

УДК 549.903.55

В.Б. Пийп¹, Л.Р. Цыдыпова², В.Р. Мелихов³, А.А. Ахметов⁴

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В СООТВЕТСТВИИ С НОВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРОШЛЫХ ЛЕТ В РЕГИОНЕ НОРИЛЬСКОГО МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сейсмические региональные работы в районе Норильского медно-никелевого месторождения проведены методом преломленных волн (МПВ) в 80-х гг. прошлого века. Эти материалы использованы в качестве исходных данных для получения новой информации об исследуемом районе. Выполнены обработка и интерпретация данных методом однородных функций по 8 профилям общей протяженностью около 2900 км.

На основе полученных сейсмических разрезов построены горизонтальные карты-срезы, которые показывают положение структур в пространстве и дают объемное изображение выступа фундамента. Сейсмические разрезы глубиной 10–20 км и горизонтальные карты-срезы содержат информацию о границах раздела, отображают объемное внутреннее строение осадочных толщ и фундамента, показывают разломы.

Ключевые слова: Норильское медно-никелевое месторождение, сейсмические преломленные волны, метод однородных функций, МПВ.

The area regional seismic works in the region of Norilsk copper-nickel field were fulfilled by the method of refracted waves in the 80's. These materials were used as input data to obtain new information about the investigated area. Processing and interpretation of the data were carried out by homogeneous function method along 8 profiles with a total length of about 2900 km. The horizontal map-slices and volumetric imaging of surface of basement, which gives the position of structures in space, is constructed on the basis of the 2D new seismic cross-sections. The seismic cross-sections with depth of 10–20 km and horizontal map-slices contain interfaces, reflect the volumetric internal structure of sedimentary strata and basement and also give the position of faults.

Key words: the Norilsk copper-nickel field, refracted wave method, the method of homogeneous functions.

Введение. Геолого-разведочный процесс, начиная с поиска и разведки полезных ископаемых и заканчивая экономической оценкой месторождения, трудоемок и затратен, поэтому многие производственные компании стараются оптимизировать процесс разведки. Обработка и переинтерпретация сейсмических данных прошлых лет — экономически обоснованное решение, которое дает дополнительную информацию о геологическом строении региона. Учитывая новые знания, можно корректировать будущие дорогостоящие геофизические работы.

Работа проводилась по заказу Норильского горно-металлургического комбината сотрудниками геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Интерпретированы материалы по 8 сейсмическим профилям, расположенным в районе Норильского медно-никелевого месторождения (рис. 1). Обработка годографов волн выполнена методом однородных функций.

Геологическое строение района работ. В составе осадочного разреза в Норильском районе и на смежных территориях выделяются следующие комплексы, отражающие основные этапы его геологической истории [Голодковская и др., 1977; Геолого-геохимические..., 1989; Мишин и др., 2003]: 1) терригенный чехол молодых наложенных плит и прогибов (J–K; мощность до 7 км); 2) вулканогенно-терригенные образования депрессий или основания молодых плит (P_2-T_{1-3} ; мощность до 7 км); 3) туфо-базальтовые образования трапповых впадин (P_2-T_{1-2} ; мощность до 3 км); 4) терригенно-угленосные породы основания трапповых впадин (C_2-P_2 ; мощность до 2 км).

Нижняя половина осадочного чехла представлена двумя породными комплексами: а) карбонатно-(галогенно)-терригенные породы внутреннего поля и краевых прогибов этапа зрелой платформы (PZ_{1-2} ; мощность до 6 км); б) карбонатно(вулканогенно?)-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, вед. науч. с.; *e-mail:* piip@list.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; *e-mail:* laraMGU@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических исследований земной коры, профессор; *e-mail:* melikhov@geophys.geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; *e-mail:* piip@list.ru

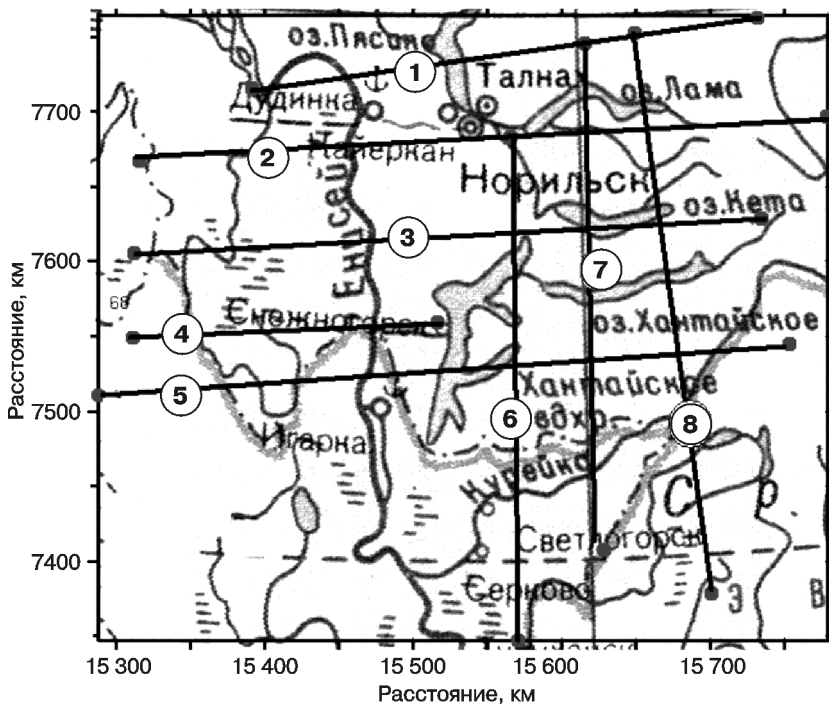


Рис. 1. Положение профилей ТЗ-МПВ, выполненных в 80-е гг. прошлого века: 1 — Соленая—Аян, 2 — Варнгяха—Аян; 3 — Мал. Хета—Кета; 4 — Бол. Хета—Хантайское вдхр.; 5 — Русская—Эндэ; 6 — Рыбная—Северная; 7 — Микчангда—Деген; 8 — Ерачимо—Микчангда

терригенные породы перикратонных прогибов и внутреннего поля плит этапа молодой платформы (Rf-V; мощность до 8 км). Кристаллический фундамент имеет блоковый рельеф.

В осадочном чехле амплитуда межблоковых перемещений постепенно уменьшается и на дневной поверхности редко достигает нескольких сотен метров. Нижняя половина осадочного чехла (рифейские слои) выравнивает рельеф кристаллического фундамента, вышележащие палеозойские слои имеют спокойную платформенную структуру. Наиболее яркая особен-

ность строения консолидированной коры в центральной части Норильского рудного района (вкостр простираения его приповерхностных дислокаций) — ее клавишная структура.

Если сравнить систему пликативных дислокаций осадочного чехла с рельефом кровли и подошвы консолидированной коры, то можно сделать вывод об их согласном залегании. Общий схематический геологический разрез, характерный для рассматриваемой территории (рис. 2), приведен в работе [Геолого-геохимические..., 1989].

Площадь Норильского рудного района покрыта густой сетью профилей точечного зондирования (ТЗ) преломленными волнами, отработанных по методике, которая предложена в 60-е гг. прошлого века Н.Н. Пузыревым. Эта методика относится к малодетальным сейсмическим наблюдениям, ее применение рационально лишь в том случае, когда нужно проследить сложные структуры в средах с неоднородным строением скоростного поля. Положение изученных профилей ТЗ-МПВ, выполненных ранее на исследуемой территории, показано на рис. 1.

Методика исследований. Наблюдения точечные — непрерывные профильные исследования не проводились. Расстояние между пунктами взрыва в среднем составляло 20 км, между сейсмоприемниками — 2–10 км. Интерпретацию данных в прошлом проводили методом Н.Н. Пузырева [Пузырев и др., 1965]. Основная особенность этой интерпретации заключается в построении специальных временных полей — временных разрезов равных удалений. Такие временные поля — это годографы,

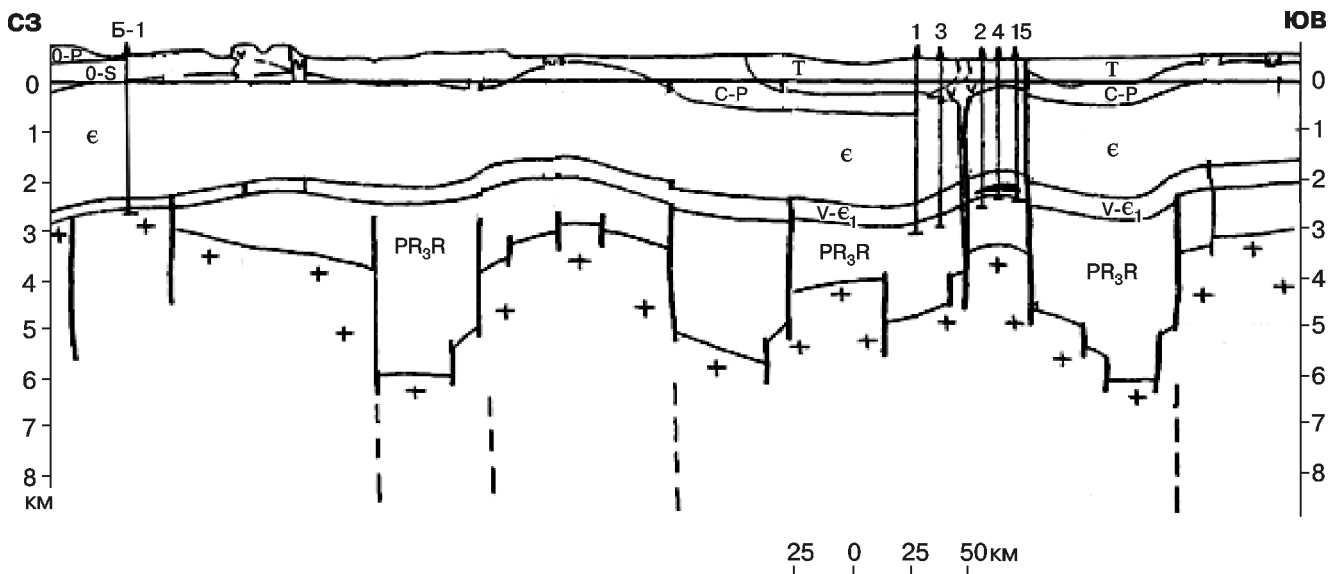


Рис. 2. Схематический геологический разрез в районе исследований, по [Геолого-геохимические..., 1989] с изменениями

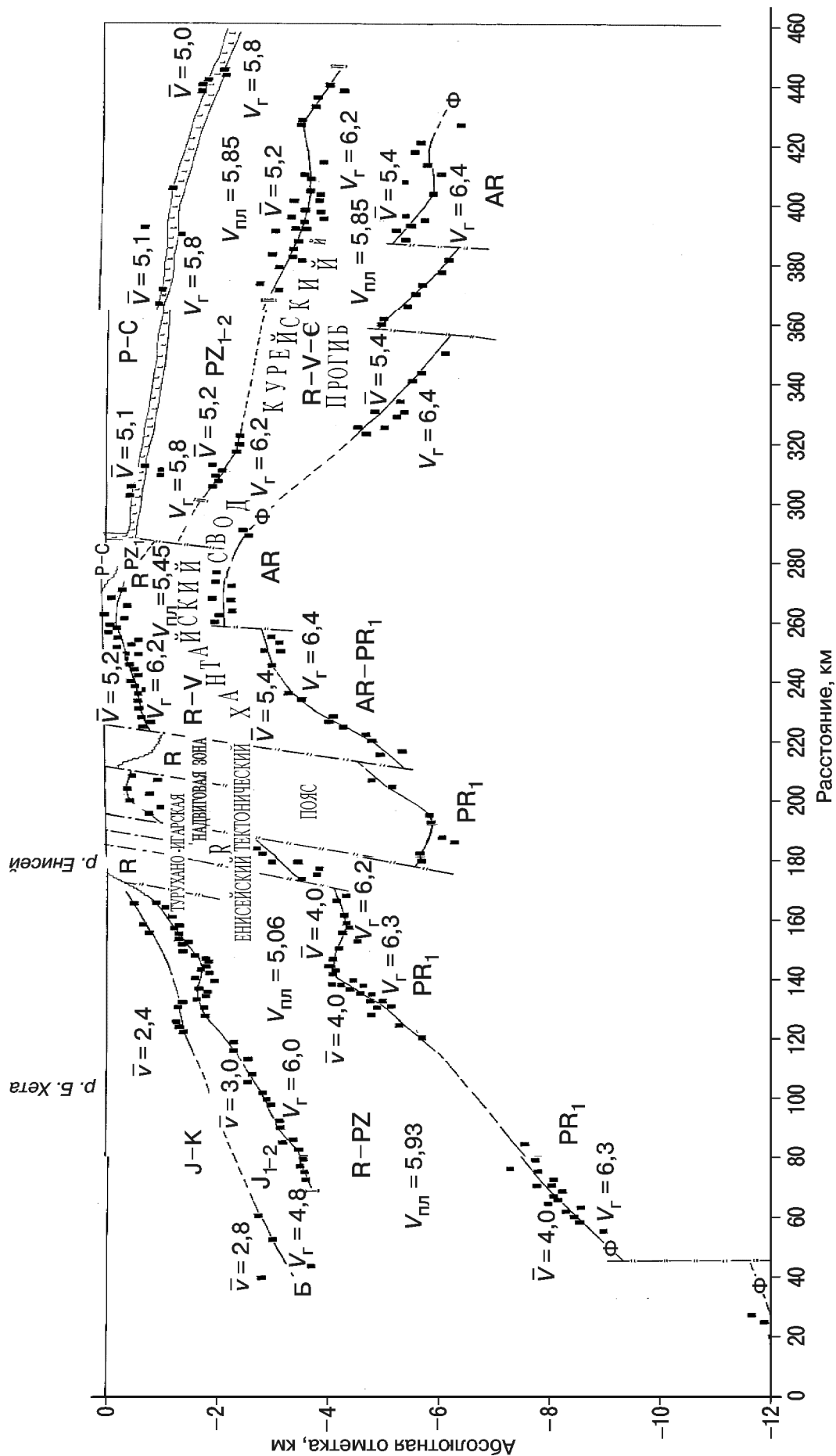


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез по профилю Русская—Эндэ по результатам исследований в 80-х гг. прошлого века. На разрезе показаны значения граничной (V_r) и средней ($V_{ср}$) скорости

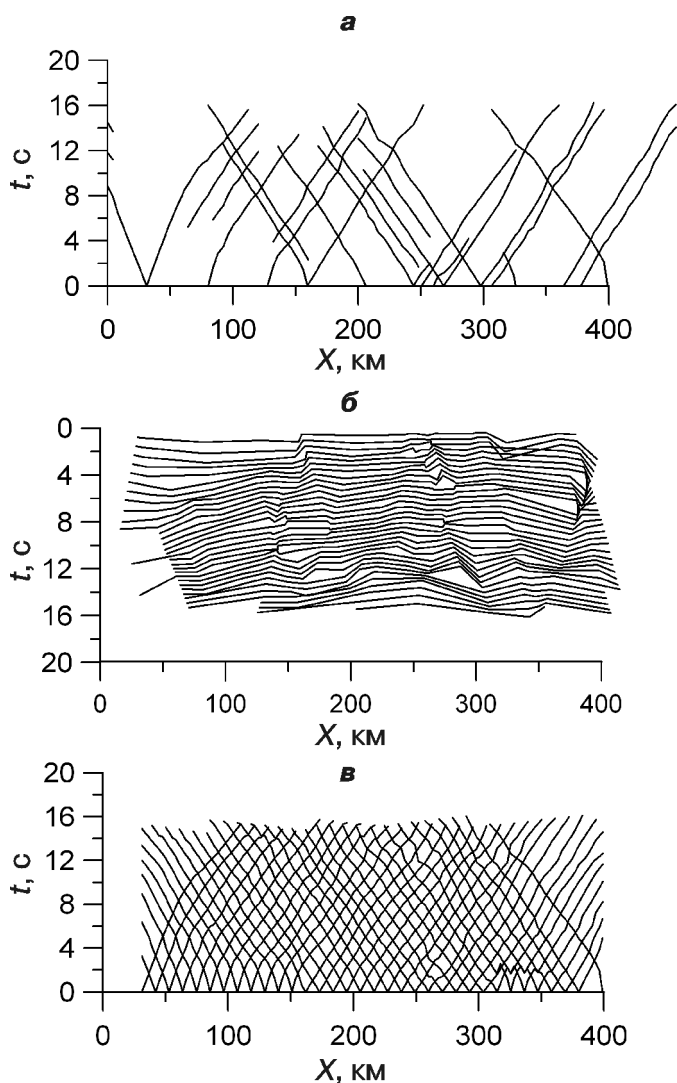


Рис. 4. Система наблюдаемых (а) и интерполированных (б) годографов преломленных волн по профилю Русская–Эндэ, а также наблюдаемый временной разрез офсетов (в)

построенные в специальных координатах X , T , где X — центр базы наблюдений (источник–приемник), T — время, измеренное на данной базе. Графически поле представляется в виде изолиний равных удалений (или офсетов). Использование таких полей позволяло увереннее разделять волны, относящиеся к разным границам раздела, интерполировать годографы и вычислять значения граничной скорости. Это очень важно для наблюдений с малой детальностью. Вычисление глубины границ и средних значений скорости в 80-е гг. прошлого века производили методом t_0 .

Пример разреза, полученного ранее по профилю Русская–Эндэ, показан на рис. 3. Фундамент образует выступ в центральной части профиля, перекрытый рифейскими отложениями. На разрезе показаны значения пластовой и граничной скорости, а также положение разломов. Новые автоматические технологии построения разрезов, использованные нами, позволяют избежать субъективности при их интерпретации. Тем не менее оказалось, что интерпрети-

рованные нами разрезы и разрезы, выполненные в прошлом, имеют общие черты.

Полевые наблюдения выполнены с помощью аппаратных комплексов «Черепашка-М» и «Тайга-2». Эти станции используются для регистрации волн от землетрясений. В данном случае они регистрировали сейсмические волны от взрывов.

Программный пакет ГОДОГРАФ для интерпретации систем годографов преломленных волн. Годографы преломленных волн, зарегистрированные при работах МПВ в 80-е гг. прошлого века, были переинтерпретированы методом однородных функций [Пийп, 1991; Piiр, 2001]. ГОДОГРАФ — универсальная программа для интерпретации любых систем годографов преломленных волн в сложных средах методом однородных функций. Процесс интерпретации полностью автоматизирован. В качестве исходных данных можно использовать материалы как малоуглубинной сейсморазведки, так и годографы, полученные в результате применения глубинных методов исследования. На годографах преломленных волн не требуется выделять участки, связанные с различными границами преломления, это выполняется автоматически.

Программа работает для любой системы годографов: от крайнего случая двух встречных годографов до случая, когда приемники и источники расположены на профиле произвольным образом. Она позволяет получать скоростные разрезы, горизонтальные глубинные карты-срезы, криволинейные поверхности (например, рельеф границ раздела), разрезы распределения физических параметров. На скоростных разрезах автоматически выделяются границы раздела 1-го (скорость изменяется скачком) или 2-го рода (изменяется градиент скорости). Автоматически вычисляются и глубина до кровли волноводов при достаточном количестве наблюдений.

Геологическую интерпретацию готовых скоростных разрезов и глубинных карт-срезов выполняет непосредственно интерпретатор. Сейсмический разрез представляет собой скоростное поле в изолиниях, где значения скорости определены в узлах прямоугольной сетки.

Программа позволяет интерполировать систему наблюдений путем добавления годографов между источниками волн (пунктами взрыва) и получать разрезы для профилей, где наблюдений мало.

Алгоритм программы ГОДОГРАФ основан на методе двумерного обращения годографов преломленных волн с использованием однородных функций. Метод основан на локальной аппроксимации реальных скоростных полей однородными функциями двух координат. Скоростные разрезы представляются в виде сеточной модели, что позволяет использовать современные компьютерные методы при визуализации и интерпретации этих разрезов.

Метод однородных функций — метод автоматической интерпретации самых сложных данных в исследованиях двумерно-неоднородных сред, для

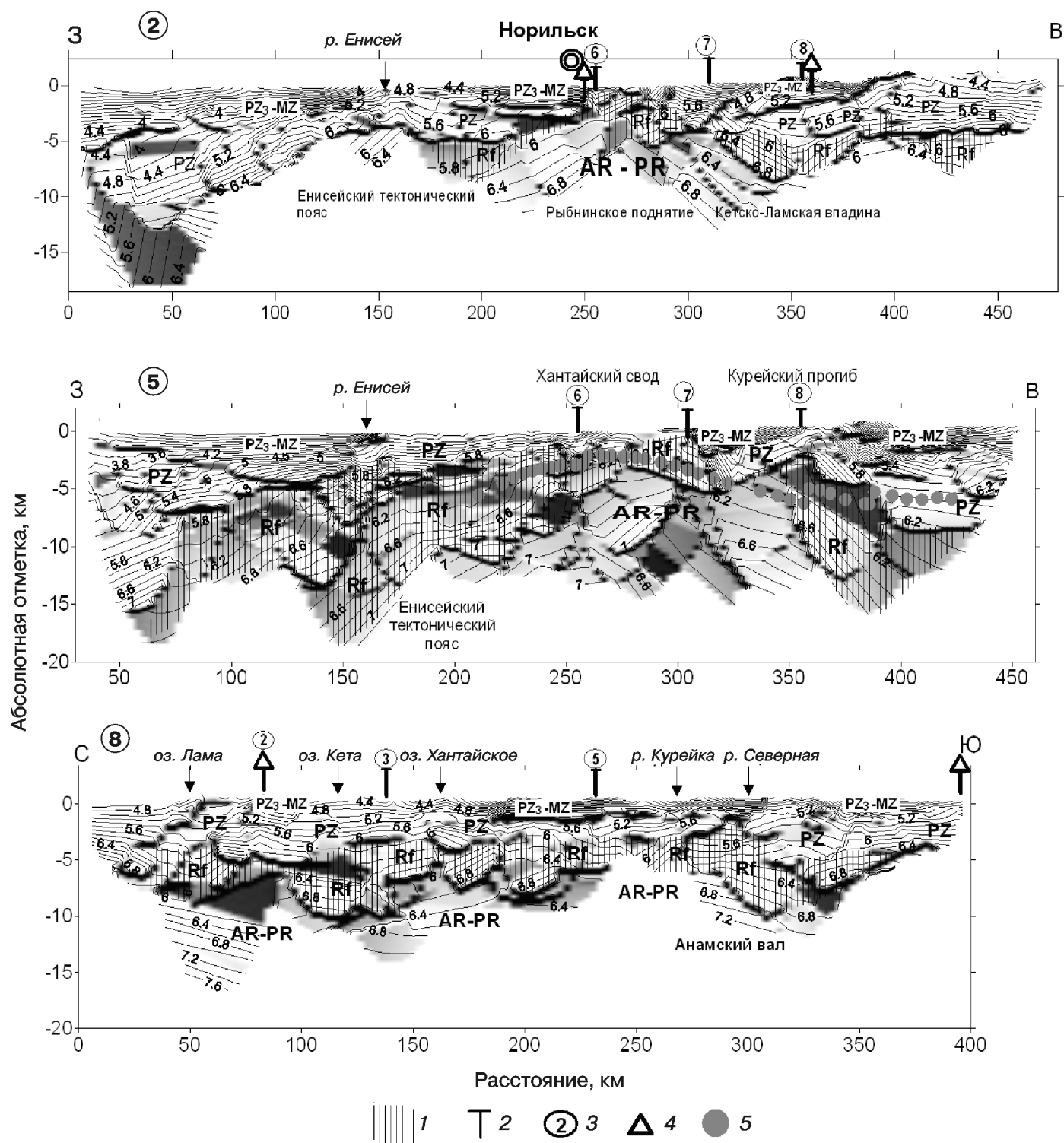


Рис. 5. Новые сейсмогеологические разрезы по некоторым профилям в районе исследования: Варнгэяха–Аян (2), Русская–Эндэ (5), Ерачимо–Микчангда (8). Сечение изолиний скорости 0,2 км/с: 1 – рифейские отложения; 2 – пересечение с профилем; 3 – номер профиля на рис. 1; 4 – скважина; 5 – кровля фундамента по данным предыдущей интерпретации по профилю Русская–Эндэ

применения этого метода обращения не требуется начальная модель.

Отметим, что для реальных геологических сред удобна аппроксимация разрезов однородными функциями. Такие функции составляют широкий класс многомерных функций, когда скорость может иметь значительные вертикальный и горизонтальный

градиенты. Сейсмическая модель, которая описывается однородной функцией, может также включать прямолинейные сейсмические границы (линии разрыва функции или ее градиента). Полный разрез строится из множества однородных функций, каждая из которых отвечает паре встречных наблюдаемых годографов.

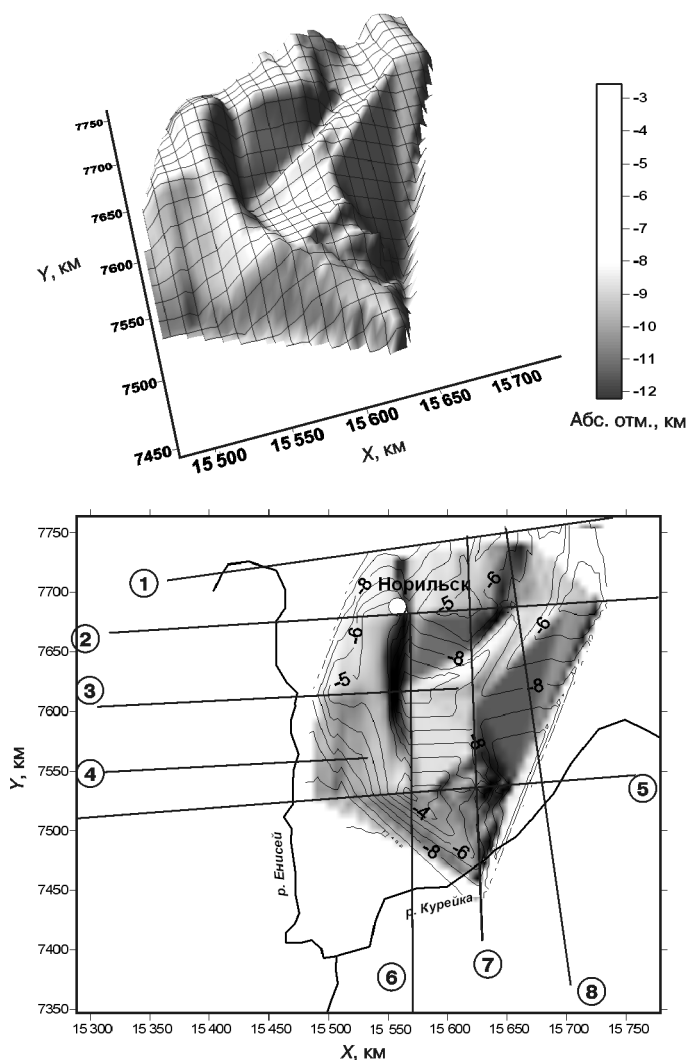


Рис. 6. Объемное изображение рельефа кровли выступа кристаллического фундамента в регионе исследования (вверху). Изолинии абсолютных отметок кровли фундамента проведены через 1 км. В кружках — номера профилей

Новая интерпретация сейсмических данных. На основе указанной автоматической технологии обработаны годографы по 8 профилям. Положение профилей приведено на рис. 1. Профили образуют почти равномерную прямоугольную сеть с шагом 50–70 км.

Сейсмические годографы (временной разрез равных удалений), полученные по данным М.В. Дмитриева, Ю.Г. Зайцева (1988), были оцифрованы и использованы для построения новых разрезов. Пример наблюдаемых годографов преломленных волн, зарегистрированных вдоль профиля Русская–Эндэ (5), показан на рис. 4, а. Временной разрез равных удалений представлен на рис. 4, б. Этот разрез использован для интерполяции между годографами [Piip, 2001].

Интерполированные годографы для этого профиля показаны на рис. 4, в. При вычислении временного разреза использованы интерполированные годографы. В отношении точек взрывов годографы интерполированы равномерно с шагом 12,5 км.

На новых автоматически вычисленных сейсмических разрезах (рис. 5) по профилям снизу вверх выделены четыре следующие толщи:

1) кристаллический фундамент (AR–PR), скорость от 5,8 до 7,2 км/с, градиент относительно низкий;

2) слой рифейских отложений (заштрихованный на рис. 5 и обозначенный на разрезах как Rf), скорость от 5,8 до 7,2 км/с, градиент скорости имеет средние значения;

3) слой палеозойских отложений (PZ), скорость от 4,8 до 6,6 км/с, градиент скорости повышен;

4) верхнепалеозойские–мезозойские отложения (Pz₃–MZ), скорость от 2 до 5 км/с, градиент скорости отличается высокими значениями.

Возраст слоев в нашей интерпретации указан приблизительный (условно). Скорость в одноименных толщах на разных профилях может изменяться в незначительных пределах. Все указанные толщи четко разделены на разрезах сейсмическими инверсионными границами (выше границы скорость больше, чем в кровле нижележащего слоя). Эти толщи отличаются величиной скоростного градиента — преобладающим расстоянием между изолиниями скорости.

Новые разрезы непрерывные в том смысле, что значения скорости рассчитаны для каждой точки разреза. Выделенные слои имеют внутреннюю структуру, которая характеризуется полем изолиний скорости. Наименее уверенно на разрезах выделен слой, обозначенный как Pz₃–MZ, вследствие того что регистрация волн начиналась на некотором расстоянии от пункта взрыва.

Разрезы по профилям субширотного направления имеют сходства. Самый глубокий слой на всех разрезах — *кристаллический фундамент*. На субширотных профилях фундамент виден как выступ в центральной нижней части разреза на абсолютных отметках от 13 до 3 км (рис. 5, профили Варнгэяха–Аян (2) и Русская–Эндэ (5)).

Фундамент на разрезах имеет сложный блоковый характер, разбит разломами и характеризуется относительно низким градиентом скорости (скорость изменяется от 5,8 до 7,2 км/с). Верхняя граница фундамента на широтных профилях имеет М-образную форму с разломами в центре (рис. 5, вверху и в центре). Норильское месторождение, расположенное вблизи профиля Варнгэяха–Аян (2), приурочено к глубокому разлому в фундаменте, этот разлом прослеживается до поверхности [Пийп и др., 2009].

Выше на разрезах прослежен *слой рифейских отложений*, облекающих структуры фундамента. Этот слой имеет выровненную поверхность к востоку от Енисея примерно на отметке –4 км и изрезанную подошву. Скорость в слое изменяется от 5,8 до 7,2 км/с, градиент скорости имеет средние значения. К западу от Енисея кровля рифейских отложений опускается до отметки –15 км под палеозойские отложения. Ри-

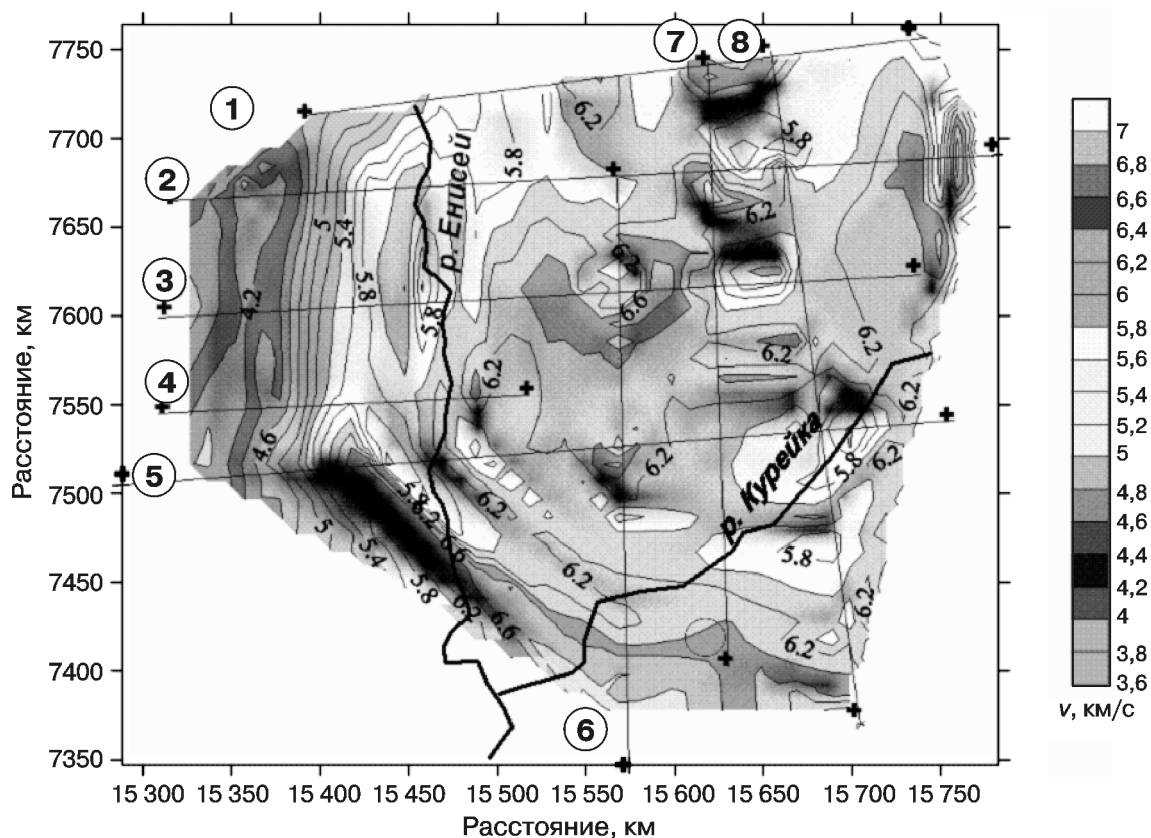


Рис. 7. Горизонтальная скоростная карта-срез на отметке -4 км. Сечение изолиний скорости $0,2$ км/с. В кружках — номера профилей

фейские отложения на субширотных профилях вдоль Норильско-Хараелахского разлома в районе пикетов 250–280 и 280–300 км поднимаются от фундамента к поверхности до отметки $-0,6$ км. Слои *палеозойских и верхнепалеозойских–мезозойских отложений* имеют относительно пологое залегание.

На разрез по профилю Русская–Эндэ (рис. 5, в центре) нанесены точки поверхности фундамента по данным предыдущей интерпретации. Они расположены несколько выше поверхности фундамента, вычисленной автоматически при новом подходе к интерпретации, кроме того, это по прежним данным нижняя граница в разрезе (рис. 3). Внутреннее строение фундамента методами более ранней интерпретации получить было невозможно.

Разрезы по профилям субмеридионального направления рассмотрим на примере разреза по профилю Ерачимо–Микчангда (рис. 5, внизу). Фундамент (AR–PR) прослеживается здесь в нижней части разреза. Его кровля имеет ступенчатый рельеф на абсолютной глубине от 10–12 до 5 км. Выше, до отметок $-3 \dots -5$ км выделены рифейские отложения. Они имеют четко выраженное блоковое строение: на профиле можно выделить 8 блоков. Поверхность рифейских отложений относительно ровная. Выше выделяется относительно малонарушенный слой палеозойских отложений со средними значениями градиента скорости. В северной части разреза вверху прослежен слой верхнепалеозойских–мезозойских

отложений с высокими значениями градиента скорости.

Объемное изображение *поверхности фундамента*, полученное по разрезам всех 8 профилей, приведено на рис. 6. Как и предполагалось по данным гравиметрии в [Геолого-геохимические..., 1989], фундамент имеет клавишную структуру. В центре области исследований на отметках $-3 \dots -5$ км прослежена поверхность фундамента, осложненная разветвленным разломом в центре. К этому разлому вблизи профиля Варнгэяха–Аян (2) приурочено Норильское медно-никелевое месторождение. Поверхность фундамента снижается уступами на восток до 10 км, на север и запад — до 9–10 км. Как видно на рис. 6, выступ фундамента на исследованной глубине прослеживается только в центральной части площади в междуречье Енисея и Курейки [Пийп и др., 2009].

Строение территории хорошо видно на *горизонтальной скоростной карте-срезе* на абсолютной отметке -4 км — вблизи кровли рифейских отложений (рис. 7). Центральная часть среза округлой формы с размером 300×300 км имеет почти постоянные значения скорости ($6,2$ км/с), характерные для поверхности рифейских отложений, это подтверждается тем, что кровля рифейских отложений здесь практически субгоризонтальна. Горизонтальная поверхность этих отложений находится в междуречье Енисея и Курейки.

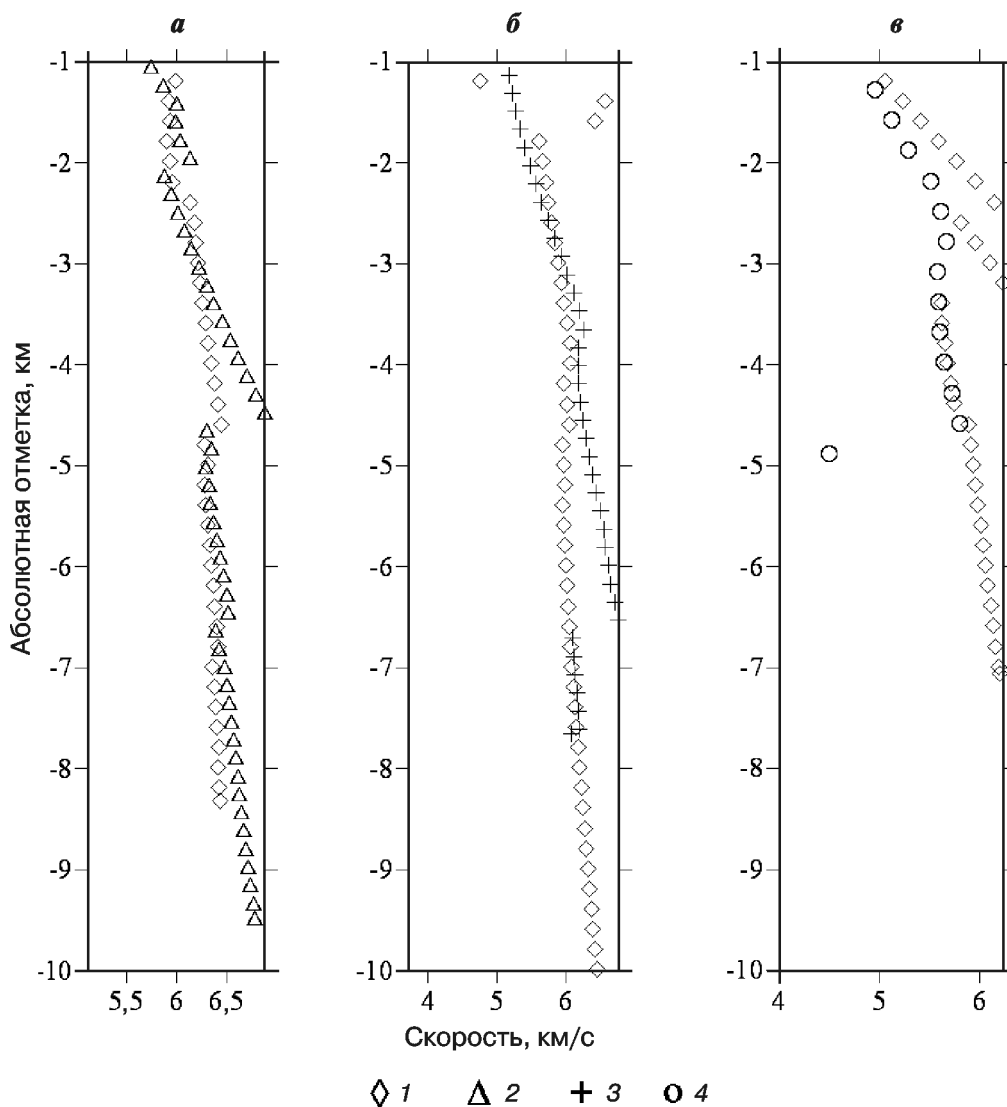


Рис. 8. Сравнение скоростных кривых (а, б, в) в точках пересечения профилей. Обозначения соответствующих профилей показаны на графиках: 1 — Русская—Эндэ, 2 — Рыбная—Северная, 3 — Микчангда—Деген, 4 — Ерачимо—Микчангда

Однако на карте-срезе видны места, где залегание кровли рифейских образований отклоняется от субгоризонтального, например, округлая структура на пересечении профилей Мал. Хета—Кета (3) и Рыбная—Северная (6). Здесь прослежены значения скорости до 6,8 км/с, это означает подъем рифейских отложений к поверхности, так как скорость в этом слое с глубиной увеличивается монотонно (рис. 5). Кроме того, на относительно ровной поверхности среза в восточной части профиля выявлены четыре округлые изометричные зоны с пониженными значениями скорости — от 6,2 до 5,6–5,4 км/с («провалы») размером около 50×50 км. Положение этих зон примерно совпадает с положением крупных озер Лама, Кета, Дюпкун и Агата. Возможно, это свидетельствует о том, что озера существовали здесь в дорифейское время. Отметим, что субгоризонтальная часть поверхности рифейских отложений в среднем совпадает с выступом кристаллического фундамента (рис. 6).

К западу от Енисея и южнее р. Курейка кровля рифейских отложений понижается, срез попадает в область развития палеозойских и мезозойских отложений, о чем можно судить по значениям скорости, которая здесь изменяется от 5,8 до 4,5 км/с.

Достоверность разрезов, вычисленных автоматически и независимо, подтверждается степенью совпадения вертикальных скоростных графиков в точках пересечения профилей. Так, на рис. 8 видно, что полученные разрезы хорошо увязываются и что наиболее точно разрезы вычислены для глубины от 3 до 10 км.

Заключение. В результате переинтерпретации наблюдений прошлых лет выполнено объемное изображение кровли выступа фундамента на отметках от –11 до –2,5 км, который занимает пространство в междуречье Енисея и Курейки и имеет сложное клавишное строение. Выступ фундамента характеризуется разломным, блоковым внутренним строением. Норильское медно-никелевое месторождение

приурочено к глубинному разлому, прорезающему выступ фундамента.

Рифейские отложения облекают выступ фундамента. Горизонтальная скоростная карта-срез на глубине –4 км показывает субгоризонтальную форму кровли рифейских отложений и положение четырех изометричных низкоскоростных зон, которые совпадают с крупными озерами в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геолого-геохимические условия формирования нефтегазовых месторождений в древних толщах Восточной Сибири / Ред. Б.А. Соколов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 191 с.

Голодковская Г.А., Демидюк Л.М., Шаумян Л.В. Инженерная геология Талнахских месторождений: проблемы, методика, опыт исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1977. № 5. С. 101–116.

Мишин Н.И., Панфилов А.Л., Степина З.А. Структурные критерии глубинности формирования нефтяных и рудных месторождений в земной коре в сопоставлении с геофизическими данными // Геофизика XXI столетия: 2002 год: Сб. тр. Четвертых геофизических чтений имени В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2003. С. 324–329.

Новый метод интерпретации позволяет автоматически получать и изучать внутреннюю неоднородную структуру слоев, положение разломов, фациальную изменчивость осадочных слоев, внутреннее строение фундамента и строить трехмерные изображения геологических объектов.

Пийп В.Б. Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.

Пийп В.Б., Мелихов В.Р., Цыдытова Л.Р., Ахметов А.А. Строение древних толщ на северо-западе Сибирской платформы по данным переобработки сейсмических материалов 80-х годов // II EAGE/EAGO/SEG Intern. Geosci. Conf.&Exhibition Tyumen, Russia, 2–5 March, 2009 (CD).

Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Потапьев С.В. Точечные сейсмические зондирования // Методика сейсморазведки. М.: Наука, 1965. С. 9–70.

Piip V.B. 2D inversion of refraction traveltimes using homogeneous functions // Geophys. prosp. 2001. Vol. 49. P. 461–482.

Поступила в редакцию
06.09.2011