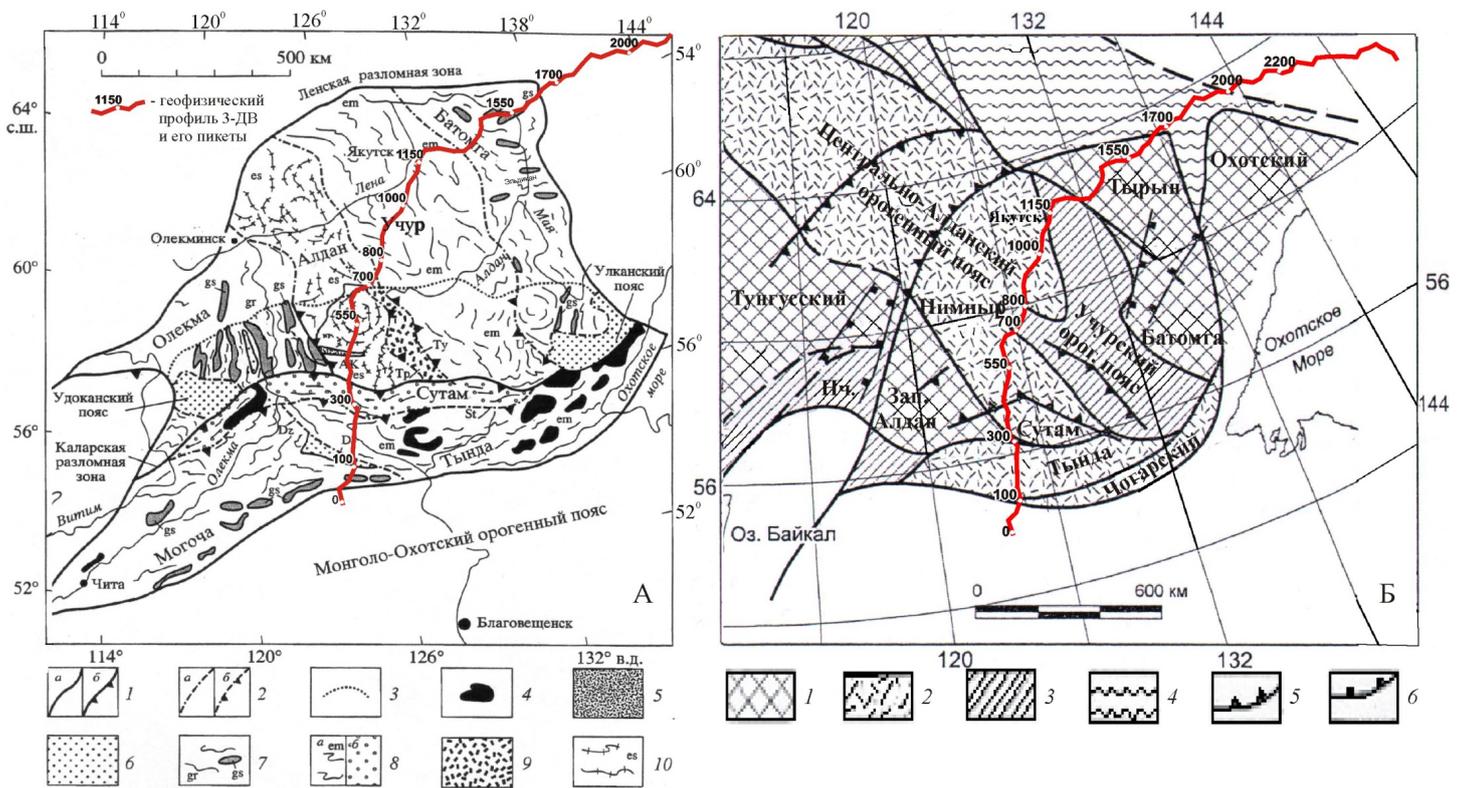


Рис. 4. Схема террейнов юго-востока Северо-Азиатского кратона.

А – по О.М. Розену [Розен, 2003], 1 – главные разломные зоны (а), то же с надвиговой составляющей (б); 2 – прочие разломы (а), то же с надвиговой составляющей (б); 3 – северная граница обнаженных регионов; 4 – анортозиты и габбро, 2,8; 2,5 млрд лет; 5 – Унгринский комплекс, габбро и диориты, 2,2 млрд лет; 6 – деформированные осадочные и вулканические породы, 2,2–1,75 млрд лет; 7 – гранит-зеленокаменный комплекс (gr), 3,5–3,0 млрд лет, и зеленокаменные пояса (gs), под чехлом показаны по геофизическим данным; 8 – эндербиты и мафические гранулиты (а), 3,5–2,7 млрд лет, интенсивно деформированные 2,2–1,8 млрд лет назад (б); 9 – Иджекская зона, эндербиты, мафические гранулиты; метаграувакки <2,4–2,1 млрд лет, чарнокиты 1,9 млрд лет; 10 – комплекс эндербитов и метаседи-ментов, 3,5–3,3 млрд лет; Б – по А.П. Смелову, В.Ф. Тимофееву [Smelov, Timofeev, 2003], 1 – террейны архейских кратонов: Западно-Якутский кратон (Западно-Алданский и Тунгусский террейны); Восточно-Якутский кратон (Батомгский, Охотский и Тырынский террейны); 2 – палеопротерозойские орогенные пояса с переработанной архейской и палеопротерозойской корой: Центрально-Алданский орогенный пояс (Сутамский и Нимырский террейны), Становой орогенный пояс (Чогарский и Тындинский террейны); 3 – палеопротерозойские орогенные пояса с преимущественно палеопротерозойской корой: Учурский орогенный пояс (террейн), Нечерский орогенный пояс (террейн); 4 – Лено-Алданский мезопротерозойский орогенный пояс; 5 – мезопротерозойские рифтовые и дайковые пояса; 6 – неопротерозойские рифтовые и дайковые пояса.

Fig. 4. The scheme of terrains of the south-eastern segment of the North Asian craton.

А – according to [Rosen, 2003], 1 – main fault zones (a), same with thrust component (b); 2 – other faults (a), same with thrust component (b); 3 – northern boundary of outcropped regions; 4 – anorthosite and gabbro, 2.8 and 2.5 billion years; 5 – Ungra complex, gabbro and diorite, 2.2 billion years; 6 – deformed sedimentary and volcanic rocks, 2.2–1.75 billion years; 7 – granite-greenstone complex (gr), 3.5–3.0 billion years, and greenstone belts (gs) (under the cover, shown as per geophysical data); 8 – enderbite and mafic granulite (a), 3.5–2.7 billion years, intensely deformed, 2.2–1.8 billion years ago (b); 9 – Idzhetskaya zone, enderbite, mafic granulite; metagraywacke, <2.4–2.1 billion years, charnockite, 1.9 billion years; 10 – complex of enderbite and metasedimental deposits, 3.5–3.3 billion years; Б – according to [Smelov, Timofeev, 2003], 1 – terrains of Archean cratons: Western Yakutia craton (West Aldan and Tunguska terrains); Eastern Yakutia craton (Batongka, Okhotsk and Tyryn terrains); 2 – Paleoproterozoic orogenic belts with metamorphosed Archean and Paleoproterozoic crust: Central Aldan orogenic belt (Sutam and Nimyr terrains), Stanovoy orogenic belt (Chogar and Tynda terrains); 3 – Paleoproterozoic orogenic belt with dominating Paleoproterozoic crust: Uchur orogenic belt (terrain), Nechera orogenic belt (terrain); 4 – Lena-Aldan Mesoproterozoic orogenic belt; 5 – Mesoproterozoic rift belts and dike belts; 6 – Neoproterozoic rift belts and dike belts.

характеру энергетической дифференцированности (слоистости), наличию прозрачных, энергетически слабых зон. Глубинные разломы разграничили основные блоки в земной коре и, тем самым, открыли возможность выявить их подобие или различие по энергетическим признакам.

В технологии динамической обработки «StremSDS»

показатель энергии в интервале высоких частот равен мощности правого склона амплитудного спектра локального сейсмического волнового пакета. В тектонически расслоенных зонах из-за интерференции сейсмических волн уровень энергии на высоких частотах не затухает, а резонансно увеличивается, что и позволяет трассировать линии перемещения геологических

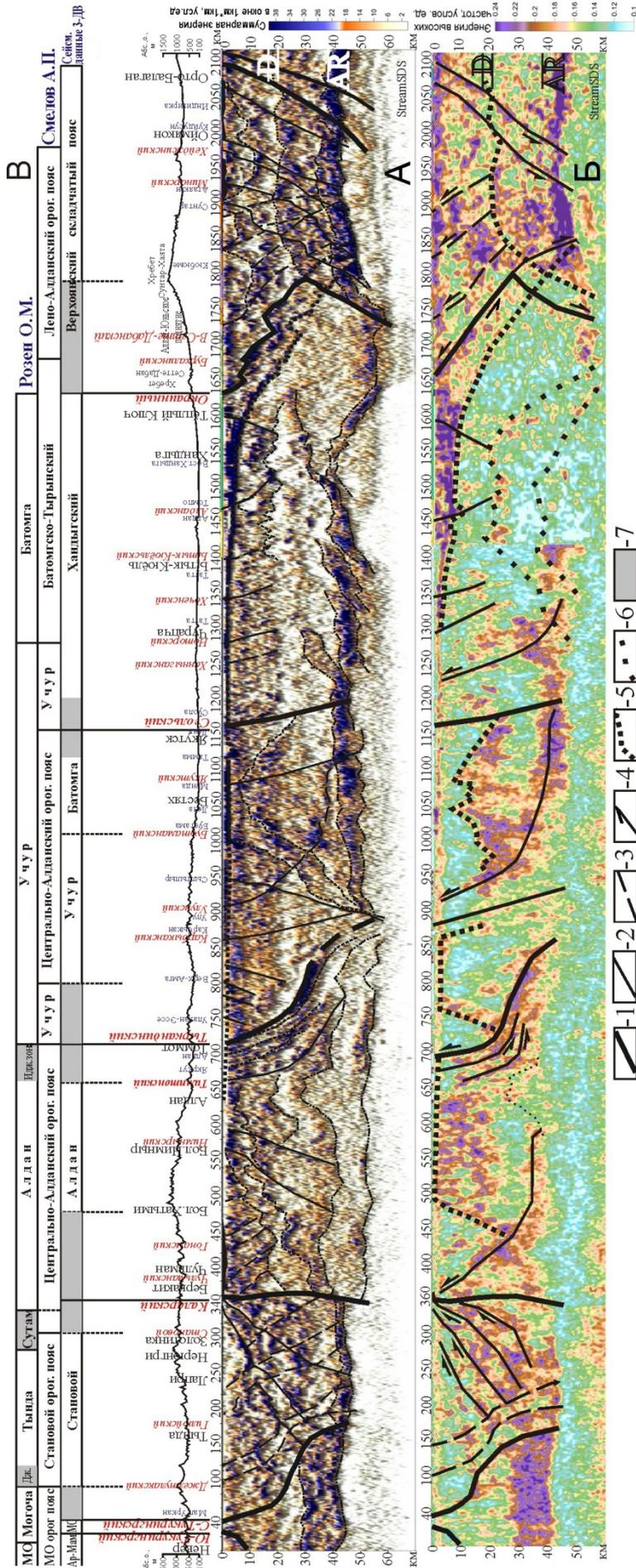


Рис. 5. Сравнение тектонических схем строения земной коры Северо-Азиатского кратона О.М. Розена, А.П. Смелова и вариант положения тектонических блоков и коллизийных зон по сейсмическим данным профиля 3-ДВ.

А – энергетический разрез и предлагаемая модель разделения земной коры на тектонические блоки; Б – разрез высоких частот и линии перемещения блоков земной коры; В – сравнение имеющихся и нового варианта тектонического деления земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона на блоки. 1 – главные разломы; 2 – второстепенные разломы; 3 – предполагаемые разломы; 4 – надвиги; 5 – структурные линии внутри коры; 6 – аномальный подъем земной коры; 7 – предполагаемые коллизийные зоны.

Fig. 5. Comparison of tectonic schemes proposed by O.M. Rosen and A.P. Smelov to show the structure of crust in the North Asian craton. A variant of positions of tectonic blocks and collision zones according to seismic data from Reference Profile 3-DV.

А – energy profile and the proposed model showing the pattern of tectonic blocks of the crust; Б – high-frequency profile and lines showing crustal block movement; В – comparison of the current and updated variants of tectonic division of the crust into blocks in the south-eastern segment of the North Asian craton. 1 – main faults; 2 – minor faults; 3 – assumed faults; 4 – thrusts; 5 – structural lines inside the crust; 6 – anomalous uplift of the crust; 7 – assumed collision zones.

тел друг относительно друга. Таким образом, высокочастотный разрез (рис. 5, Б) выявил линии главных тектонических перемещений блоков земной коры. На основе частотно-энергетических разрезов было проведено сопоставление вариантов тектонических схем, созданных О.М. Розеном и А.П. Смеловым, и предложен новый проект (рис. 5, В).

Основные изменения схожей, в целом, точки зрения указанных авторов на блоковую делимость и местоположение террейнов Северо-Азиатского кратона касаются его восточной части (рис. 5, В). По нашему мнению, Батомгский блок (по О.М. Розену), или Батомгско-Тырынский (по А.П. Смелову), находится западнее на 300 км и отчетливо читается как свод архейского заложения на уровне нижней коры на пикетах 950–1150 км частотно-энергетических разрезов. Соответственно, Учурский блок, разделяющий Алдан и Батомгу в представлениях обоих авторов, занимает отрезок профиля 700–950 км. Восточнее Суольского разлома на пикетах от 1150 км до 1650 км профиля по дневной поверхности (Окраинный надвиг Сетте-Дабана) облик коры меняется. В центральной части этого впервые выделяемого блока, под пос. Хандыга, нижняя кора куполообразно приподнята до глубины выше 40 км. Наблюдаются следы ее изломов, скольжения и погружения чешуй друг относительно друга на западном крыле этого куполообразного поднятия. Средняя кора значительно переработана, насыщена энергетически прозрачными зонами внедрения интрузий и одновременно содержит расслоенные, энергетически яркие следы сжатия-скольжения. Ниже глубины 25 км падение пластов коры направлено на запад. Выше глубины 25 км, в верхней и отчасти в средней коре, направления падения разломов и пластов направлены на восток. Оканчивается описываемый блок зоной погружения континентальной коры в мантию. Выделяемый блок назван нами Хандыгским.

Можно предположить, что Хандыгский блок отличается от других террейнов юго-восточной части Северо-Азиатского кратона составом слагающих его метаморфических и магматических образований, характером и степенью метаморфизма. Причина особого физического состояния и облика этого блока состоит, вероятно, в занимаемом передовом положении в зоне столкновения Сибирской плиты и надвигающегося с востока Охотского кратонного блока и Верхоянского орогенного пояса.

Кроме того, в вертикальном разрезе земной коры в районе пос. Хандыга зафиксирован аномальный куполообразный подъем нижней коры (диаметром не менее 250 км и высотой 10 км) и одновременно отмечается присутствие промежуточных магматических камер в средней коре, сопоставляемых нами с областями прозрачности энергетического разреза на глубине 10–20 км. Эти особенности могут являться результатом долговременного теплового и физико-химического воздействия мантии на земную кору Хандыгского блока

что, в свою очередь, ставит вопрос об установлении ведущих и вторичных сил при формировании его современного облика.

Запечатленные в современном высокочастотном разрезе земной коры следы перемещений древних блоков позволяют сделать выводы о геодинамической истории формирования земной коры Центрально-Алданского орогенного пояса. Проявившиеся в разрезе траектории перемещения тектонических блоков подтверждают историко-геологические выводы О.М. Розена о том, что наращивание Алданского супертеррейна шло в широтном направлении с востока на запад (в современной структуре). Алданский террейн был надвинут на Олекминский террейн, а с востока на него по Тыркандинской системе разломов надвигался Учурский террейн, под который был пододвинут Батомгский террейн. Когда Алданский супертеррейн был уже сформирован, с юга надвинулся Сутамский супертеррейн по субширотной Каларской коллизионной зоне, перекрывающей разновозрастные террейны Алданской провинции.

Однако остается неясной история образования на северном склоне Алданского щита, скрытого осадочным комплексом Среднеленской моноклизы, уникальной чашеобразной структуры диаметром более 350 км на дневной поверхности и с корнями, уходящими в мантию. До проведения сейсмических работ в этом регионе структура не была выявлена. На энергетическом разрезе она фиксируется в пределах пикетов 700–1050 км профиля. Пролить свет на возникновение данной коллизионной структуры регионального масштаба могут палеотектонические реконструкции архейско-протерозойского периода формирования Северо-Азиатского кратона (рис. 6), выполненные на основании изотопных данных о возрасте и составе вещественных комплексов [Smelov, Timofeev, 2003] и получившие новые подтверждения [Smelov et al., 2007]. Согласно этим построениям современный фундамент Северо-Азиатского кратона представляет собой единую структуру. Однако в архее (>2500 млн лет) на этой территории, вдоль профиля 3-ДВ, располагались гранит-зеленокаменные супертеррейны, разделенные океанической корой: Алданский, состоящий из Западно-Алданского (WAD), Тунгусского (TG), Тунгского (TN), Центрально-Алданского (Нимнырского (CANM), Сутамского (CAST)) террейнов, и Батомгский (ЕВТ) с прилегающей Учурской (ЕУС) пассивной окраиной, а также Становой орогенный пояс, включающий Чогарский (СОСГ), Тындынский (ТУ), Охотский (ОН), Кольмо-Омолонский (КОМ) террейны (рис. 6, А). Позднее, в палеопротерозое (2500–2000 млн лет), как полагает А.П. Смелов, происходило сближение террейнов. На западном берегу разделявшего их океанического бассейна им реконструируется обстановка активной субдукции коры с образованием аккреционного клина и ростом Алданского террейна за счет действия надсубдукционного вулканизма (рис. 6, Б). При этом на

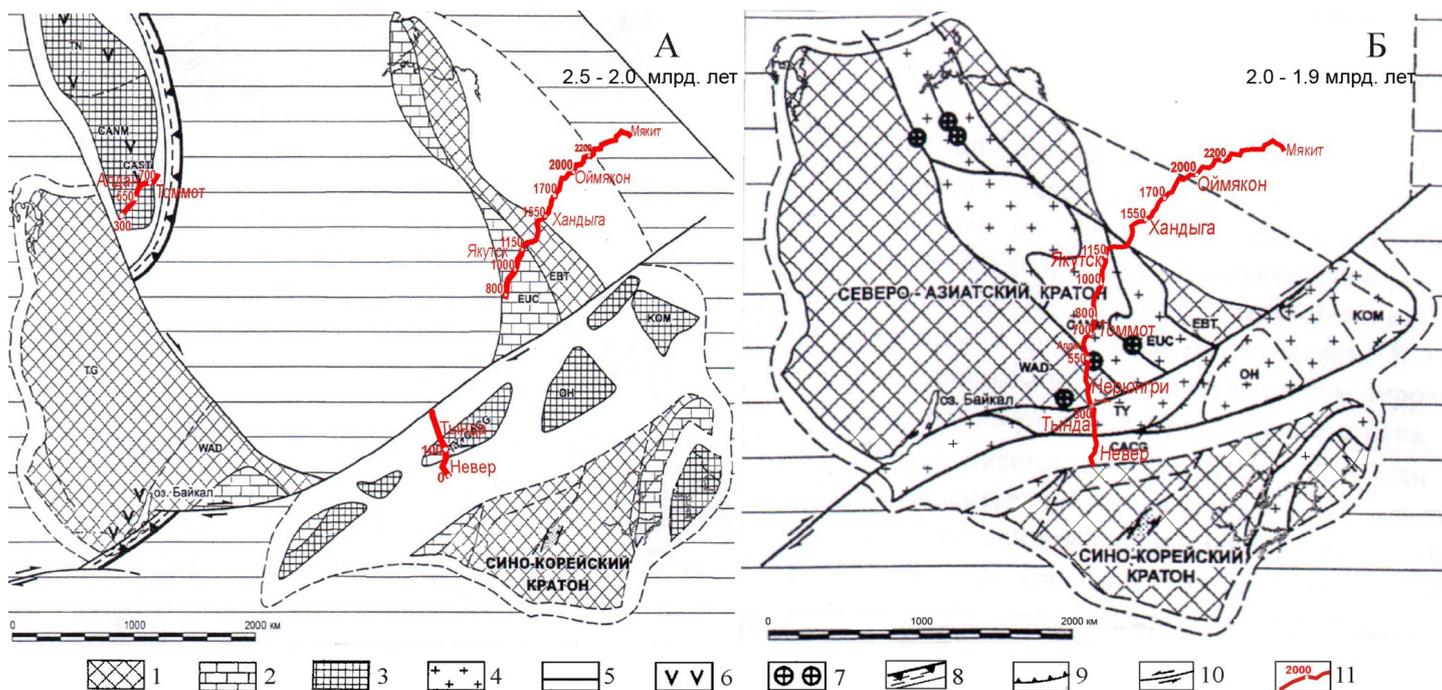


Рис. 6. Палеотектоническая реконструкция для палеопротерозоя. А – 2.5–2.0 млрд лет; Б – 2.0–1.9 млрд лет [Smelov, Timofeev, 2003].

1 – кратоны; 2 – погруженная пассивная окраина кратона; 3 – микроконтиненты; 4 – коллаж аккрецированных террейнов; 5 – океаническая кора; 6 – надсубдукционная вулканическая дуга; 7 – субщелочные и щелочные вулканические и плутонические пояса; 8 – зона субдукции и аккреционный клин; 9 – надвиг; 10 – сдвиг; 11 – реконструкция положения профиля 3-ДВ.

Fig. 6. Paleotectonic reconstruction for the Paleoproterozoic. А – 2.5–2.0 billion years; Б – 2.0–1.9 billion years [Smelov, Timofeev, 2003].

1 – cratons; 2 – submerged passive margins of cratons; 3 – microcontinents; 4 – collage of accreted terrains; 5 – oceanic crust; 6 – super-subduction volcanic arc; 7 – sub-alkaline and alkaline volcanic and plutonic belts; 8 – subduction zone and accretion wedge; 9 – thrust; 10 – shear fault; 11 – reconstructed position of Profile 3-DV.

восточном берегу океана, на Учурском склоне и шельфе погруженной части Батомгского террейна, существовала обстановка пассивной континентальной окраины. А.П. Смелов предполагал окончательное закрытие архейского океана в период 2000–1900 млн лет.

Причленение друг к другу Алданского и Батомгского террейнов сопровождалось гранулитогнейсовым метаморфизмом в земной коре, результатом которого явился, по мнению А.П. Смелова, Центрально-Алданский орогенный пояс (рис. 6, Б). Совмещение в географических координатах линии профиля 3-ДВ с современной тектонической схемой строения фундамента Северо-Азиатского кратона А.П. Смелова (см. рис. 4, Б) позволило определить принадлежность отрезков профиля к тем блокам фундамента, которые они пересекают. Установленное в современном времени соответствие частей профиля и блоков земной коры было перенесено на палеотектоническую схему палеопротерозоя (2.5–2.0 млрд лет, рис. 6, А). Оказалось, что реконструируемый А.П. Смеловым на рубеже архея – палеопротерозоя океанический бассейн и осо-

бенности тектонических обстановок на его берегах отвечают современному положению чашеобразной коллизионной структуры с мантийными корнями (700–1050 км профиля).

В реконструкции А.П. Смелова на рубеже архея и протерозоя ширина океана составлял около 3 тыс. км. В палеопротерозое (2.5–2.0 млрд лет) по сдвигам происходит сближение крупных гранит-зеленокаменных террейнов. По восточному борту океана реконструируется пассивная континентальная окраина в виде Учурской погруженной части шельфа и склона Батомгского кратонного террейна. На западном борту архейского океана А.П. Смеловым реконструируется конвергентная граница. Здесь происходит активная субдукция океанической коры и одновременное наращивание континентальной коры Алданского блока за счет образования аккреционного клина и действия надсубдукционного вулканизма.

Частотно-энергетические изображения современной земной коры Центрально-Алданского орогенного пояса (рис. 7) дали возможность увидеть овеществленные следы архейско-протерозойской геодинамической

истории региона, реконструированной А.П. Смеловым. В энергетическом разрезе (рис. 7, А) найдены образы первичных ядер консолидации Алданского и Учурско-Батомгского блоков. И О.М. Розен, и А.П. Смелов в своих палеогеодинамических построениях указывают на протерозойское последовательное приращение блоков в направлении с востока на запад. Следы этих движений объективированы в разрезе высокочастотной энергии (рис. 7, Б).

Закрытие архейского океана оставило след в энергетическом разрезе земной коры (рис. 7, А) в виде грандиозной аккреционной призмы размером 350 км (700–1050 км профиля вдоль дневной поверхности). Верхняя часть призмы до глубины 20 км заполнена тектонически расслоенными осадками, что проявляется в значительном повышении основной частоты сейсмических волн (рис. 7, В). В нижней части этой гигантской аккреционной призмы видны следы скупивания океанической коры, а процесс погружения ее передового западного края в мантию, видимо, испытал стагнацию, а не ушел на глубину (рис. 7, А). Возможно, под воздействием процессов мантийного плюмового апвеллинга [Kravchenko et al., 2009] пододвигающаяся океаническая плита нарастила снизу Алданский блок, увеличив его мощность по сравнению с соседним Становым и Учурско-Батомгским блоками на 10 км (рис. 7, А).

Передовой фронт коллизии Алданского и Учурско-Батомгского блоков запечатлен в протяженной и глубокой Тимптоно-Тыркандинской зоне разломов. Этот уходящий на значительную глубину аккреционный клин примыкает к Алданскому блоку и содержит следы тектонического меланжа, вулканизма и интрузий (рис. 7, А, Б).

Земная кора Алданского блока претерпела длительный гранулитогнейсовый метаморфизм, повысивший ее однородность. Это проявилось в уменьшении основной частоты сейсмических волн до минимальных значений 12–20 Гц (рис. 7, В). Такое же снижение основной частоты, вероятно, маркирует вертикальные каналы поступления мантийных флюидов в толщу земной коры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмическое волновое поле, формируемое гетерогенной геологической средой земной коры, требует

применения специальных приемов обработки, минимизирующих объективно присутствующую случайность в наблюдаемых данных. Регуляризирующий алгоритм выделения устойчивой локальной формы интерференционного волнового пакета, реализованный в специализированном программном комплексе «StreamSDS», позволяет получить информативную часть «гетерогенного» сейсмического волнового поля в виде дискретной регулярной матрицы локальных волновых пакетов. Изображения частотно-энергетических характеристик матрицы локальных волновых пакетов в границах глубинного сейсмического разреза дают возможность проанализировать строение и физическое состояние геологических блоков земной коры, глубинных разломов, а также коллизионных структур.

На основе полученных частотно-энергетических разрезов по профилю З-ДВ удалось сопоставить существующие в настоящее время взгляды на строение и историю формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона, внести изменения в положение границ Учурского и Батомгского блоков и выделить новый Хандыгский блок.

Было замечено, что частотно-энергетический облик Хандыгского блока значительно отличается от других террейнов юго-восточной части Северо-Азиатского кратона. Можно предположить две причины этого явления: тектоническую – передовое положение блока в зоне столкновения Сибирской плиты и надвигающегося с востока Охотского кратонного блока и Верхоянского орогенного пояса; физическую – особые свойства земной коры являются результатом длительного теплового и физико-химического воздействия мантии. Решение вопроса об установлении ведущих и вторичных сил при формировании аномального образа Хандыгского блока требует дополнительных исследований.

Предложен генезис Учурского блока, который, по нашему мнению, представляет собой гигантскую аккреционную призму, образовавшуюся в результате закрытия архейского океана из-за придвижения Батомгского блока с востока и окончательной раннепротерозойской аккреции его к Алданскому блоку континентальной коры.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Gafarov R.A., Leites A.M., Fedorovsky V.S. et al. 1978. Tectonic zoning of the Siberian platform and the sequence of formation of the continental crust // *Geotektonika (Geotectonics)* (1), 43–58 (in Russian) [Гафаров Р.А., Лейтес А.М., Федоровский В.С. и др. Тектоническое районирование фундамента Сибирской платформы и последовательность формирования континентальной коры // *Геотектоника*. 1978. № 1. С. 43–58].
- Goltsman F.M., 1971. Statistical Models of Interpretation. Nauka, Moscow, 213 p. (in Russian) [Гольцман Ф.М. Статистические модели интерпретации. М.: Наука, 1971. 213 с.].
- Goltsman F.M., 1998. Issues of Statistical Analysis of Measurements. Textbook. Publishing House of St. Petersburg State University, St. Petersburg, 40 p. (in Russian) [Гольцман Ф.М. Вопросы статистической обработки измерений. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ, 1998. 40 с.].

- Goshko E. Yu., Markov V.M., Strazhnikova I.N. et al., 2008. Patent for Invention No. 2324205 – Seismic Data Processing Method. The RF State Register of Inventions, 10 May 2008 (in Russian) [Гошко Е.Ю., Марков В.М., Стражникова И.Н. и др. Патент на изобретение № 2324205 «Способ обработки сейсмических данных». Государственный реестр изобретений РФ, 10.05.2008].
- Goshko E.Yu., Sal'nikov A.S., Migurskij A.V., 2011. Frequency-dependent energy analysis of CDP seismic sections for geological interpretation. *Geofizika (Geophysics)* (1), 32–39 (in Russian) [Гошко Е.Ю., Сальников А.С., Мигурский А.В. Частотно-зависимый энергетический анализ глубинных сейсмических разрезов МОГТ для геологической интерпретации // *Геофизика*. 2011. № 1. С. 32–39].
- Kravchenko A.A., Smelov A.P., Berezkin V.I., Dobretsov V.N., 2009. Effect of the magma mixing processes on the composition and ore potential of the Medvedevsk Complex metabasites, the Aldan Shield. *Otechestvennaya geologiya* (5), 56–65 (in Russian) [Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И., Добрецов В.Н. Влияние процессов взаимодействия магм на состав и рудоносность метабазитов медведевского комплекса (Алдано-Становой щит) // *Отечественная геология*. 2009. № 5. С. 33–43].
- Nokleberg W.J., Parfenov L.M., Monger J.W. Norton I.O., Khanchuk A.I., Stone D.B., Scotese C.R., Scholl D.W., Fujita K., 2000. Phanerozoic Tectonic Evolution of the Circum-North Pacific. USGS Professional Paper 1626. U.S. Department of the Interior, 122 p.
- Parfenov L.M., Kuz'min M.I. (Eds.), 2001. Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia). МАИК Nauka/Interperiodika, Moscow, 571 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Отв. ред. Л.М. Парфёнов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.].
- Rosen O.M., 2003. The Siberian craton: tectonic zonation and stages of evolution. *Geotectonics* 37 (3), 175–192.
- Smelov A.P., Kravchenko A.A., Berezkin V.I., Dobretsov V.N., 2007. Geology and geochemistry of Precambrian mafic and ultrabasic complexes of the central part of the Aldan shield and lower crustal xenoliths. *Otechestvennaya geologiya* (5), 53–61 (in Russian) [Смелов А.П., Кравченко А.А., Березкин В.И., Добрецов В.Н. Геология и геохимия докембрийских базит-ультрабазитовых комплексов центральной части Алданского щита и нижнекоровых ксенолитов // *Отечественная геология*. 2007. № 5. С. 53–61].
- Smelov A.P., Timofeev V.F., 2003. The terrain analysis and the geodynamical model of the North Asian craton in Early Precambrian. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* 22 (6), 42–54 (in Russian) [Смелов А.П., Тимофеев В.Ф. Террейновый анализ и геодинамическая модель формирования Северо-Азиатского кратона в раннем докембрии // *Тихоокеанская геология*. 2003. Т. 22. № 6. С. 42–54].



Гошко Елена Юрьевна, канд. техн. наук, с.н.с.

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья
630091, Новосибирск, Красный пр., 67, Россия
Тел.: +007 (383) 230-04-98; ✉ e-mail: goshco@mail.ru

Goshko, Elena Yu., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources
67 Krasny Prospect, Novosibirsk 630091, Russia
Tel.: +007 (383) 230-04-98; ✉ e-mail: goshco@mail.ru



Ефимов Аркадий Сергеевич, генеральный директор
Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья
630091, Новосибирск, Красный пр., 67, Россия
Тел./факс: +007 (383) 221-49-47; e-mail: geology@sniiggims.ru

Efimov, Arkadiy S., Director-General
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources
67 Krasny Prospect, Novosibirsk 630091, Russia
Tel./fax.: +007 (383) 221-49-47; e-mail: geology@sniiggims.ru



Сальников Александр Сергеевич, докт. геол.мин. наук, зав. отделом сейсморазведки
Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья
630091, Новосибирск, Красный пр., 67, Россия
Тел./факс: +007 (383) 222-62-13; e-mail: assalnikov@mail.ru

Sal'nikov, Alexander S., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of department of exploration seismology
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources
67 Krasny Prospect, Novosibirsk 630091, Russia
Tel./Fax: +007 (383) 222-62-13; e-mail: assalnikov@mail.ru