

УДК 551.243.+551.2

Миркин Е.Л., Багманова Н.Х.
Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы использования регрессионной математической плотностной модели Алейникова, Немзорова и Халевина как в качестве основы для создания программного продукта построения трехмерной плотностной модели земной коры. Также для создания программного продукта построения трехмерной плотностной модели земной коры рассмотрены вопросы использования комбинации модели Адамса–Вильямсона и модели Алейникова, Немзорова, Халевина. Получена трехмерная плотностная модель земной коры Тянь-Шаня для различных случаев. Приведены примеры вертикальных плотностных разрезов некоторых характерных профилей.

Ключевые слова: Плотностная модель, земная кора, регрессионная модель, триангуляция, неоднородность, трехмерная скоростная модель, Тянь-Шань.

ТЕОРЕТИКАЛЫК-ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК РЕГРЕССИОНДУК МОДЕЛДЕРДИН НЕГИЗИНДЕ ЭСЕПТӨӨ ПРОГРАММАСЫНЫН КОМПЛЕКСИН ИШТЕП ЧЫГУУ ЖАНА ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН ҮЧ ӨЛЧӨМДҮҮ ТЫГЫЗДЫК МОДЕЛИН ТҮЗҮҮ

Кыскача мазмуну: Макалада Алейниковдун, Немзоровдун жана Халевинактын регрессиялык математикалык тыгыздык моделин жер кыртышынын үч өлчөмдүү тыгыздык моделин тургузуунун программалык продуктысын түзүү үчүн колдонуу маселелери каралган. Ошондой эле жер кыртышынын үч өлчөмдүү тыгыздык моделин түзүүчү программалык продуктту түзүү үчүн Адамс-Вильямсон модели менен бирге Алейниковдун, Немзоровдун жана Халевинактын моделин колдонуунун жолдору каралган. Тянь-Шандын жер кыртышынын үч өлчөмдүү тыгыздык модели ар кандай учурлар үчүн алынган. Айрым мүнөздүү профилдердин вертикалдуу тыгыздык кесиктиктеринин мисалдары келтирилген.

Негизги сөздөр: Жогорку бет модели, жер кыртышы, регрессиялык модель, триангуляция, бир кылка эместик, үч өлчөмдүү ылдамдык модели, Тянь-Шань.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR CALCULATION AND CONSTRUCTION OF THE THREE-DIMENSIONAL DENSITY MODEL OF THE EARTH'S CRUST ON BASE OF THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL REGRESSION MODELS

Abstract: In the paper the problems of adaptation of mathematical model of Aleynikov, Nemzorov, Khalevin for its use as a basis for creation of software product for construction of three-dimensional model of earth crust density are considered. Also the problems of combination of models of Adams-Williamson and Aleynikov et al. use are considered.

As a result this one for Tian Shan region was received. Examples of vertical density sections of some typical profiles are presented.

Keywords: density model, the earth's crust, the regression model, triangulation, heterogeneity, three-dimensional velocity model, the Tien Shan.

Существуют различные методы построения плотностных моделей земной коры, среди которых выделяются:

- упрощенные – построенные на основе упрощенных однородных моделей глубинного строения земли [4, 5];
- модели, построенные на основе обработки эмпирических данных о глубинном строении Земли конкретных географических областей [2, 6 – 8];
- реальные модели внутреннего строения Земли, использующие всю имеющуюся геофизическую информацию, связанную расчетными формулами фундаментальных физических зависимостей [3, 4].

Среди реальных моделей внутреннего строения Земли, наиболее обще-объясняющим распределение плотности вещества земной субстанции в зависимости от глубины и особенностей скоростной модели распределения объемных продольных поперечных сейсмологических волн, является широко известная в литературе модель американских геофизиков Адамса и Вильямсона [1]. В работе [2] данная модель была использована в качестве основы для создания программного продукта построения трехмерной плотностной модели земной коры. Однако анализ полученных в [2] плотностных разрезах некоторых характерных профилей позволяет сделать вывод, что использование модели Адамса и Вильямсона выявляют лишь некоторые черты плотностных неоднородностей в различных участках литосферы Тянь-Шаня. Для выявления более детальных неоднородностей плотностного строения литосферы Тянь-Шаня в данной статье предлагается дифференцировать плотность на нулевой глубине, используя регрессионную плотностную модель состава земной коры [1], построенную на основе обработки экспериментальных данных. Кроме того, плотностная регрессионная модель Алейникова, Немзорова и Халевина [1] будет использована в данной статье в качестве основы для создания программного продукта при построении трехмерной плотностной модели земной коры литосферы Тянь-Шаня. Необходимая для дальнейших исследований трехмерная модель скоростных полей продольных P – волн и поперечных S – волн была получена на базе трехмерной триангуляции скоростной модели литосферы Тянь-Шаня [9]. Комплекс программ позволяет восстановить значение скоростей продольных P –волн и поперечных S – волн в любой заданной точке трехмерного пространства изучаемого фрагмента «массива земной коры».

Регрессионная модель Алейникова, Немзорова и Халевина

Наряду с плотностными моделями внутреннего строения земли, полученными на основе физических законов, существует ряд теоретико-экспериментальных моделей оценки плотности, пористости и состава пород. Эти модели являются регрессионными, построенными по скоростям продольных v_p и поперечных v_s сейсмологических волн на основе экспериментальных исследований. К настоящему времени проведено большое количество теоретических, лабораторных и полевых исследований, результатами которых явилось установление корреляционной зависимости плотности различных горных пород с их скоростными неоднородностями. Рассмотрим регрессионную плотностную модель Алейникова, Немзорова и Халевина [1].

Авторами данной модели было получено уравнение регрессии на основе множественной корреляции параметров плотности $-\rho$ и величин v_p , v_s , представленное в следующем виде:

$$\rho = -0.107(v_p) - 0.0537(v_s) + 0.0026(v_p v_s) + 0.0463(\Phi) + 2.66, \quad (1)$$

где Φ – сейсмический параметр, определяемый выражением:

$$\Phi = v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2 \quad (2)$$

При этом стандартная погрешность δ при определении плотности по этой формуле составила 0.032 г/см^3 , а коэффициент множественной корреляции $R = 0.975$ [1].

Проверка зависимости (1) осуществлена на основе лабораторных экспериментов с горными породами Урала и Центрального Казахстана. В общей сложности авторами модели было проведено 2000 независимых определений ρ, v_p, v_s с привлечением данных из литературных источников [1, 6, 7]. По мнению авторов, эта модель (1) хорошо работает на интервале плотностей $2.6 - 2.7 \text{ г/см}^3$ для кислых и средних пород. При определении плотности основных и ультраосновных литологических пород, авторы модели предлагают корректировать расчетную формулу следующей аддитивной поправкой:

$$\Delta\rho = 0.01(\Phi - 12) \quad (3)$$

Таким образом, окончательная расчетная регрессионная формула для расчета плотности ρ земной коры в условиях Кыргызского Тянь-Шаня, может иметь вид:

$$\rho_t = \begin{cases} \rho, & \text{если } l \leq 5 \text{ км;} \\ \rho + \Delta\rho, & \text{если } l > 5 \text{ км;} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь учтен тот факт, что на глубинах $l > 5 \text{ км}$, в основном, не встречаются водонасыщенные породы.

Построение плотностной модели земной коры

Регрессионная модель Алейникова, Немзорова и Халевина. Для построения плотностных неоднородностей вдоль разрезов земной коры по модели Алейникова, Немзорова и Халевина, будем использовать расчетные формулы (1 – 4). В качестве исходного массива данных была использована триангулированная трёхмерная матрица продольных и поперечных скоростей сейсмических волн v_p и v_s . Результаты работы комплекса программ проиллюстрированы на примере двух вертикальных профилей **1** и **2**, местоположение которых показано на рисунке 1, плотностные разрезы приведены на рисунках 2 и 3.

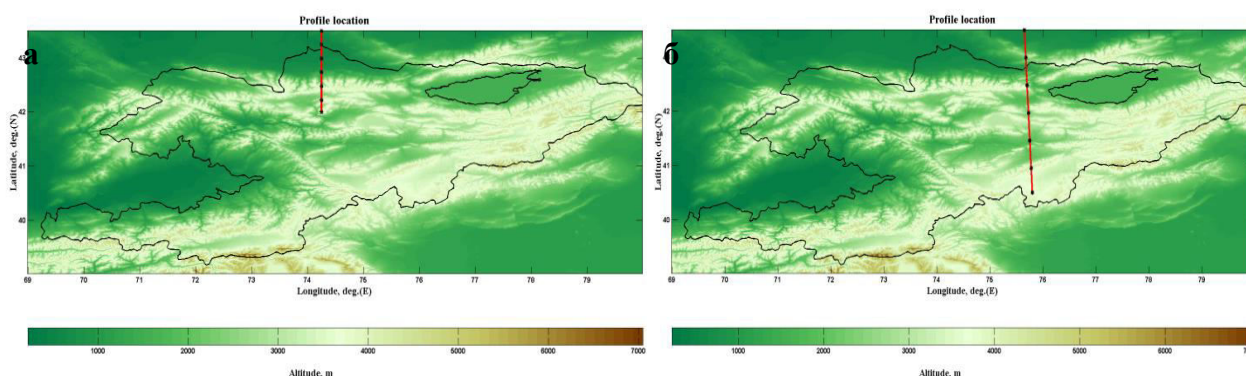


Рисунок 1. Локализация профилей **1** (а) и **2** (б) вертикальных плотностных разрезов.

Как видно из рисунка 2 (профиль 1), изолинии значений плотности носят монотонный характер до глубин 10 км, далее распределение изолиний значений плотностей носит сложный характер (особенно в слое 10 – 45 км). На профиле 2 (рисунок 3) распределение плотности также изменяется на протяжении всего разреза, как по глубине, так и вдоль его простираения. Отмечаются инверсионные зоны на различных глубинных уровнях.

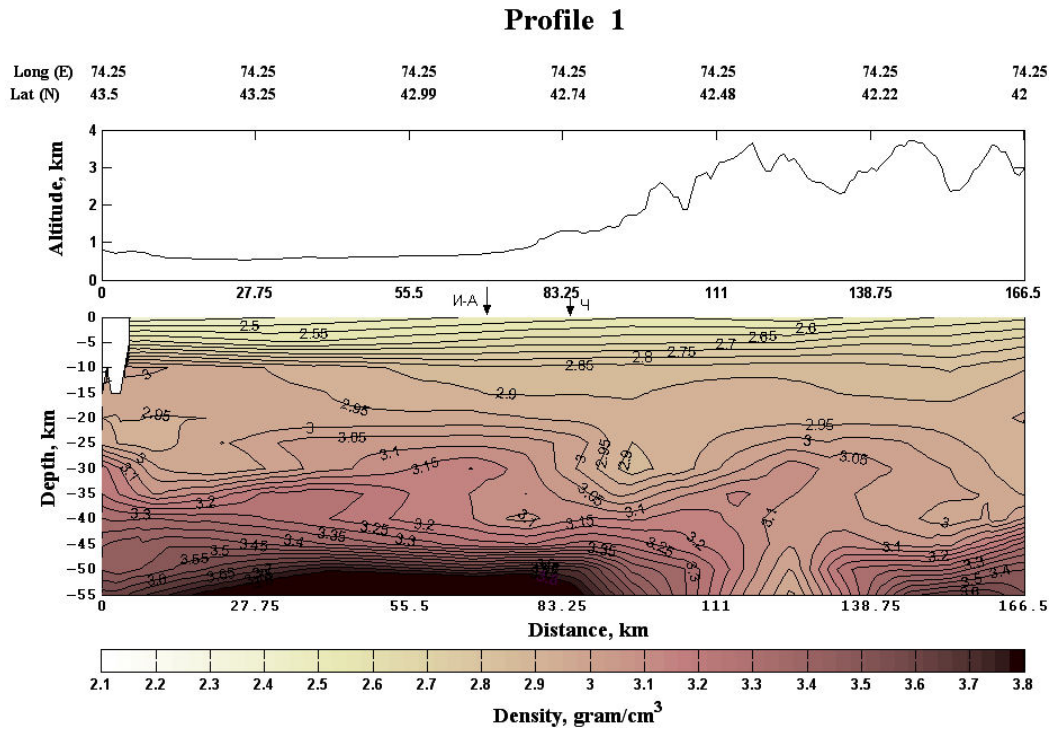


Рисунок 2. Плотностной разрез земной коры вдоль профиля 1 (модель Алейникова, Немзорова, Халевина).

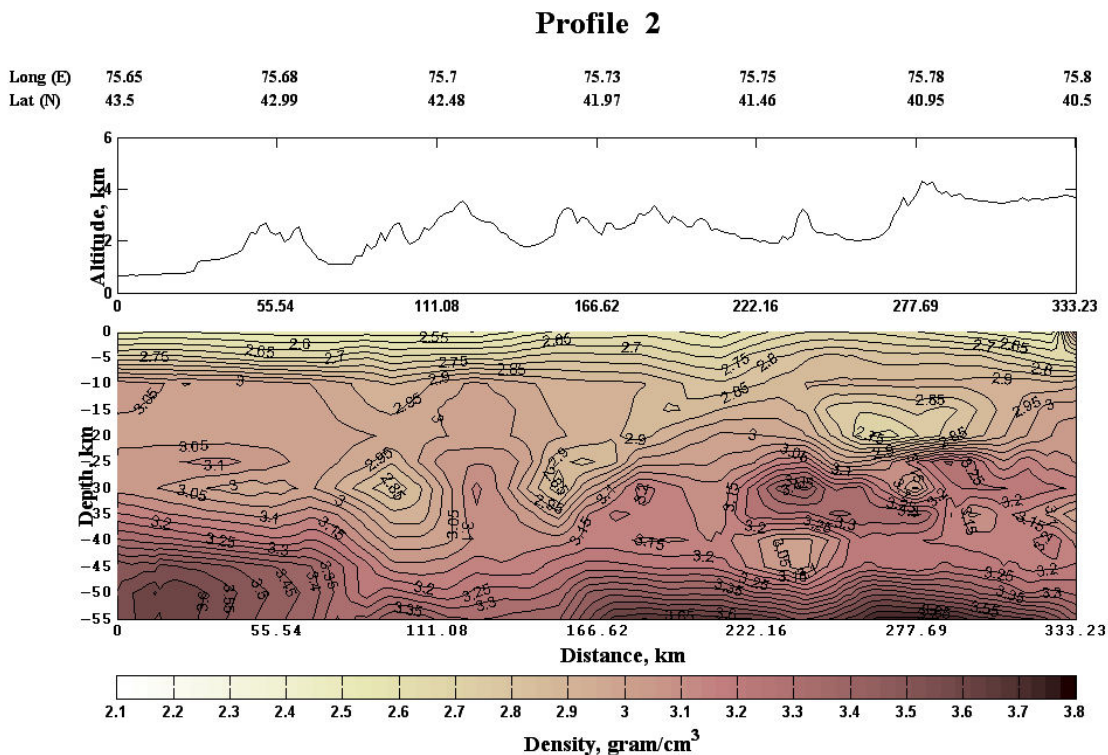


Рисунок 3. Плотностной разрез земной коры вдоль профиля 2 (модель Алейникова,

Немзорова, Халевина).

Таким образом, использование регрессионной модели Алейникова, Немзорова, Халевина дает возможность выявления плотностных неоднородностей в земной коре.

Комбинации двух моделей (Адамса–Вильямсона и Алейникова, Немзорова, Халевина)

При построении плотностных разрезов по модели Адамса и Вильямсона, в качестве начальной плотности на глубине 0 км была принята средняя плотность $\rho=2.8\text{г/см}^3$ [2]. Однако, это обобщение вносит искажение в плотностную картину разрезов [2], изображая лишь динамику изменения плотности среды с глубиной.

Для более точного изображения картины плотностной неоднородности, предлагается нулевой уровень (глубина 0 км) плотностей ρ просчитывать по модели Алейникова, Немзорова, Халевина (1 – 4), а затем добавлять приращения по плотности $\Delta\rho$ по модели Адамса и Вильямсона [2].

На рисунках 4, 5 представлены поперечные разрезы (профили 1, 2) плотностной характеристики земной коры, построенных по комбинации двух моделей: Алейникова, Немзорова, Халевина и Адамса-Вильямсона.

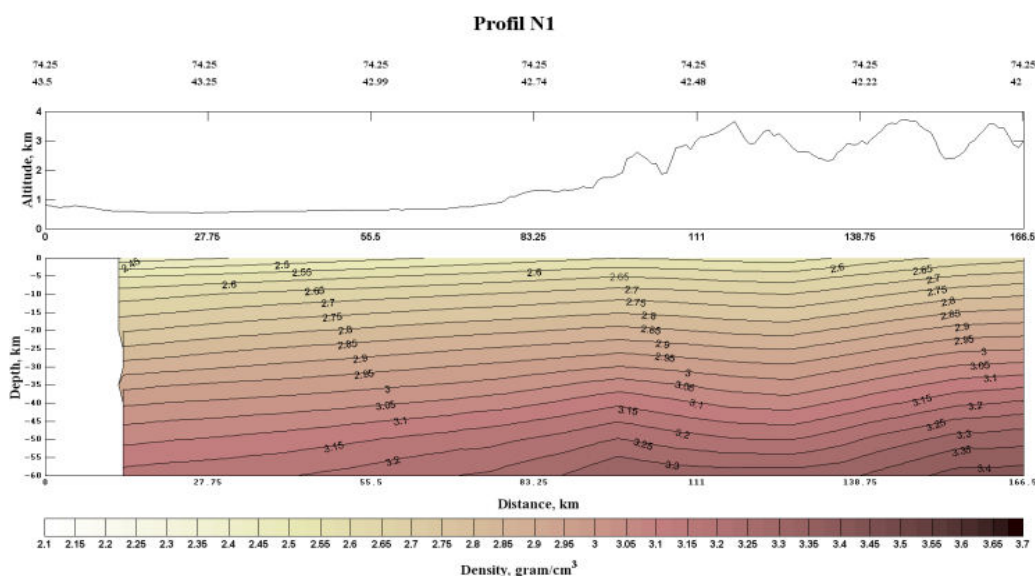


Рисунок 4. Плотностной разрез земной коры вдоль профиля 1 (комбинация моделей).

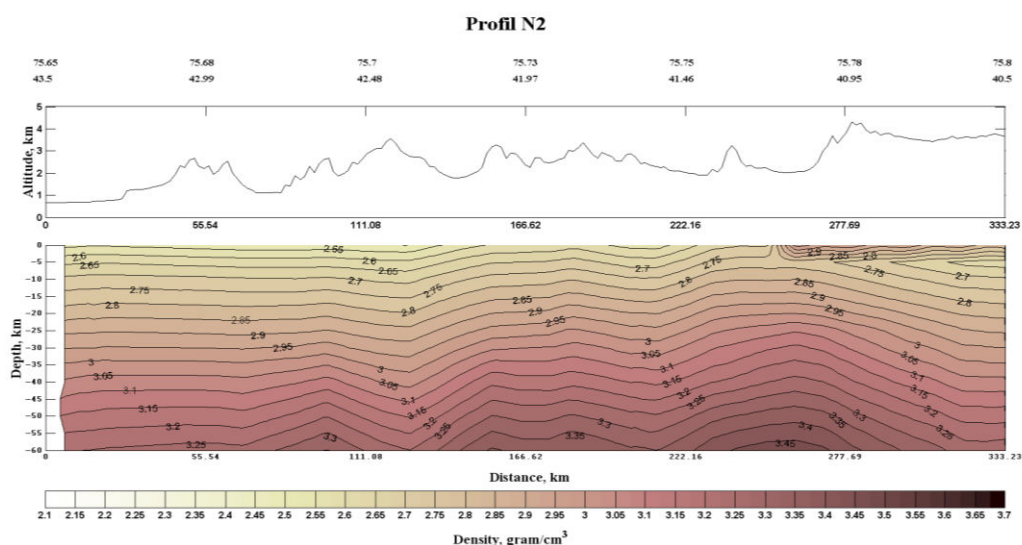


Рисунок 5. Плотностной разрез земной коры вдоль профиля 2 (комбинация моделей).

Значения плотностей относительно плавно увеличиваются с глубиной с незначительным наклоном изолинии плотностей по глубине в различных частях рассматриваемых профилей.

Сопоставление результатов расчета плотности по регрессионной модели Алейникова, Немзорова, Халевина и по комбинации двух моделей (Алейникова, Немзорова, Халевина и Адамса-Вильямсона) показало, что более детальную картину распределения плотностей дает регрессионная модель, позволяющая выявлять плотностные неоднородности среды. Комбинация двух моделей дает более сглаженную картину распределения плотностей, не выявляя при этом определенных особенностей (к примеру, зоны с инверсией плотности не отмечаются).

Достоверность полученных результатов

Оценка достоверности полученных результатов проводилась путем их сопоставления с результатами работ, выполненных в том же районе другими исследователями с использованием различных геофизических методов. Каждый из геофизических методов имеет ограничения, связанные с точностью, разрешимостью и применимостью к вполне определенным объектам и целям, что учитывалось при их анализе. Профиль 1 проведен в соответствии с профилем, приведенным в работе [10] (рисунок 6). Сравнение приведенной геолого-геофизической модели строения земной коры (рисунок 6) с плотностным разрезом, полученным по регрессионной плотностной модели (рисунок 2), показывает приемлемое сходство в плотностной структуре приведенного профиля.

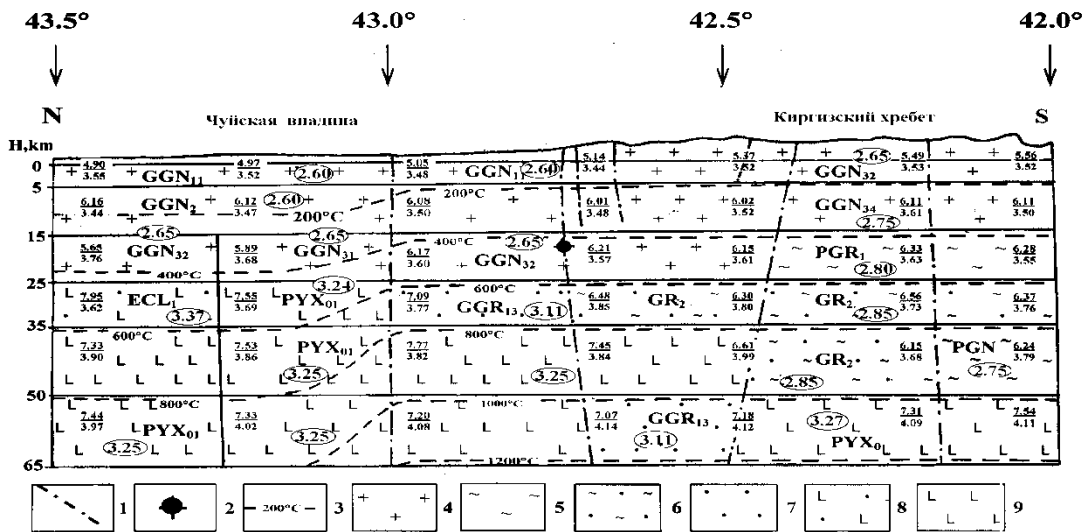


Рисунок 6. Геолого-геофизическая модель строения земной коры через гипоцентр Беловодского землетрясения 1885 г. По [10]: 1 – разломы, 2 – гипоцентр землетрясения, 3 – изотермы, в °С, 4 – 9 – предполагаемый петрологический состав: 4 – гранито-гнейсы, 5 – плагиогнейсы и гранулиты, 6 – гранулиты, 7 – гранатовые гранулиты, 8 – эклогиты, 9 – пироксениты.

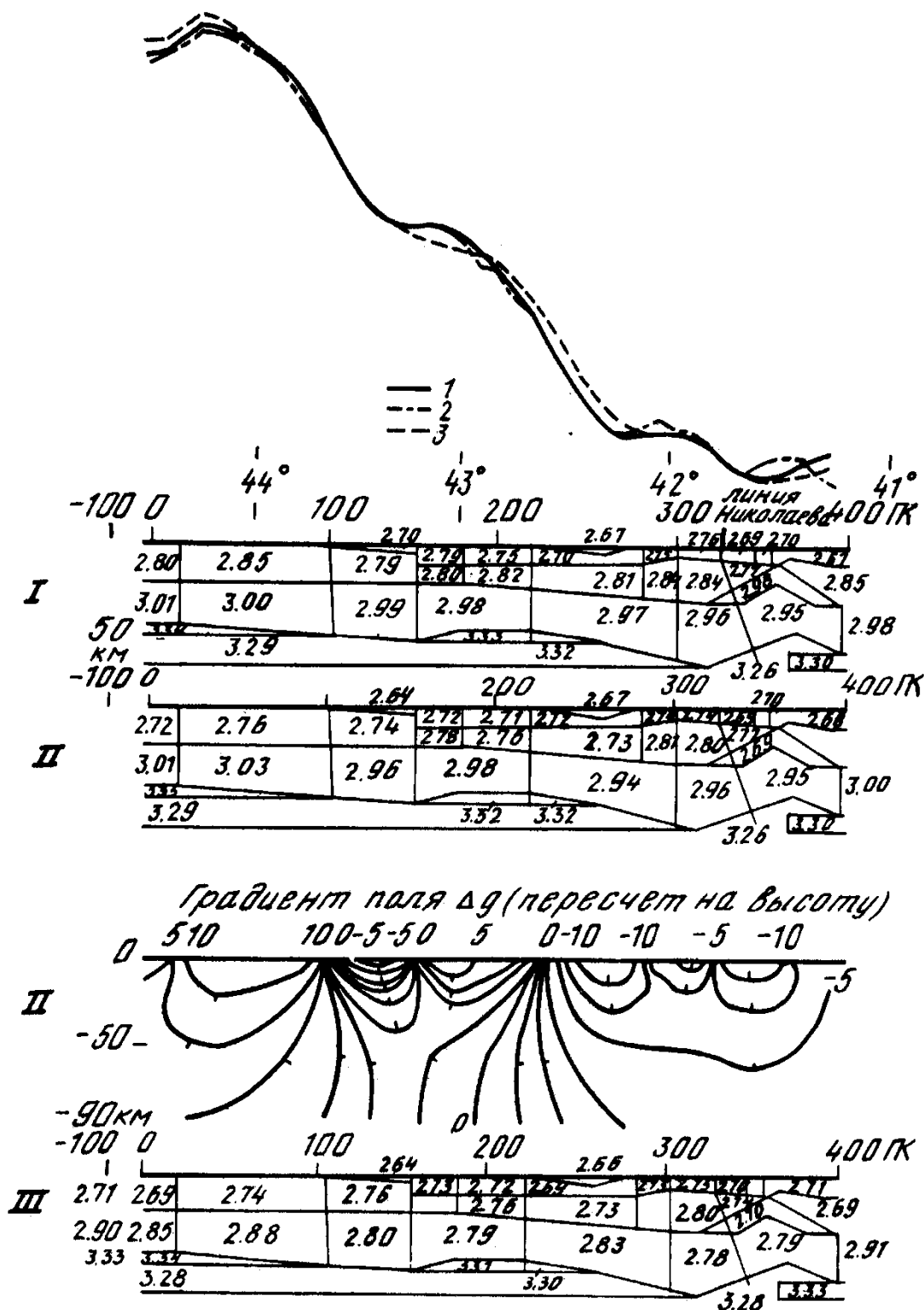


Рисунок 7. Плотностной разрез по профилю Карасай-Талгар по [11].

Профиль 2 (см. рисунки 16 и 7) проведен в соответствии с профилем Карасай-Талгар, описанным в работе [11], по которому выполнены наблюдения методом обменных волн землетрясений (МОВЗ), измерения силы тяжести и пройдены геологические маршруты с отбором образцов пород для измерений плотности.

Сравнение плотностного разреза, полученного по данным гравиметрии (рисунок 7) с плотностным разрезом, полученным по регрессионной плотностной модели (рисунок 3), также показывает приемлемое сходство в плотностной структуре среды приведенного профиля.

Вычисленные значения плотностей по скоростям продольных и поперечных волн не являются плотностью конкретных горных пород, они характеризуют довольно мощные слои и позволяют качественно оценить тип плотностного разреза и выделить крупные плотностные неоднородности земной коры. Тем не менее, сравним результаты наших расчетов с данными, приведенными в работе [12] при определении физических свойств горных пород. На рисунке 8 показан плотностной разрез, на который нанесены конкретные значения из [12] (вертикальная линия с указанием значений плотности пород на определенных глубинах скважин ФОС-1, 2П, 3, пробуренных в Чуйской впадине). Отметим, что рассчитанные значения плотностей не противоречат значениям плотности горных пород, которые определялись по образцам.

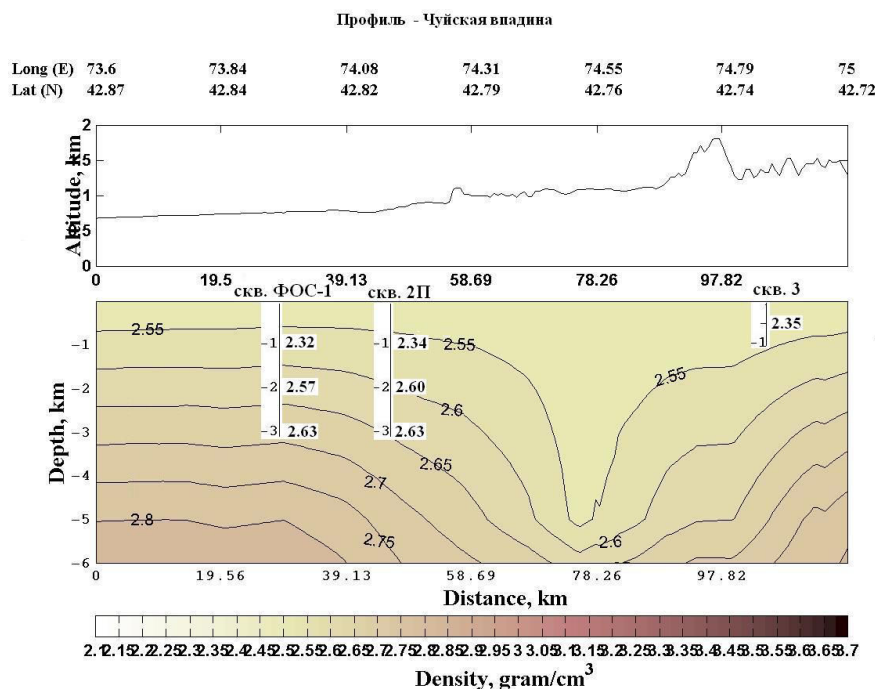


Рисунок 8. Плотностной разрез участка Чуйской впадины

Выводы

Анализ полученных разрезов позволяет сделать выводы:

- Все рассмотренные способы построения картины плотностной неоднородности земной коры выявляют характерные черты плотностных неоднородностей в различных участках земной коры Тянь-Шаня.
- Распределение плотностных неоднородностей, полученные разными методами, визуально похожи и имеют как схожие признаки, так и различия в проявлении плотностных неоднородностей.
- Наиболее детальную модель распределения плотностей (по скоростям продольных и поперечных волн) дает регрессионная модель (Алейникова, Немзорова, Халевина), позволяющая выявлять плотностные неоднородности земной коры.

- Полученные плотностные разрезы хорошо согласуются с известными плотностными разрезами, полученными другими методами.
- Разработанный комплекс программ может быть использован для изучения плотностных неоднородностей земной коры Тянь-Шаня.

Литература

- 1 Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов. – Москва: Наука, 1986. – с.110.
- 2 Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Разработка программного комплекса расчета и построения трехмерной плотностной модели земной коры на базе модели Адамса – Вильямсона. // Вестник Института сейсмологии НАН КР, интернет-журн. – 2013.– № 1. – с.72-77. URL: http://www.journal.seismo.kg/archive/journal_2013-1/article9.pdf
- 3 Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. – Москва: Наука. – 1983. – с.415.
- 4 Буллен К.Е. Плотность земли. – Москва: Мир, 1978. – с.355
- 5 Ботт М. Внутреннее строение Земли. – Москва: Мир, 1974. – с.249.
- 6 Алейников А.Л., Голод С.Н., Немзоров Н.И. Совместная интерпретация сейсмогравитационных данных // Всесоюзное совещание по разработке и комплексированию геофизических методов при детальной эксплуатационной разведке рудных месторождений. – Ереван: Из-во АН Арм.ССР. 1982. – с.90 – 91.
- 7 Алейников А.Л., Голод С.Н., Тиунова А.М., Халевин Н.И. Метод изучения земной коры рефрагированными Р и S волнами. // Геология и Геофизика. 1982. – №3. – с. 120 – 127.
- 8 Семёнов Б.Г. Зависимость плотность–скорость и учёт термодинамических условий при построении плотностной модели земной коры и верхней мантии. // Геология и Геофизика. 1983. – №6. – с. 90 – 98.
- 9 Адамова А.А., Сабитова Т.М., Миркин Е.Л., Багманова Н.Х. Модели для блочной аппроксимации распределения скорости с использованием SPHYRIT 90 (алгоритм С. Рекера). // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. – Бишкек: Илим, 2006. – с.9-18.
- 10 Мамыров Э.М. Геолого-геофизические разрезы земной коры по сейсмотомографическим данным с учетом влияния РТ-условий // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. – Бишкек: Илим, 2006. – с. 63 – 65.
- 11 Блинов Г.И., Лобанченко А.Н. Глубинное строение литосферы по геофизическим данным. Плотностной разрез. // Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня. – Москва: Наука, 1991. – с.29 – 34.
- 12 Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1983. – 248 с.