

Трехмерная плотностная модель земной коры центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита

В. И. Старостенко, П. Я. Куприенко, И. Б. Макаренко, А. С. Савченко, О. В. Легостаева, 2018

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 27 марта 2018 г.

Наведено тривимірну густинну модель земної кори центральної частини Голованівської шовної зони Українського щита масштабу 1 : 50 000. Модель розраховано з використанням автоматизованого комплексу GMT-Auto. У моделі враховано зміну густини як за латераллю згідно з петрофізичними даними, так і за глибиною відповідно до даних сейсмометрії. Було взято до уваги стрибкоподібну зміну густини в той чи інший бік, наявність зон інверсії і зон з постійною густиною. Густину розрахункових тіл на поверхні фундаменту задавали виходячи з відсоткового співвідношення порід, що їх складають, у глибинній частині кори — за залежністю густини від швидкості. Підтверджено блокову будову верхньої частини земної кори, яку раніше було виявлено сейсмометрією у деяких районах зони. В процесі моделювання з'ясовано, що досліджувана територія в густинній моделі від поверхні до глибини ≥ 20 км ділиться за будовою на центральну, східну і західну частини. Центральна частина, що відповідає більшій частині Голованівської шовної зони, представлена породами, густина яких значно вища, ніж у західній і особливо у східній частинах. Наявність значно розущільнених порід у східній і північній частинах зони до глибини 10 км засвідчує перебіг тут у минулому процесів гранітизації. Від глибини 30 км і до поділу Мохо виділено дві частини — західну і східну, що розділені різким субмеридіональним уступом у поділі Мохо від 46 до 55—65 км уздовж осьової лінії Голованівської шовної зони. Густина порід значно вища у західній частині як за площею, так і за глибиною. Отримано розподіл густини за всім розрізом земної кори у локальних структурах з аномально високою густиною на поверхні фундаменту (габро, амфіболіти, залістисті кварцити, кристалосланці та гнейси гранат-біотитові), а також у вмисних породах. Згідно з розрахунками у першому наближенні визначено характер зміни густини з глибиною в аномальних структурах і встановлено глибину їхнього поширення. За попередніми даними ці структури простежуються до глибини 3—5 км.

Ключові слова: Голованівська шовна зона, густина, земна кора, структури з аномально високою густиною на поверхні фундаменту.

Введение. Построение детальных трехмерных плотностных моделей различных геологических структур преследует две цели. Во-первых, это дает ценную информацию для изучения глубинного строения конкретного района, поскольку позволяет получить сведения о плотностях пород,

слагающих изучаемую структуру [Artemieva, 2011]. Во-вторых, совместно с иными геолого-геофизическими данными облегчает прогноз полезных ископаемых, причем для докембрийских щитов — это, прежде всего, наличие месторождений различных металлов [Ентин, 1987].

Изучаемая территория включает: Ятранский, Первомайск-Голованевский и Новопавловский блоки Голованевской шовной зоны (ГШЗ); восточные части Уманского и Бандуровского блоков Бугского мегаблока Украинского щита (УЩ), которые соседствуют с Гайворонской зоной разломов. Голованевская шовная зона отделена от площади развития гранитоидов кировоградского комплекса Первомайской зоной разломов, а от Бугского и Росинского мегаблоков УЩ — Тальновской. Первомайск-Голованевский блок отделен от Ятранского Емиловской, а от Новопавловского — Вradiевской зоной разломов. Долгопристанская и Молдовская зоны скалывания северо-западного простирания расположены в центральной части Первомайск-Голованевского блока. Савранская зона скалывания пересекает в том же направлении Тальновскую зону разломов (рис. 1).

Ранее ГШЗ была изучена методом трехмерного плотностного моделирования как составная часть Ингульского мегаблока УЩ в масштабе исследований 1 : 500 000 [Куприенко и др., 2007 а] и 1 : 200 000 [Старостенко и др., 2015б] и была представлена с поверхности фундамента основными породами с плотностью 2,80—2,83 г/см³, поскольку многие структуры из-за их небольшого размера объединялись с такими же, находящимися рядом, при этом плотностные параметры осреднялись. Именно масштаб определил более генерализованный учет гравитационного эффекта от этих структур. При плотностном моделировании в мелком масштабе неоднородности на поверхности фундамента задаются крупными расчетными телами с осредненной плотностью. А поскольку, в основном, в осевой части зоны на поверхности докембрийского фундамента наблюдается большое количество локальных структур с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента, то это влияет на расчетную плотность, в результате чего получаем высокий расчетный гравитационный эффект, который характеризует всю площадь.

Однако при более крупном масштабе четко вырисовываются блоки до глубины 1,5—5 км, в которых плотность пород на поверхности фундамента варьирует в широком диапазоне (от 2,61 до 3,17 г/см³) и учитывается при моделировании конкретно в каждом теле. В результате получаем дифференцированное распределение плотности, характеризующее блоковое строение с тем же высоким гравитационным эффектом.

Масштаб исследований 1 : 50 000 позволил получить детальное распределение плотности в земной коре по глубине и латерали, а также дополнительную информацию о строении локальных структур с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента.

Исходные материалы. При создании плотностной модели центральной части ГШЗ были использованы: 1) данные сейсмометрии по профилю ГСЗ (XXV) и геотраверсам (IV, VI) [Литосфера, 1988; Ильченко 2003 а, б]; 2) схема залегания раздела Мохо, построенная по [Схема ..., 1992; Куприенко и др., 2007 а; Омельченко и др., 2008]; 3) структурно-петрофизическая и тектонофизическая основа геолого-структурной карты поверхности кристаллического фундамента [Гинтов и др., 2016]; 4) геолого-петрофизические таксоны [Гинтов и др., 2016]; 5) пределы изменения плотности горных пород по [Гинтов и др., 2016], а также среднее значение плотности по данным [Лебедев и др., 1986; Ентин, 1987]; 6) гравитационное поле в редукции Буге (масштаб 1 : 50 000).

В гравитационном наблюдаемом поле (рис. 2) выделяется уникальная, наиболее интенсивная в пределах УЩ, положительная аномалия (до 68 мГал), которая вытягивается вдоль всей ГШЗ в субмеридиональном направлении дискордантно к гравитационным аномалиям Бугского и Подольского мегаблоков УЩ. Природа этой аномалии объясняется как поверхностным, так и глубинным строением ГШЗ: на поверхности докембрийского фундамента в ее пределах наблюдается большое количество массивов бази-

тов и гипербазитов, повышенная концентрация скиалитов и ксенолитов двупироксеновых кристаллосланцев; в нижней коре, по данным трехмерного гравитационного моделирования [Куприенко и др.,

2007а; Старостенко и др., 2015б], присутствует очень мощный "базальтовый слой" (25 км) и толща коромантийной смеси мощностью до 20 км. Наиболее интенсивное поле прослеживается в пределах

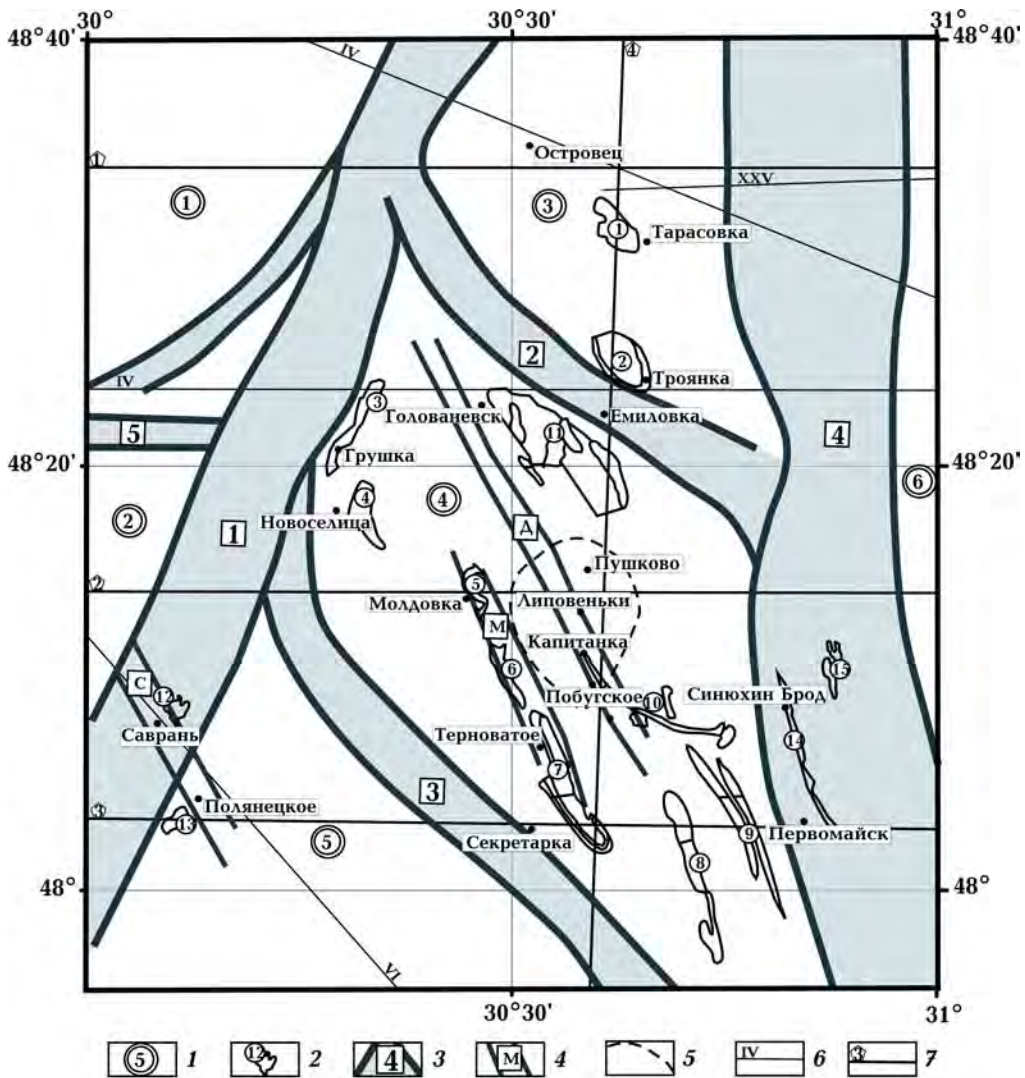


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита по [Гинтов и др., 2016], с упрощениями: 1 — блоки (цифры в двойных кружках): Уманский (1), Бандуровский (2) Бугского мегаблока УЩ; Ятранский (3); Первомайск-Голованевский (4) и Новопавловский (5) Голованевской шовной зоны; площадь развития гранитоидов кировоградского комплекса (6); 2 — контуры аномальных структур (цифры в кружках): 1 — Тарасовская; 2 — Троянская; 3 — Грушковская; 4 — Новоселицкая; 5 — Молдовская; 6 — Демовьярская; 7 — Секретарская; 8 — Чаусовская; 9 — Пороновская; 10 — Лашевская; 11 — Шепиловско-Голованевская; 12 — Чермерпольская; 13 — Полянецкая; 14 — Подгородненская; 15 — Новоалександровская; 3 — зоны разломов (цифры в квадратах): 1 — Тальновская, 2 — Емиловская, 3 — Вradiевская, 4 — Первомайская, 5 — Гайворонская; 4 — зоны скальвания: С — Савранская; Д — Долгопристанская; М — Молдовская; 5 — область распространения серпентинитов по [Гинтов и др., 2016]; 6 — сейсмические профили; 7 — иллюстрационные профили.



Рис. 2. Наблюдаемое гравитационное поле участка исследований (масштаб 1 : 50 000). Изолинии в мГал.

Ятранского и Первомайск-Голованевского блоков (50—64 мГал). Несколько меньшая интенсивность поля характерна для Новопавлковского (30—47 мГал) и Бандуровского (15—45 мГал) блоков. В последнем она возрастает в южном направлении. Уманский блок представлен спокойным полем интенсивностью 3—11 мГал. Для западной границы Первомайской, восточной части Тальновской, а также Вradiевской зон разломов характерны интенсивные градиенты поля силы тяжести, в пределах которых значение плотности изменяется приблизительно от 30 до 50 мГал. В западной части Тальновской зоны разломов значения поля колеблются в пределах 18—32 мГал, а в

восточной части Первомайской они несколько выше (30—35 мГал). В пределах Емиловской зоны разломов значение поля тяжести уменьшается от центра (около 63 мГал) к периферии: до 45 мГал на юго-востоке и до 38—37 на северо-западе в зоне пересечения с Тальновской зоной разломов (см. рис. 2).

Трехмерная плотностная модель земной коры. Методика построения трехмерных плотностных моделей, которая включает: основные положения; программный комплекс GMT-Auto, используемый для моделирования; структуру и параметризацию модели, подробно описана в работах [Куприенко и др., 2007а, б; Старостенко и др., 2015а]. Для ввода информации о

распределении плотности в компьютер были использованы программы Spacemar [Старостенко и др., 2011] и Isohypse [Старостенко и др., 2016].

Изучаемая территория в плотностной модели в масштабе 1 : 50 000 делится по своему строению на центральную, восточную и западную части. Центральная, которая соответствует большей части ГШЗ (Ятранский, Первомайск-Голованевский блоки и восточная часть Новопапавловского), сложена породами, плотность которых значительно выше, чем в западной и особенно в восточной частях. Она, а также западная часть (Уманский и Бандуровский блоки Бугского мегаблока УЩ) в интервале глубин 0—5 км характеризуются постоянной плотностью в каждом расчетном теле (исключение составляют тела аномальной плотности с поверхности, которым посвящен отдельный раздел в данной статье), глубже плотность нарастает с градиентом, индивидуальным в каждом теле (рис. 3). Блоковое строение верхней части коры до глубины 5 км, обусловленное составом пород, подтверждено данными сейсмометрии [Ильченко 2003 а, б]. При совместном рассмотрении данных сейсмометрии, гравиметрии и геотермии также сделан вывод о том, что плотностные неоднородности, выделенные в приповерхностной части УЩ, распространяются до глубины не более 10 км, т. е. вертикальная слоистость присуща ей лишь до этой глубины [Павленкова и др., 1974]. Ниже верхнего слоя кора имеет горизонтально-слоистое строение.

В отдельных телах амфибол-биотитовых плагиогнейсов и биотитовых гнейсов восточной части, которая включает в себя Первомайскую зону разломов и площадь развития гранитоидов кировоградского типа, в разрезе земной коры до глубины 10 км присутствуют три зоны распределения плотности, различающиеся между собой (рис. 3, а—в). Первая зона (до 5 км) представлена постоянной плотностью, т. е. в этом промежутке отсутствует градиент изменения плотности с глубиной. Вторая (5—8 км) характе-

ризуется наличием зоны инверсии ($\Delta\rho = 0,05 \div 0,08 \text{ г/см}^3$) с постоянной плотностью. В третьей зоне (8—10 км) плотность нарастает с глубиной в каждом расчетном теле с индивидуальным градиентом. Между зонами плотность изменяется скачкообразно. Природа зон инверсии (волноводов, зон пониженной скорости/плотности) относительно вышележащих и подстилающих пород трактуется в настоящее время неоднозначно. Зоны рассматривают либо как следствие смены состава слагающих пород, либо как области разуплотнения и повышенной трещиноватости пород с возможным заполнением флюидами, либо как результат перекрытия более высокоскоростными слоями менее скоростных и т. п. [Трипольский, Шаров, 2004]. Тем не менее, существование зон инверсии на щитах подтверждают как сейсмические данные, так и результаты экспериментальных определений упругоплотностных параметров горных пород. Согласно первым во многих районах щитов, преимущественно в верхней и средней коре, регистрируются слои с пониженными скоростями, кровля и подошва которых фиксируется в интервале глубин 4—8 км и 10—15 км соответственно [Трипольский, Шаров, 2004]. При изучении строения земной коры и верхов мантии Кировоградского блока УЩ по данным ГСЗ был сделан вывод о том, что ниже глубины 5 км преобладают слои с пониженной скоростью. Вероятно это лейкократовые гнейсы и граниты [Ильченко, 2003 а, б]. По данным [Омельченко и др., 2008] в ГШЗ в интервале глубин 5—9 км выделен слой с пониженной скоростью. Лабораторные исследования [Корчин и др., 2016] показали, что при *PT*-условиях, которые соответствуют глубинам 5—15 км, градиент роста плотности пород падает до нуля или становится отрицательным. При этом в зоне инверсии происходит изменение пористости пород, подтверждая тем самым интенсивное их разуплотнение.

Массивы гранитов в восточной части приняты с постоянной плотностью до глу-

бины 10 км (см. рис. 3, а—в). Понижение плотности в слое от поверхности фундамента до глубины 10 км подтверждено в работе [Ярошук, 1983], автор которой утверждает, что "метаморфиты в разной степени "усвоены" гранитами". На основе сопоставления материалов ГСЗ с экспериментальными данными изменения скоростных параметров пород, слагающих приповерхностные горизонты Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского блоков, авторами работы [Корчин и др., 2016] также было высказано предположение о развитии гранитов до глубины 10—12 км.

При создании плотностной модели учитывалось изменение плотности как с глубиной в соответствии с данными сейсмометрии, так и по латерали в соответствии с петрофизическими данными. При необходимости принимались во внимание скачкообразное изменение плотности в ту или иную сторону, зоны инверсии и зоны с постоянной плотностью. Плотность расчетных тел на поверхности фундамента задавалась исходя из процентного соотношения слагающих пород, в глубинной — по зависимости $\rho = f(V_p)$ [Красовский, 1981].

Результаты трехмерной плотностной модели представлены в виде схем распределения плотности на поверхности фундамента, глубинах 5, 10, 20, 30 км и разделе Мохо, что позволило выявить и проследить особенности изменения плотности по всему разрезу земной коры. Также детально изучено распределение плотности в структурах, которые характеризуются незначительными размерами и аномально высокой плотностью на поверхности фундамента, обусловленной составом пород.

На поверхности фундамента (рис. 4) в восточной части изучаемой территории, которая представлена узкой полосой развития кировоградских гранитов и Первомайской зоной разломов, фиксируются граниты кировоградского типа с плотностью 2,62 г/см³, побужские с плотностью 2,61 г/см³ и гнейсы биотитовые (плот-

ность 2,68 г/см³) с незначительными включениями кристаллосланцев двупироксеновых, ортопироксеновых, биотит-ортопироксеновых с плотностью 2,90 г/см³ [Литосфера ..., 1988; Ентин, 1987; Гинтов и др., 2016]. При моделировании плотность гранитов осталась неизменной, за исключением тела с плотностью 2,63 г/см³, в котором есть включения пород коша-ро-александровского таксона (см. рис. 4, легенда). В большинстве тел гнейсов биотитовых плотность понижена до 2,65 г/см³. На севере участка присутствуют тела чарнокитов и эндербитов с плотностью 2,67 и 2,69 г/см³. На крайнем юге расположены гнейсо-граниты синицовского таксона (с включениями плагиогнейсов биотит-графитовых (часто с силлиманитом и гранатом), кальцифиров (доломит-кальцитовых и кальцитовых), которые учтены в модели со средней плотностью 2,69 г/см³. Отдельные тела метагабброидов в чистом виде и с включениями кристаллосланцев имеют плотность 2,81 и 2,80 г/см³, соответственно.

Западнее от Первомайской зоны разломов, в Ятранском блоке, наблюдаются большие поля чарнокитов с включениями эндербитов (согласно [Гинтов и др., 2016] плотность 2,71 и 2,74 г/см³), осложненных телами кристаллосланцев вытянутой формы (особенно в западной части блока). В пределах блока присутствуют две овальные области габбро-амфиболитов с плотностью 2,81 г/см³, которые также осложнены телами кристаллосланцев, имеющих вид тонких пластин. Север блока также сложен чарнокитами и эндербитами [Гинтов и др., 2016]. В первом приближении для них были приняты плотности 2,71 и 2,74 г/см³. Однако в процессе моделирования выяснилось, что между наблюдаемым и расчетным полями имеется значительное расхождение, причем амплитуда отклонения указывает на несогласованность в верхних слоях разреза. Согласно данным сейсмометрии область на севере Ятранского блока, граничащая с Субботско-Мошоринской широтной зоной разломов, характеризу-

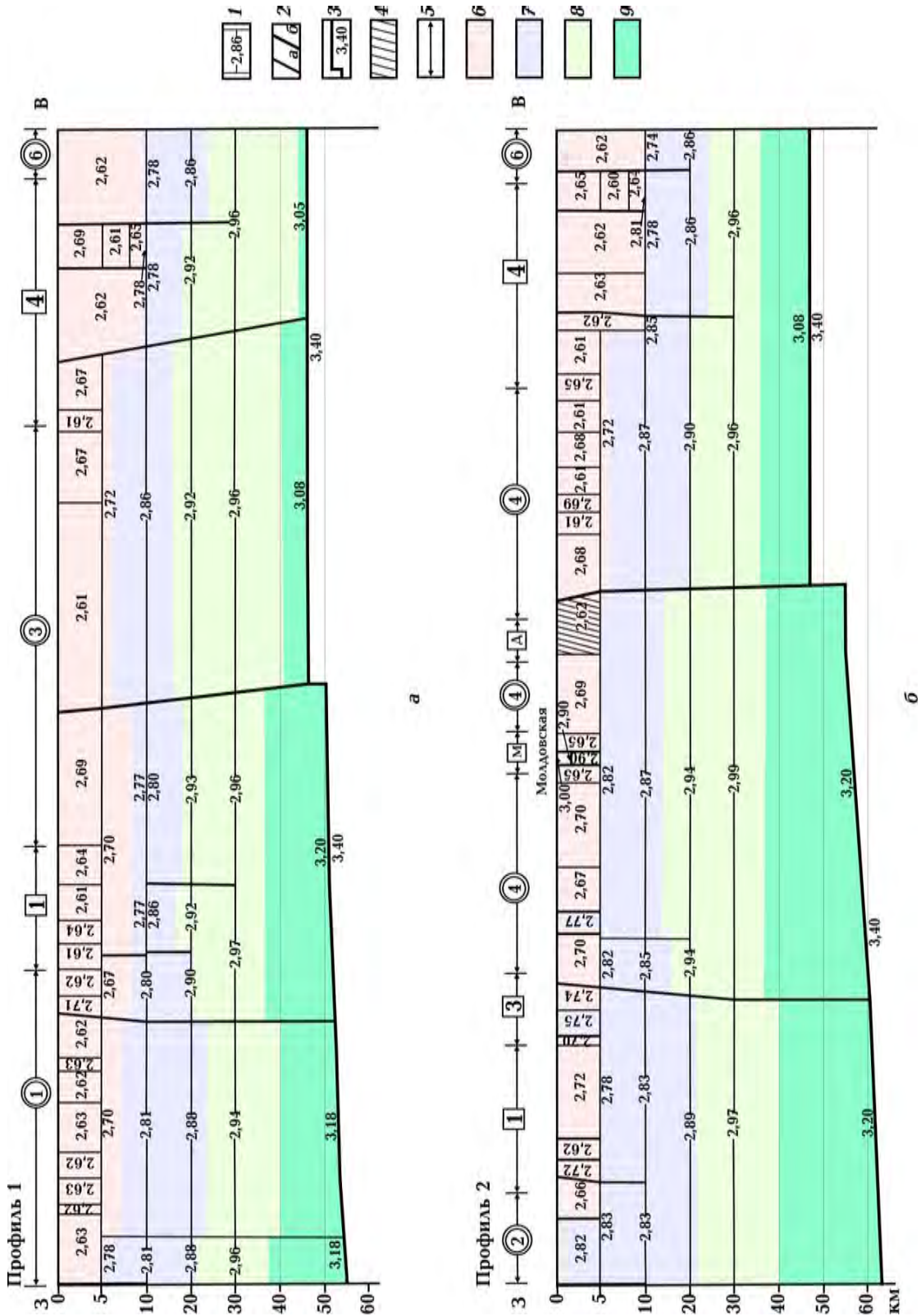
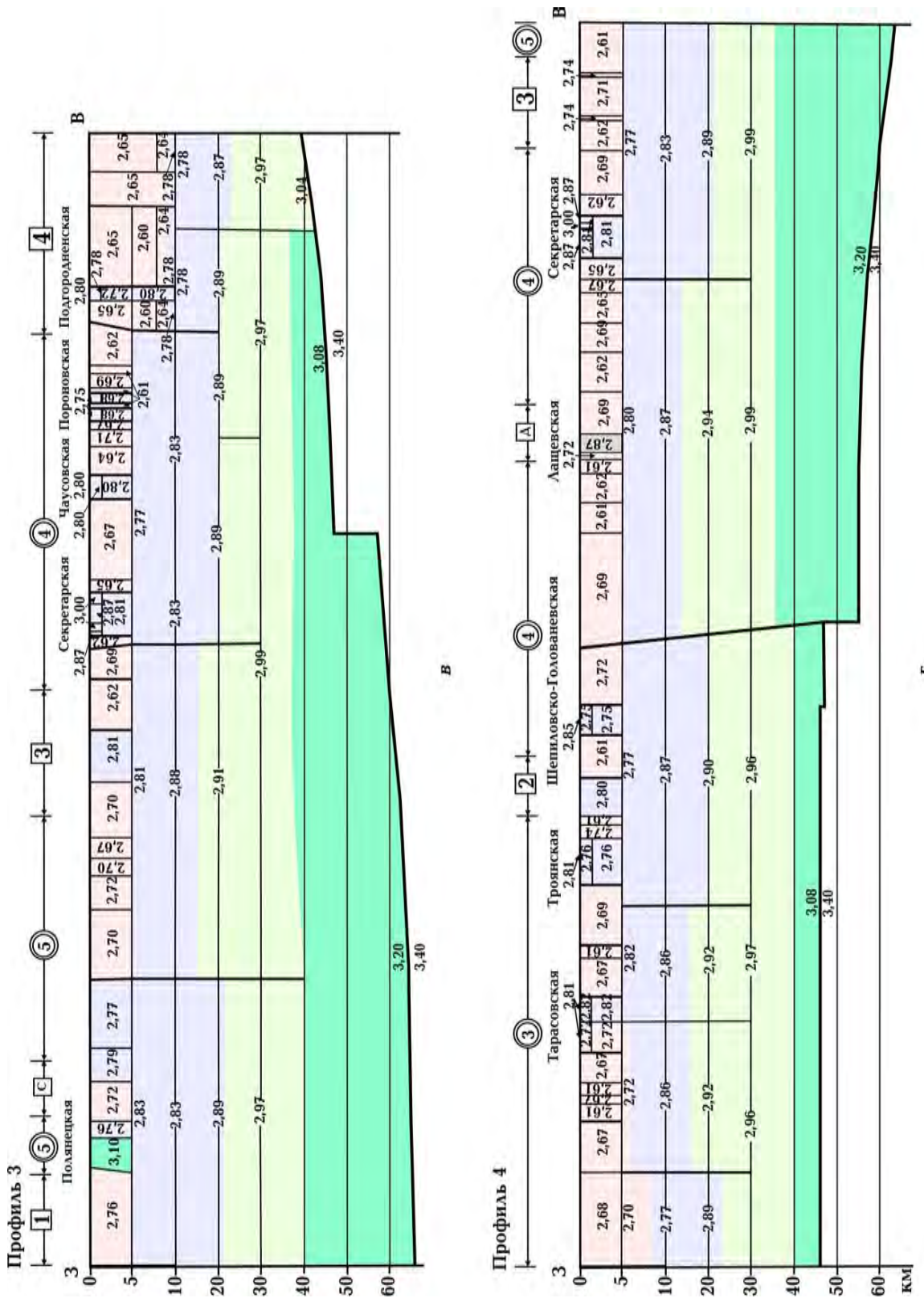


Рис. 3. Плотностные разрезы земной коры вдоль иллюстрационных профилей а—г (расположение см. на рис. 1): 1 — контуры и значение плотности (г/см^3) расчетных тел; 2 — предполагаемые нарушения по данным трехмерного плотностного моделирования (а) и положение ступени раздела Мохо по данным сейсмометрии (б); 3 — раздел Мохо; →



4 — область распространения серпентинитов; 5 — положение блоков, зон разломов и зон скалывания на поверхности; условно выделены слои вещественного состава земной коры: 6 — "гранитный", 7 — "диоритовый", 8 — "базальтовый"; 9 — коромантийная смесь. Другие условные обозначения см. на рис. 1.

ется скоростями, соответствующими гранитному составу до глубины 5 км. Трехмерное плотностное моделирование [Куприенко и др., 2007 а; Старостенко и др., 2012] показало, что земная кора в Субботско-Мошоринской зоне разломов разуплотнена. Вероятно это вызвано дилатантной разрыхленностью горных пород, возникающей при сдвиговых процессах, когда происходят неупругие изменения системы трещин, определяющие деформации горных пород. Эти деформации приводят к увеличению трещинной пустотности, а следовательно, к снижению плотности [Трипольский, Шаров, 2004; Гинтов и др., 2008]. Трехмерное плотностное моделирование Ингульского мегаблока УЩ в масштабе исследований 1 : 200 000 также показало, что в северной части ГШЗ между Тальновской и Звенигородско-Братской зонами разломов плотности ниже по сравнению с центральной и южной ее частями [Старостенко и др., 2015б]. Поэтому значения плотности были скорректированы в сторону уменьшения до величин, соответствующих диапазону кислых пород (на поверхности 2,63 и 2,67 г/см³). Плотность чарнокитов и эндербитов на остальной площади блока также претерпела изменения в сторону разуплотнения на 0,05—0,07 г/см³, были понижены значения плотности в телах кристаллосланцев и габбро-амфиболитов. Это говорит о том, что процессу гранитизации в разной степени был подвержен весь блок. В соответствии с данными сейсмометрии и трехмерного плотностного моделирования учтено разуплотнение пород до 5 км. На поверхности фундамента плотность гранитов без включений более плотных пород принята 2,61 г/см³. Это — небольшие тела по всему блоку и в пределах Емиловской зоны разломов.

Для Первомайск-Голованевского блока характерно повсеместное распространение гранитов, чарнокитов и эндербитов с включениями тел габбро-амфиболитов повышенной плотности, железистых кварцитов, плагиогнейсов биотит-графитовых и серпентинитов в центральной

части. Породы гранитного состава, как и в Ятранском блоке, присутствуют вытянутыми телами северо-западного простирания [Гинтов и др., 2016] и характеризуются плотностью 2,61—2,66 г/см³ в зависимости от количества включений более плотных пород. Расчетная плотность пород чарнокит-эндербитового состава 2,68—2,74 г/см³ (см. рис. 4).

Кварциты полевошпатовые, часто с силиманитом и гранатом, а также гнейсы силиманит-гранат-биотитовые кошаро-александровского таксона [Гинтов и др., 2016], которые наблюдаются на юго-западе блока и в узле пересечения Тальновской с Врэдиевской зон разломов, учтены в модели с плотностью 2,65 и 2,74 г/см³ соответственно.

В центральной части блока присутствуют серпентиниты (см. рис. 1), влияние которых отразилось на плотностных свойствах близлежащих пород. Так, значение плотности вмещающего комплекса (эндербиты и чарнокиты) ниже на 0,03 г/см³ (с 2,72 до 2,69 г/см³).

Восточная и центральная части Новопаоловского блока ГШЗ представлены массивом розовых и серовато-розовых полосчатых гранат-биотитовых гнейсо-гранитов побужского (чудново-бердичевского) типа, среди которых хаотично расположены тела чарнокитов и эндербитов. Средняя плотность расчетных тел на поверхности фундамента здесь принята 2,67; 2,70 и 2,75 г/см³. Западнее присутствует массив гнейсо-гранитов полосчатых розовых и серовато-розовых синицовского таксона с плотностью 2,75 и 2,79 г/см³. На севере блока наблюдаются большой массив чарнокитов и эндербитов (2,74 г/см³), а также граниты побужского типа в чистом виде (2,61 г/см³) и с примесью чарнокитов и эндербитов с мелкими и большими включениями кристаллосланцев (2,67; 2,75 и 2,81 г/см³). Расчетные тела с плотностью 2,82 и 2,83 г/см³ обусловлены включениями среди гранитов большого количества кристаллосланцев, гнейсов биотитовых и железистых кварцитов. Вблизи Савранской зоны скалывания при-

сутствует небольшое тело железистых кварцитов, оконтуренных выходами габбро-амфиболитов. Плотность этих пород принята в модели со значением $2,97 \text{ г/см}^3$.

Расположенный к западу от ПШЗ Уманский блок представлен в плотностной модели тремя типами пород: граниты уманские с плотностью $2,61 \text{ г/см}^3$, граниты гайсинские с плотностью $2,63 \text{ г/см}^3$ и участки биотитовых гнейсов, плотность которых $2,71 \text{ г/см}^3$. В процессе моделирования плотности блока не претерпели изменения, исключение представляет область на северо-востоке блока, в которой значение плотности уманских гранитов понижено с $2,62$ до $2,60 \text{ г/см}^3$. Это связано с зоной интенсивного разуплотнения, обусловленного глубинными нарушениями [Гинтов и др., 2016].

К югу от Уманского блока, в Бандуровском блоке, плотность кислых пород $2,61$ и $2,66 \text{ г/см}^3$, гнейсов биотитовых $2,71 \text{ г/см}^3$, а области распространения чарнокитов и эндербитов с чередованием кристаллосланцев характеризуются значениями $2,76$; $2,80$ и $2,82 \text{ г/см}^3$. На западе блока расположено тело плагиогнейсов биотит-графитовых с включениями кристаллосланцев с плотностью $2,97 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, в Ятранском блоке плотности пород на поверхности фундамента колеблются в пределах ($2,61$ — $2,80 \text{ г/см}^3$), в Первомайск-Голованевском ($2,61$ — $2,81 \text{ г/см}^3$), в Уманском ($2,60$; $2,61$; $2,63$ и $2,71 \text{ г/см}^3$), в расчетных телах Бандуровского блока плотности несколько повышены ($2,71$; $2,76$; $2,80$; $2,82$ и $2,97 \text{ г/см}^3$). В Новопавловском блоке плотности пород нарастают с глубиной до 10 км , не претерпевая изменений на 5 км .

На глубине 5 км в некоторых телах Ятранского блока (аналогично Первомайской зоне разломов) присутствует скачкообразное изменение плотности. На этой же глубине расчетные тела объединены в более крупные в силу идентичности их состава и плотностных параметров.

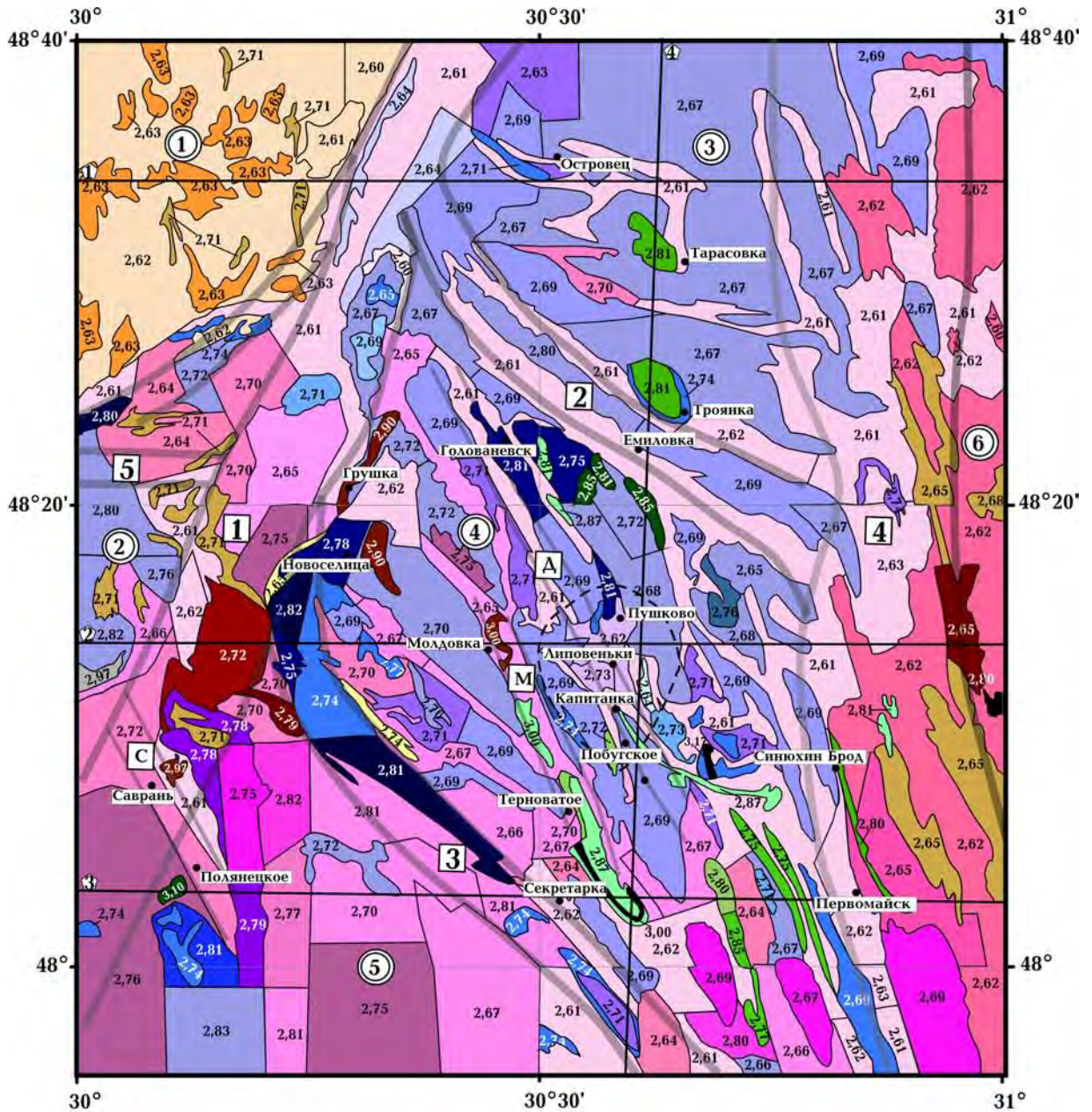
Тальновская зона разломов (см. рис. 1), ограничивающая Уманский блок с востока, представлена в северной части гра-

нитам с плотностью $2,61 \text{ г/см}^3$, а также включениями чарнокитов и эндербитов с расчетной плотностью $2,64 \text{ г/см}^3$, которые присутствуют вытянутыми телами параллельно оси зоны (см. рис. 3). Дальше к юго-западу в зоне среди гранитов побужских появляются области кристаллосланцев двупироксеновых, ортопироксеновых, биотит-пироксеновых, гранат-пироксеновых и небольшие тела железистых кварцитов, что привело к увеличению значения расчетной плотности до $2,72$; $2,75$ и $2,78 \text{ г/см}^3$.

Емиловская зона разломов, разделяющая Ятранский и Первомайск-Голованевский блоки, представлена по всему простиранию гранитами с плотностью $2,61 \text{ г/см}^3$, на фоне которых выделяются тела чарнокитов и эндербитов с плотностью $2,69 \text{ г/см}^3$ (в чистом виде) и с $2,80 \text{ г/см}^3$ (с примесью кристаллосланцев).

Долгопристанская зона скалывания также на большей части территории исследований характеризуется плотностью пород $2,61 \text{ г/см}^3$ и только на юго-востоке появляются породы повышенной плотности (габбро-амфиболиты), что сказывается на расчетной плотности ($2,69$ и $2,73 \text{ г/см}^3$). Молдовская зона скалывания характеризуется в основном плотностью пород $2,65 \text{ г/см}^3$. Осложняют ее тела с аномальной плотностью ($2,87$ и $3,00 \text{ г/см}^3$), которые представлены габбро-амфиболитами и гнейсами биотитовыми.

На срезе 5 км (рис. 5) максимальные значения плотности фиксируются в Бандуровском блоке, на юге Новопавловского ($2,84 \text{ г/см}^3$), снижаясь до $2,80$ — $2,82 \text{ г/см}^3$ в центральной и западной частях Первомайск-Голованевского и Ятранского блоков. Южная часть Ятранского, восточная Первомайск-Голованевского блоков и юго-западная Тальновской зоны разломов характеризуются плотностью $2,78 \text{ г/см}^3$. На большей части Уманского блока, на севере Тальновской зоны разломов и Ятранского блока плотности изменяются от $2,76$ до $2,68 \text{ г/см}^3$, уменьшаясь в северном направлении. В Первомайской зоне разломов плотности колеблются в пределах $2,60$ —



1- кристаллосланцевые

кристаллосланцы двупироксеновые, ортопироксеновые, биотит-ортопироксеновые, гранат-ортопироксеновые, магнетит-двупироксеновые (2.80 г/см³).

2- ультрамафито-мафитовые и железорудные молдавский (плаггиогнейсы, гнейсы гранат-биотитовые):

кварциты железистые, в основном магнетит-двупироксеновые, кальцифилы магнетитовые рудные (3.00, 3.17 г/см³);

с включениями кварцитов железистых (2.90, 2.97, 3.00 г/см³).

капитановско-деренюхинский, тарноватский, кумаровский, троянский (метагабброиды-амфиболиты, габбро, габбро-амфиболиты):

с включениями кварцитов железистых (2.81, 2.85, 3.10 г/см³);

с включениями кристаллосланцев (2.80, 2.81 г/см³);

в чистом виде (2.81, 2.87, 3.00 г/см³);

с включениями кварцитов полевошпатовых часто с силлиманитом и гранатом, плаггиогнейсов, гнейсов силлиманит-гранат-биотитовых, гранат-кордиерит-биотитовых, силлиманит-гранат-кордиерит-биотитовых (2.80 г/см³);

с включениями чарнокитов, часто гранатосодержащих по [Геологическая..., 1990] (2.75, 2.77, 2.85 г/см³);

с включениями серпентинитов (2.70, 2.72 г/см³).


Рис. 4. Схема распределения плотности (г/см³) на поверхности кристаллического фундамента. Курсивом в легенде указано наименование таксонов по [Гинтов и др., 2016]. Условные обозначения см. на рис. 1. Легенда к рис. 4.

3 – гнейсовые (плаггиогнейсы, амфибол-биотитовые, гнейсы биотитовые):


кошаро-александровский (кварциты полевошпатовые часто с силлиманитом и гранатом, плаггиогнейсы, гнейсы силлиманит-гранат-биотитовые, гранат-кордиерит-биотитовые, силлиманит-гранат-кордиерит-биотитовые)


 в чистом виде (2,65, 2,74 г/см³);


хощевато-завальевский (плаггиогнейсы биотит-графитовые (часто с силлиманитом и гранатом), кальцифиры доломит-кальцитовые, кальцитовые):

 с включениями кристаллосланцев (2,97 г/см³).


черноташлыкский (плаггиогнейсы, амфибол-биотитовые, гнейсы биотитовые):


 с включениями кристаллосланцев (2,65, 2,79 г/см³);

 с включениями гнейсо-гранитов полосчатых розовых и серовато-розовых (2,72 г/см³);

 в чистом виде (2,65, 2,68, 2,71 г/см³).


4 – гнейсо-гранитоидные (гнейсо-граниты полосчатые розовые и серовато-розовые, как правило динамометаморфически измененные синищовского комплекса):


 в чистом виде (2,78, 2,79 г/см³);


 с включениями плаггиогнейсов биотит-графитовых (часто с силлиманитом и гранатом), кальцифиров доломит-кальцитовых, кальцитовых (2,67, 2,69, 2,75 г/см³).


5 – гранитоидные


чарнокит-эндербитовый меланократовый (эндербиты, чарнокиты с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатосодержащих, по [Геологическая..., 1990]):

 с включениями чарнокитов с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-эндербито-гнейсов, по [Геологическая..., 1990] (2,65, 2,67, 2,68, 2,70, 2,72, 2,76, 2,80, 2,82, 2,83 г/см³);

 с включениями кристаллосланцев и кварцитов железистых (2,75, 2,78, 2,81 г/см³);


 в чистом виде (2,63, 2,71 г/см³);


 с включениями кристаллосланцев, а также чарнокитов с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-эндербито-гнейсов, по [Геологическая..., 1990] (2,69 г/см³)


 в чистом виде, а также с включениями кристаллосланцев (2,64 г/см³);


 с включениями серпентинитов (2,62, 2,73 г/см³).


чарнокит-эндербитовый лейкократовый (эндербиты, чарнокиты с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-эндербито-гнейсы, по [Геологическая..., 1990]):


 с включениями кристаллосланцев (2,80-2,82 г/см³);

 в чистом виде (2,65, 2,69, 2,74, 2,77 г/см³);


 с включениями чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатосодержащих, по [Геологическая..., 1990] (2,71, 2,73 г/см³);


 с включениями кристаллосланцев (2,69 г/см³);


 с включениями кристаллосланцев и метагабброидов (2,76 г/см³);


 с включениями серпентинитов (2,64 г/см³).


граниты побужского (чудново-бердичевского) типа (розовые и серовато-розовые полосчатые гранат-биотитовые гнейсо-граниты, редко массивные):


 с включениями кристаллосланцев, кварцитов железистых, плаггиогнейсов, амфибол-биотитовых, гнейсов биотитовых (2,82 г/см³);


 с включениями метагабброидов - амфиболитов, габбро, габбро-амфиболитов (2,80 г/см³);


 с включениями эндербитов, чарнокитов с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов - эндербито-гнейсов, по [Геологическая..., 1990] (2,77 г/см³);

 с включениями эндербитов, чарнокитов с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов - эндербито-гнейсов, по [Геологическая..., 1990], а также железистых кварцитов, кристаллосланцев и плаггиогнейсов, амфибол-биотитовых, гнейсов биотитовых (2,75, 2,76 г/см³);

 в чистом виде, а также с включениями кристаллосланцев (2,70, 2,72 г/см³);


 с включениями эндербитов, чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов - эндербито-гнейсов, часто гранатосодержащих, по [Геологическая..., 1990], а также чарнокитов с большими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-эндербито-гнейсов, по [Геологическая..., 1990] (2,66, 2,67, 2,70, 2,81 г/см³);

 в чистом виде, а также с включениями эндербитов, чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатосодержащих, по [Геологическая..., 1990] (2,65 г/см³);

 в чистом виде, с включениями эндербитов, чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плаггиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатосодержащих, по [Геологическая..., 1990], а также плаггиогнейсов, амфибол-биотитовых, гнейсов биотитовых (2,64 г/см³);


 в чистом виде (2,61-2,63 г/см³).

граниты Кировоградского типа (серые и розово-серые средне-зернистые порфириподобные граниты):


 с включениями кристаллосланцев (2,65 г/см³);

 в чистом виде (2,60, 2,62 г/см³).

граниты уманского типа (серые и розово-серые граниты биотитовые, неравномернозернистые до порфириовидных):

 в чистом виде (2,62 г/см³).

граниты Гайсинского типа (плаггиограниты амфибол-биотитовые, иногда с гранатом, ортопироксеном):

 в чистом виде (2,63 г/см³).

Окончание рис. 4.

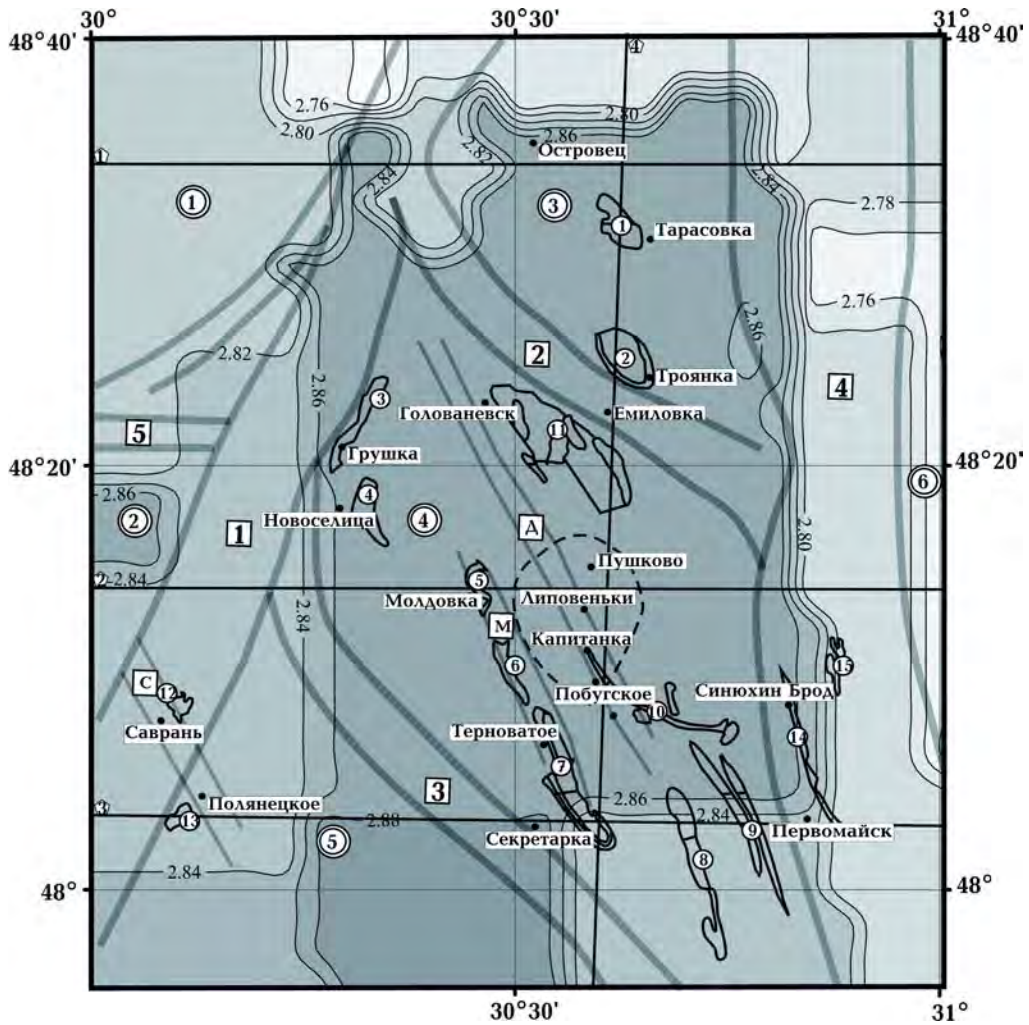


Рис. 6. Схема распределения плотности (г/см^3) на глубине 10 км. Условные обозначения см. на рис. 1.

новской и Емиловской зон разломов фиксируется снижение плотности до $2,80 \text{ г/см}^3$. Юго-восток Новопавловского блока характеризуется повышенными плотностями (свыше $2,88 \text{ г/см}^3$). В пределах Уманского блока плотность пород однородна ($2,80 \text{ г/см}^3$), за исключением северо-восточной части, где она понижается до $2,76 \text{ г/см}^3$. К востоку от Первомайской зоны разломов присутствуют породы с плотностью $2,76\text{—}2,78 \text{ г/см}^3$.

На срезе 20 км (рис. 7) восточная часть территории исследований (Первомайская зона разломов и площадь развития гранитоидов кировоградского типа) характеризуется наименьшей плотностью ($2,86\text{—}$

$2,89 \text{ г/см}^3$) с понижением к востоку. На севере Ятранского блока плотности возросли до $2,88\text{—}2,92 \text{ г/см}^3$, т. е. здесь в интервале глубин 10—20 км градиент нарастания плотности с глубиной выше по сравнению с соседними блоками. Это хорошо увязывается с данными, полученными в результате исследований вдоль широтных зон разломов УЩ и ДДВ [Старостенко и др., 2012]. В центральной части этого блока и области пересечения Тальновской зоны разломов с Емиловской плотности пород возрастают до $2,93 \text{ г/см}^3$. Первомайск-Голованевский блок имеет наибольшие значения плотности на юго-западе ($2,92\text{—}2,94 \text{ г/см}^3$). В северной его

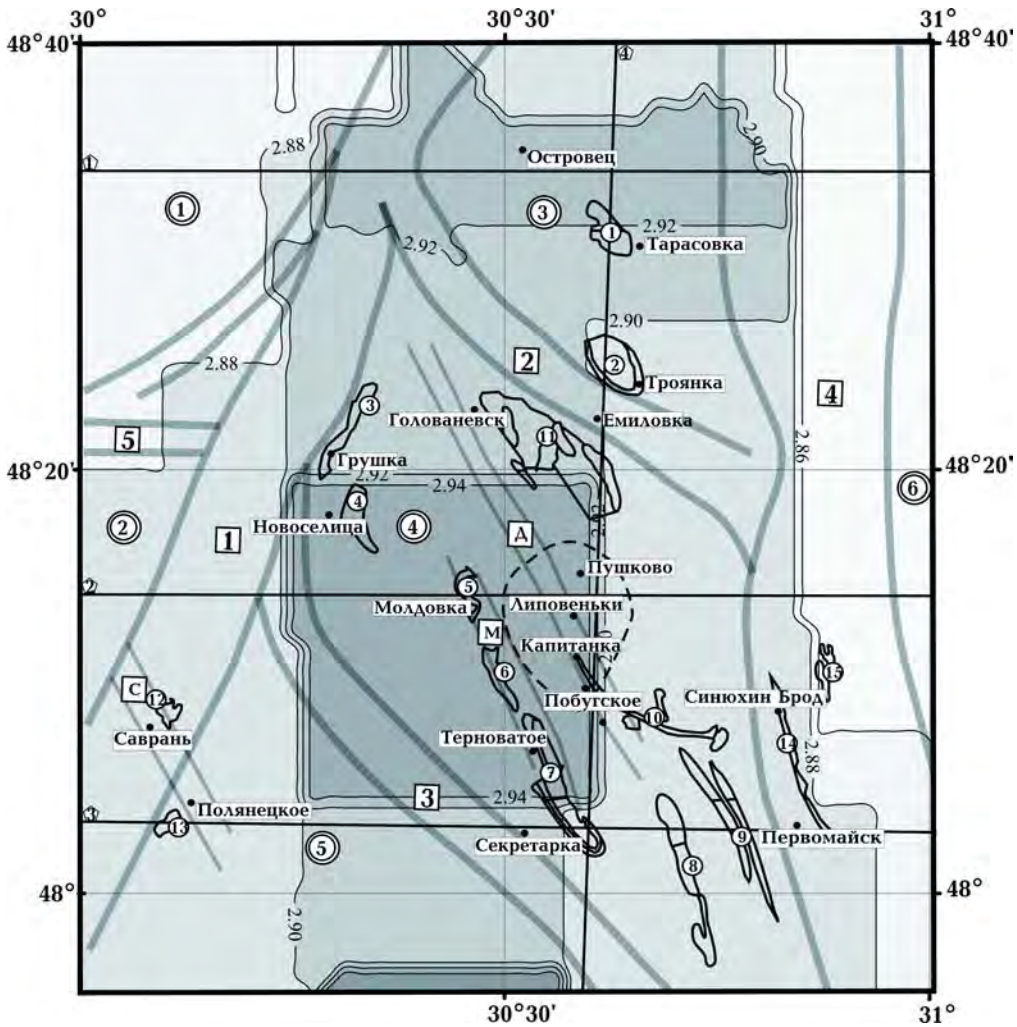


Рис. 7. Схема распределения плотности (г/см^3) на глубине 20 км. Условные обозначения см. на рис. 1.

части, а также на юго-западе Ятранского и юге Новопавлковского плотности колеблются от 2,92 до 2,90 г/см^3 . Западная часть Новопавлковского и юг Бандуровского блока, а также юг Тальновской зоны разломов аналогично предыдущему срезу характеризуются меньшими плотностями (2,89—2,90 г/см^3). В Уманском блоке плотности пород 2,87 и 2,88 г/см^3 и только на северо-востоке отмечается область самых низких значений плотности (2,86 г/см^3). Восточная часть Первомайск-Голованевского блока и юго-восточная Ятранского характеризуются уменьшением значений плотности к востоку, т. е. к Первомайской зоне разломов от 2,90 до 2,89 г/см^3 .

На срезе 30 км (рис. 8) наименьшие плотности (2,88 г/см^3) характерны для большей части Бандуровского блока. Северная часть Уманского блока и юго-запад Новопавлковского представлены породами с плотностью 2,94—2,96 г/см^3 . Ятранский блок в северо-восточной части, примыкающий к Субботско-Мошоринской широтной зоне разломов, характеризуется плотностью 2,96 г/см^3 , которая к юго-западу увеличивается до 2,97 г/см^3 . Для Первомайск-Голованевского блока и восточной части Новопавлковского характерны плотности 2,98 и 2,99 г/см^3 . Северо-восточная часть Первомайск-Голованевского блока и большая часть Первомай-

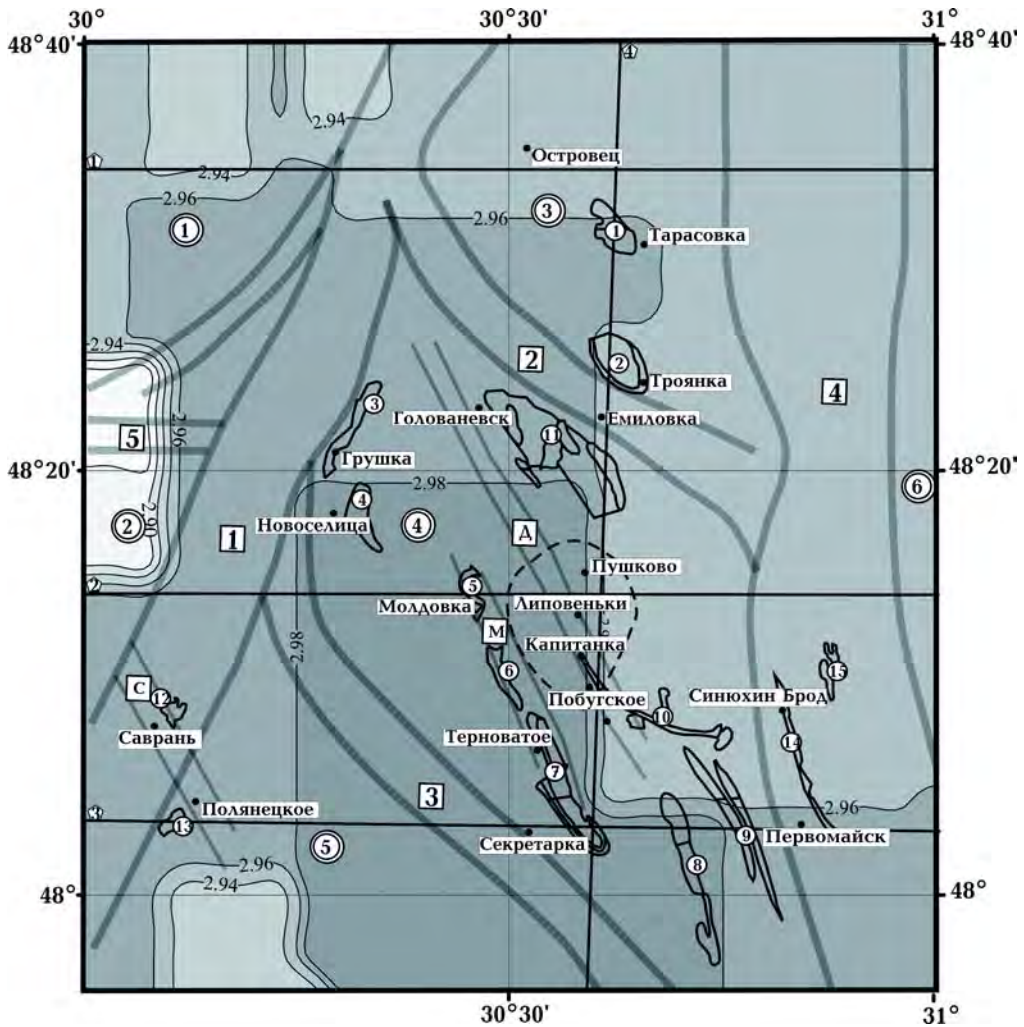


Рис. 8. Схема распределения плотности (г/см^3) на глубине 30 км. Условные обозначения см. на рис. 1.

ской зоны разломов представлены породами с плотностью ниже $2,96 \text{ г/см}^3$. Тальновская зона разломов (кроме северной части), северная часть Первомайск-Голованевского, юг Уманского и северо-запад Новопапавловского блоков, а также юг Первомайской зоны разломов характеризуются однородной плотностью ($2,97 \text{ г/см}^3$). Плотности пород Тальновской зоны разломов на крайнем северо-востоке несколько понижены ($2,93\text{--}2,96 \text{ г/см}^3$). Врадиевская зона разломов на этом срезе представлена породами с плотностью $2,99 \text{ г/см}^3$.

Раздел Мохо по характеру глубины залегания четко разделен на восточную часть с поднятием до $45\text{--}47 \text{ км}$ и западную с

погружением до $50\text{--}65 \text{ км}$, которое увеличивается с севера на юг (рис. 9). Граница раздела на восточную и западную части сечет изучаемую территорию в северо-западном направлении. Блоки Ятранский и Первомайск-Голованевский по своему расположению не коррелируют со ступенью на разделе Мохо. Плотность на разделе Мохо также резко отличается по своему значению: к востоку от ступени составляет $3,05; 3,07$ и $3,08 \text{ г/см}^3$, а к западу — $3,18$ и $3,20 \text{ г/см}^3$ (рис. 10). В Уманском блоке плотности на разделе Мохо понижены по сравнению с западной частью Голованевской шовной зоны и составляют $3,12\text{--}3,18 \text{ г/см}^3$, за исключе-

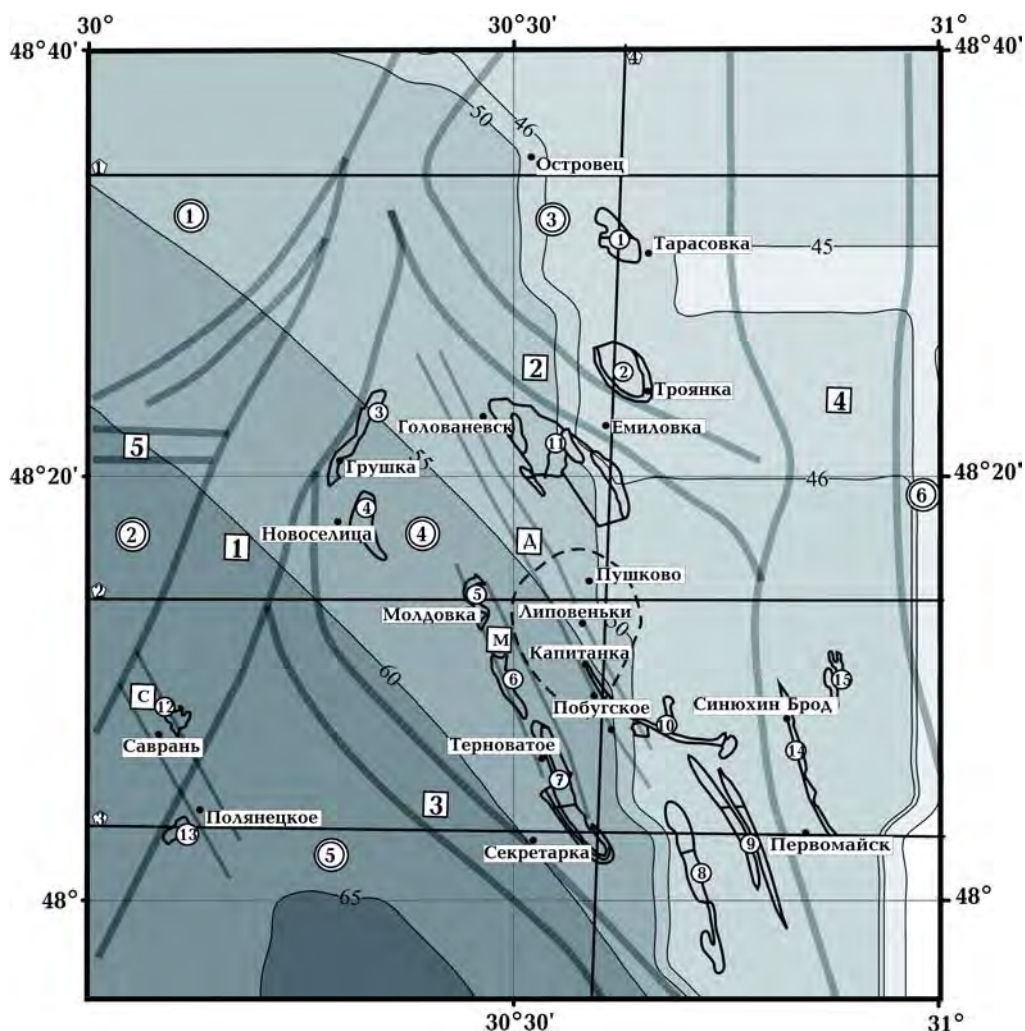


Рис. 9. Глубина залегания раздела Мохо (км). Условные обозначения см. на рис. 1.

нием северо-восточной части, где плотность увеличивается до $3,20 \text{ г/см}^3$. Плотность пород на этой глубине в районе Субботско-Мошоринской широтной зоны контролируется степенью на разделе Мохо: к востоку ее значение $3,08 \text{ г/см}^3$, а к западу $3,20 \text{ г/см}^3$. Тальновская, Вradiевская и северо-западная часть Емиловской зоны разломов сложены породами с плотностью $3,20 \text{ г/см}^3$.

Распределение плотности в отдельных структурах с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента. Особое внимание при моделировании было уделено железистым кварцитам, которые в большинстве случаев присутствуют в

сочетании с гнейсами гранат-биотитовыми (структуры с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента). В первичной модели железистые кварциты принимались с плотностью $3,17 \text{ г/см}^3$, а гнейсы гранат-биотитовые — $3,00 \text{ г/см}^3$ [Гинтов и др., 2016]. В процессе моделирования оказалось, что значения плотности в большинстве случаев завышены. Проводились расчеты для каждой из таких структур. При этом определялись возможные плотности, а также мощности, т. е. глубина их распространения. Для этого велись расчеты залегания тел от поверхности до 0,5; 1—5 км, соответствующие выводам работы [Корчин и др., 2016] о том,

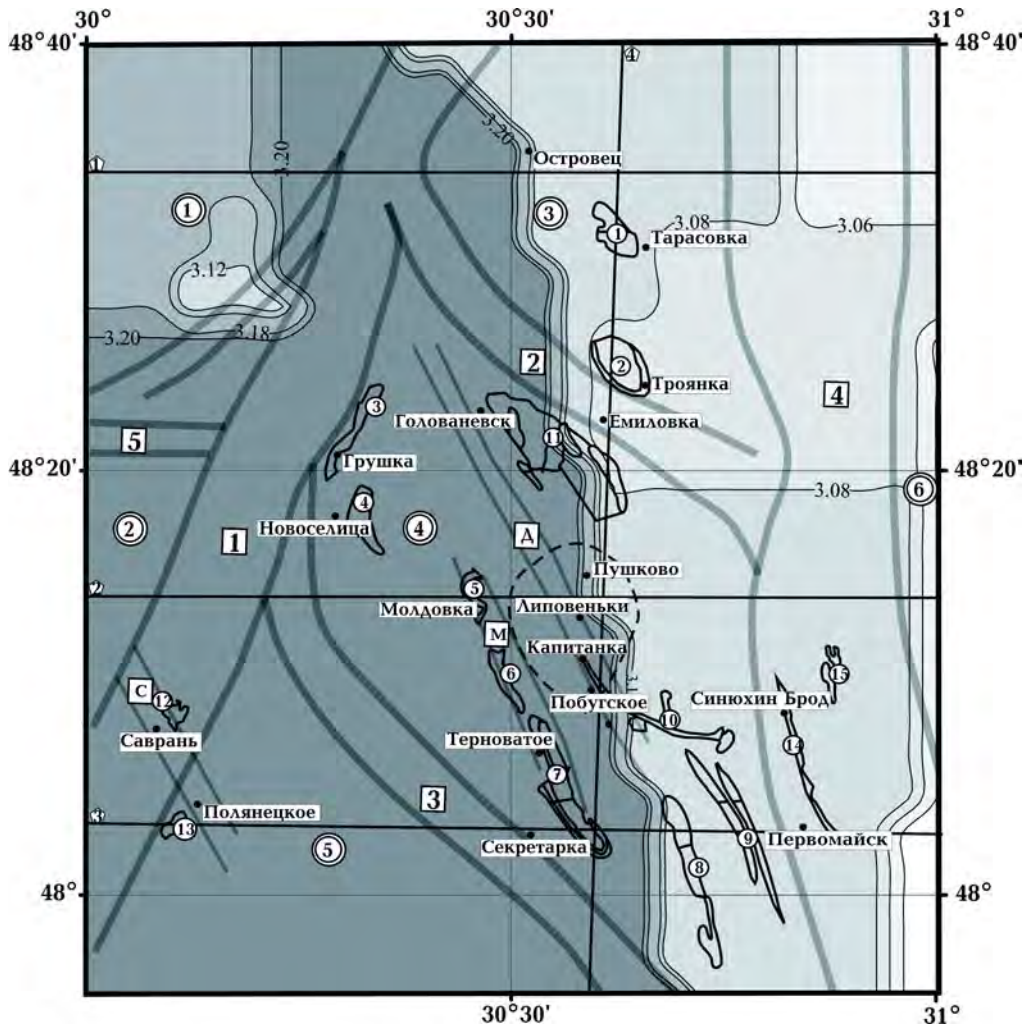


Рис. 10. Схема распределения плотности (г/см^3) на разделе Мохо. Условные обозначения см. на рис. 1.

что анортозитовые породы могут быть представлены в виде пластовой залежи в толще гранитов в интервале глубин 0,5—4 км. Выяснилось, что тела с аномальной плотностью распространяются до 1,5 км, а значение плотности в них уменьшается с большим градиентом до 2,97 и 3,00 г/см^3 (см. рис. 1, 3). При этом подстилающие породы также имеют повышенную плотность под каждым аномальным телом по сравнению с вмещающими породами (рис. 11).

На территории Ятранского блока расположены две структуры — Тарасовская и Троянская (см. рис. 1, 3, г, 11). Сложны они габбро-амфиболитами, среди ко-

торых присутствуют включения кристаллосланцев двупироксеновых, ортопироксеновых, биотит-ортопироксеновых, гранат-ортопироксеновых. При расчетах плотности претерпели изменения в сторону уменьшения на фундаменте с 3,00 до 2,81 г/см^3 в каждой из структур. Кроме того, возникла необходимость разделить Тарасовскую структуру на две равные части (северную и южную), отличающиеся между собой значением плотности в интервале глубин 1,5—10 км (см. рис. 3, г, 5, 11). Характер изменения плотности с глубиной различен в обеих структурах. В Тарасовской до глубины 1,5 км плотности уменьшаются от 2,81 до 2,72 г/см^3

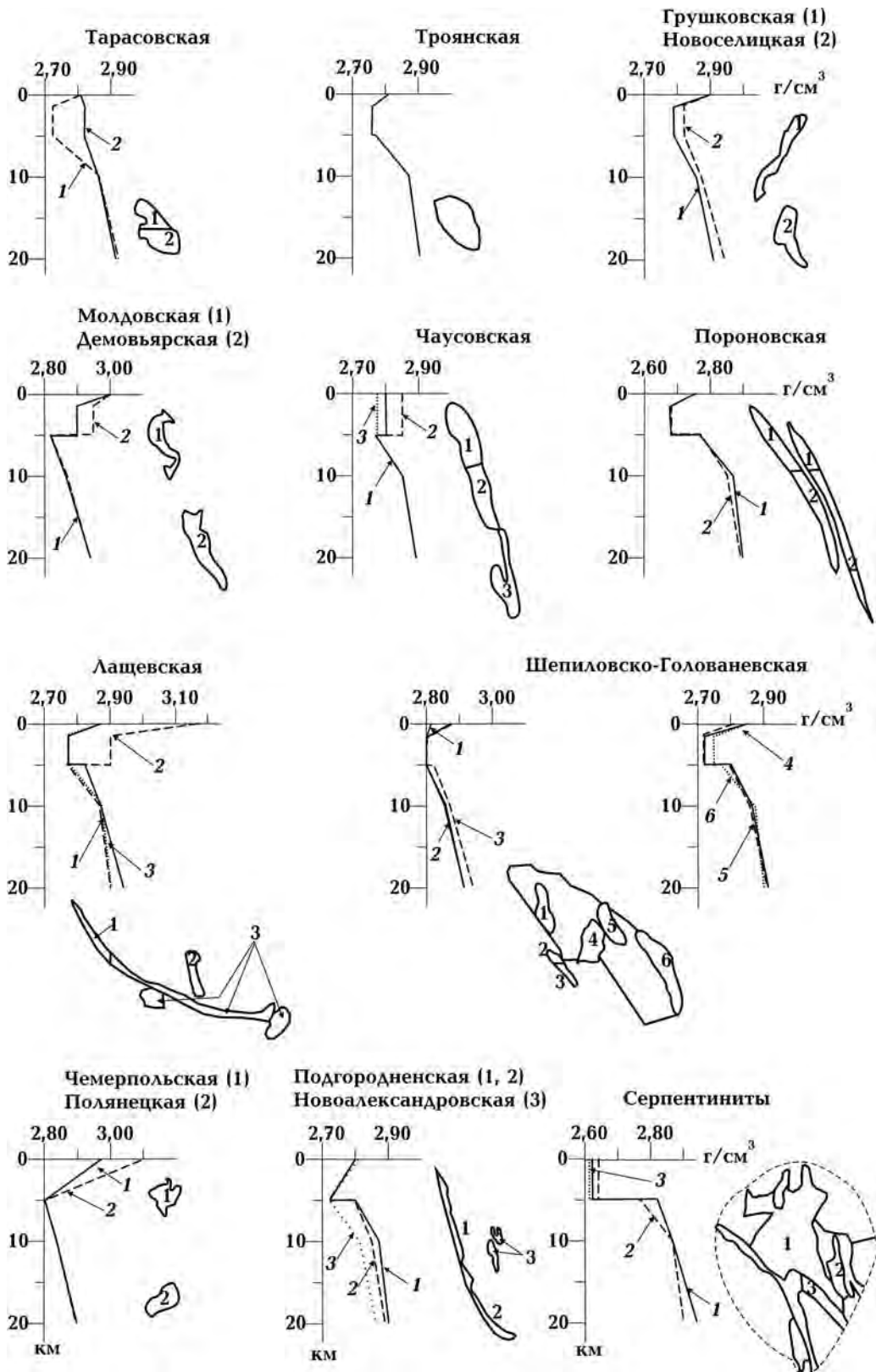


Рис. 11. Графики изменения плотности (г/см^3) с глубиной в структурах с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента и серпентинитах. Контуры структур см. на рис. 1. Цифрами обозначены тела структур и соответствующее им распределение плотности с глубиной в них.

в южной части и повышаются от 2,81 до 2,82 г/см³ в северной. В Троянской структуре от поверхности до 1,5 км плотности уменьшаются от 2,81 до 2,76 г/см³. В интервале глубин 1,5—5 км наблюдается зона постоянной плотности: 2,82 г/см³ для южной, 2,72 г/см³ для северной части Тарасовской структуры и 2,76 г/см³ для Троянской. Затем плотность возрастает к 10 км до 2,86 г/см³ в Тарасовской структуре и до 2,87 г/см³ в Троянской. В интервале глубин 10—30 км присутствуют незначительные колебания плотности (0,01—0,02 г/см³) в ту или иную сторону в обеих структурах.

В пределах Первомайск-Голованевского блока находится большинство аномальных структур. На границе с Тальновской зоной разломов расположены две структуры: *Грушковская* и *Новоселицкая*. Сложены они железистыми кварцитами и гнейсами биотитовыми практически в равных долях. На фундаменте плотность в окончательной модели в обеих структурах 2,90 г/см³, однако с глубиной она различается по всей мощности земной коры: в Новоселицкой выше на 0,01—0,03 г/см³ (см. рис. 1, 11). Структуры *Молдовская*, *Демовьярская* и *Секретарская* расположены в пределах Молдовской зоны скалывания (см. рис. 1). Молдовская структура сложена железистыми кварцитами и гнейсами биотитовыми, представлена в модели суммарной расчетной плотностью на поверхности фундамента 3,00 г/см³, которая к глубине 1,5 км уменьшается до 2,90 г/см³ и к 5 км до 2,82 г/см³ (см. рис. 1, 3, б, 11) Демовьярская структура (см. рис. 1, 11) сложена габбро-амфиболитами со значением плотности на фундаменте 3,00 г/см³, на 1,5 км 2,95 г/см³ и на 5 км сравнивается со значением плотности в Молдовской.

Секретарская структура (третья в этом ряду) сложена габбро-амфиболитами с присутствием серпентинитов в северо-западной части и выходами железистых кварцитов в центральной и юго-восточной, что отразилось в расчетной плотности. Северо-западная часть структуры, в

которой присутствуют серпентиниты, учтена в модели с плотностью 2,70 г/см³ на поверхности фундамента с увеличением ее значений до 2,81 на 1,5 км и до 2,82 г/см³ на 5 км. Участок габбро-амфиболитов, в котором отсутствуют серпентиниты, на поверхности фундамента характеризуется плотностью 2,87 г/см³. Глубже распределение плотности аналогично северо-западной части. Юго-восточная часть Секретарской структуры разделена в модели на два участка, которые отличаются значениями плотности и изменением ее с глубиной. Выходы железистых кварцитов на поверхности фундамента характеризуются плотностью 3,00 г/см³. Второй участок сложен габбро-амфиболитами с плотностью на фундаменте 2,87 г/см³. Как и в других структурах этого типа, плотность уменьшается до значений 2,81 г/см³ на глубине 1,5 км, но с 5 до 30 км на северо-западе участка она выше на 0,04—0,05 г/см³, чем на юго-востоке (см. рис. 1, 12).

Чаусовская структура сложена габбро-амфиболитами с включением на северо-западе кварцитов полевошпатовых кошаро-александровского таксона, а в центральной части и юго-восточной — чарнокитов в разных соотношениях. Эти три участка различаются между собой распределением плотности в интервале глубин от поверхности фундамента до 5 км. Северо-западная часть на поверхности фундамента характеризуется плотностью 2,80 г/см³, центральная — 2,85 г/см³, а юго-восточная 2,77 г/см³. Основное расхождение в значении плотности наблюдается на глубине 1,5 км: в центральной части она выше на 0,05 г/см³, чем в северо-западной, и на 0,08 г/см³, чем в юго-восточной. К глубине 5 км плотность во всех трех частях становится одинаковой и составляет 2,77 г/см³. Глубже 10 км она нарастает во всех трех участках с одинаковым градиентом (см. рис. 1, 3, в, 11).

К северо-востоку от Чаусовской структуры расположена *Пороновская*, состоящая из двух тел, сложенных габбро-амфиболитами с включением чарнокитов.

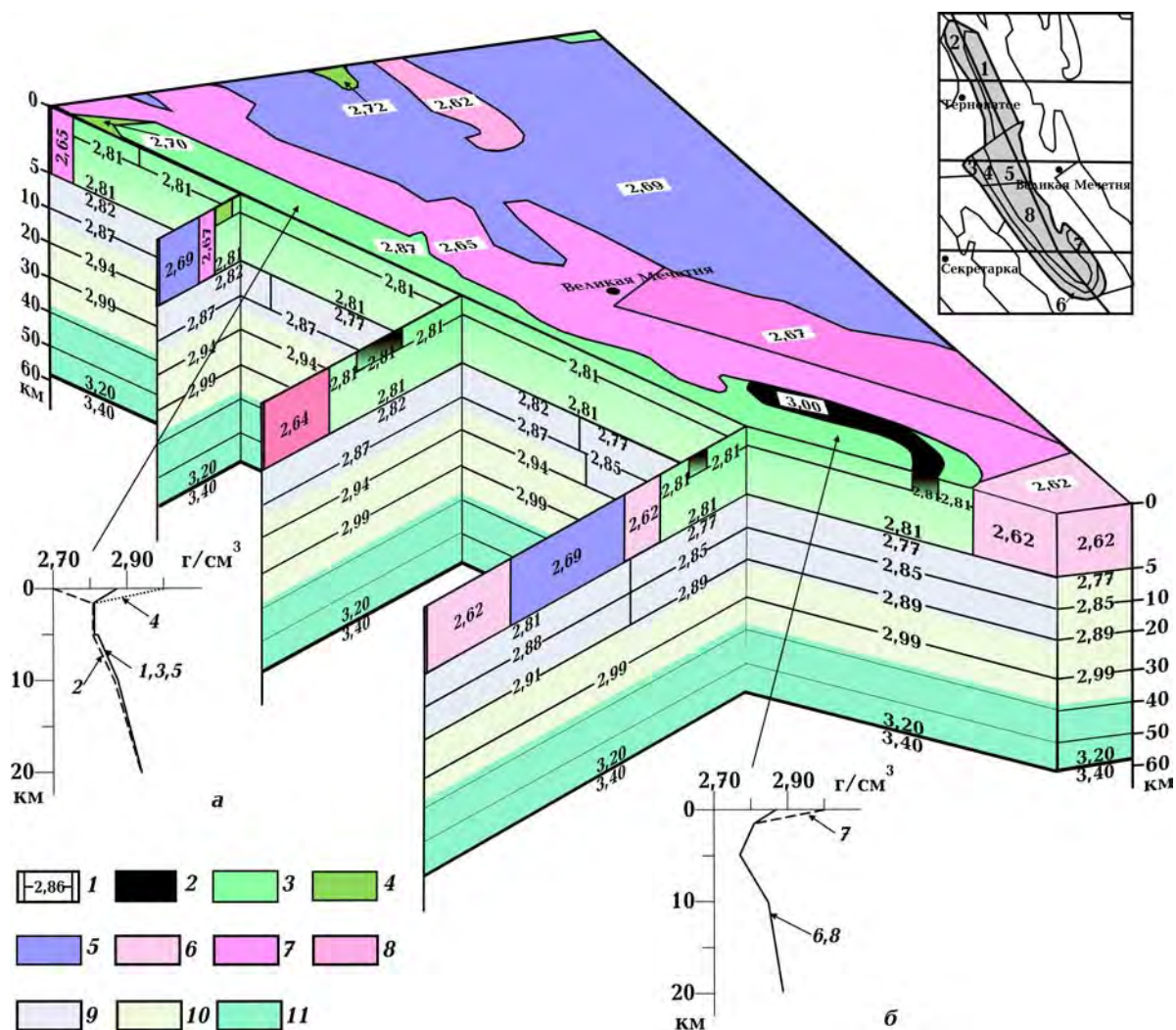


Рис. 12. Блок-диаграмма, показывающая распределение плотности (г/см^3) на поверхности фундамента и глубинные плотностные неоднородности в коре Секретарской структуры. На графиках показано изменение плотности (г/см^3) с глубиной в северо-западной (а) и юго-восточной (б) частях структуры. Номерами показаны тела структуры (см. врезку): 1 — контуры и значение плотности (г/см^3) расчетных тел; геолого-петрофизические таксоны по [Гинтов и др., 2016]: молдавский: 2 — кварциты железистые, в основном магнетит-двупироксеновые, кальцифилы магнетитовые рудные; капитановско-геренюхинский, тарноватский, кумаровский, троянский (метагабброиды—амфиболиты, габбро, габбро-амфиболиты): 3 — в чистом виде, 4 — с включениями серпентинитов; чарнокит-эндербитовый меланократовый (эндербиты, чарнокиты с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плагиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатсодержащих, по [Геологическая ..., 1990]): 5 — с включениями эндербито-гнейсов, по [Геологическая ..., 1990]; граниты побужского (чудново-бердичевского) типа: 6 — с включениями эндербитов, чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плагиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатсодержащих, по [Геологическая ..., 1990], а также эндербито-гнейсов, по [Геологическая ..., 1990]; 7 — в чистом виде, а также с включениями эндербитов, чарнокитов с мелкими включениями кристаллосланцев двупироксен-плагиоклазовых и розовых гранитов-чарнокитов, часто гранатсодержащих, по [Геологическая ..., 1990]; 8 — в чистом виде; условно выделенные слои вещественного состава земной коры: 9 — "диоритовый", 10 — "базальтовый"; 11 — коромантийная смесь.

Расчетная плотность на поверхности фундамента $2,75 \text{ г/см}^3$ в каждом из тел. На глубине 1,5 и 5 км они характеризуются плотностью $2,68$ и $2,77 \text{ г/см}^3$ соответственно. С 10 до 30 км структура по плотностным параметрам разделена на северо-западную (меньшую) часть и юго-восточную (большую), в которой плотность ниже на $0,02$ — $0,01 \text{ г/см}^3$, чем на северо-западе (см. рис. 1, 3, в, 11).

Расположенная вблизи населенных пунктов Капитанка и Побугское *Лащевская* структура сложена также габбро-амфиболитами с плотностью на поверхности фундамента $2,87 \text{ г/см}^3$. С глубиной по плотностным параметрам она делится на два участка: меньший расположен на северо-западе, а более крупный занимает всю остальную часть структуры. Аналогично описанным структурам, здесь изменяется плотность к 5 км до $2,77 \text{ г/см}^3$ в обоих участках, глубже (после 20 км) расхождение в значении плотности на $0,03$ — $0,04 \text{ г/см}^3$ (в северо-западной части она выше). Примыкающее к этой структуре с севера тело сложено железистыми кварцитами на поверхности фундамента с плотностью $3,17 \text{ г/см}^3$. С глубиной плотность в нем уменьшается до $2,90$ на глубине 1,5 км и до $2,77 \text{ г/см}^3$ на 5 км. Глубже по плотностным параметрам тело идентично юго-восточной части предыдущей структуры (см. рис. 1, 3, г, 11).

К юго-востоку от Голованевска находится *Шепиловско-Голованевская* структура, состоящая из пяти участков выходов габбро-амфиболитов, три из которых осложнены присутствием железистых кварцитов. Плотностная характеристика индивидуальна для каждого из них. На поверхности фундамента значения плотности $2,81$; $2,85$ и $2,87 \text{ г/см}^3$. На 1,5 км и 5 км одинаковы и составляют $2,72$; $2,75$ и $2,80 \text{ г/см}^3$. Глубже разность составляет $0,01$ — $0,02 \text{ г/см}^3$. Закономерности изменения плотности с глубиной, зависящие от состава пород, на поверхности не прослеживаются.

В пределах западной части Новопавловского блока присутствуют две аномаль-

ные структуры. *Чемерпольская*, сложенная гнейсами биотитовыми с присутствием в центре железистых кварцитов и *Полянецкая*, в которой железистые кварциты окаймлены габбро-амфиболитами. В плотностной модели они различаются между собой только значением плотности на поверхности фундамента — в Чемерпольской $2,97$, а в Полянецкой $3,10 \text{ г/см}^3$. В этих структурах плотность уменьшается с глубиной до значения $2,81 \text{ г/см}^3$ на 5 км, а затем увеличивается до $2,83 \text{ г/см}^3$ на 10 км. Глубже плотность нарастает с глубиной одинаково в обеих структурах (см. рис. 1, 3, в, 11).

В пределах Первомайской зоны разломов присутствуют две структуры с выходами на поверхность габбро-амфиболитов, одна из которых называется *Подгородненская*, а другая, которая расположена к северо-востоку от нее, *Новоалександровская*. В модели они учтены с поверхности с аномальной плотностью $2,80$ и $2,81 \text{ г/см}^3$ соответственно. До глубины 5 км изменение плотности в обеих структурах идентично, т. е. до глубины распространения аномальных тел. Наибольшее расхождение фиксируется в интервале глубин 5—20 км (плотность на $0,06 \text{ г/см}^3$ выше в Подгородненской структуре) (см. рис. 1, 3, в, 11).

При создании плотностной модели структур, сложенных чарнокитами и эндербитами с плотностью $2,71$ и $2,74 \text{ г/см}^3$, но в которых присутствуют серпентиниты, потребовалось понижение значения плотности как на поверхности фундамента, так и до глубины 5 км ($2,61$; $2,62$; $2,64 \text{ г/см}^3$). Во всех этих структурах на глубине 5 км присутствует скачок плотности $0,08$; $0,11$; $0,19 \text{ г/см}^3$ в сторону уплотнения, что, возможно, свидетельствует о распространении серпентинитов только до этих глубин. Глубже в этих структурах плотность изменяется в соответствии с сейсмическими данными (см. рис. 11).

Выводы. Исследуемая территория в плотностной модели с поверхности до глубины 20 км делится по своему строению на центральную, восточную и западную ча-

сти. Центральная, которая соответствует большей части ГШЗ, представлена породами, плотность которых значительно выше, чем в западной и особенно в восточной. С глубины 30 км и до раздела Мохо выделяются две части — западная и восточная, которые разделены резкой субмеридиональной ступенью в разделе Мохо от 46 до 55—65 км, причем ступень проходит вдоль осевой линии ГШЗ. Плотности пород значительно выше в западной части как по латерали, так и по глубине.

Локальные тела с аномально высокой плотностью на поверхности фундамента, сложенные в основном железистыми кварцитами, габбро-амфиболитами, кристаллосланцами, гнейсами гранат-биотитовыми, характеризуются незначитель-

ными размерами и глубиной залегания. По предварительным данным трехмерного плотностного моделирования глубина их погружения с аномально высокой плотностью до 1,5 км, а ниже (до глубины 5 км) их плотность хоть и снижается, но выше относительно вмещающих неоднородностей. Плотностное моделирование этих структур необходимо продолжить в более крупном масштабе с применением различных вариантов соотношения их формы и плотности в разрезе.

В северной части Ятранского блока породы гранитизированы до глубины 5 км, особенно в области, примыкающей к Субботско-Мошоринской широтной зоне.

В плотностной модели четко отражаются зоны нарушений разуплотнением пород по всему разрезу земной коры.

Список литературы

- Геологическая карта кристаллического основания масштаба 1 : 200 000. Лист М-36-XXXI (Первомайск). Киев: Фонд ГП "Украинская геологическая компания", 1990.*
- Гинтов О.Б., Ентин В.А., Мычак С.В., Павлюк В.Н., Зюльце В.В.* Структурно-петрофизическая и тектонофизическая основа геологической карты кристаллического фундамента центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 3—28. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.
- Гинтов О.Б., Орлюк М.И., Мычак С.В., Баркариева М.И., Фарфуляк Л.В.* Субботско-мошоринский этап деформирования земной коры Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 6. С. 23—38.
- Ентин В.А.* Геолого-структурные особенности и прогнозная оценка ресурсов железорудных месторождений среднего Побужья по геолого-геофизическим данным: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 1987. 32 с.
- Ильченко Т.В.* Скоростная модель земной коры и верхов мантии Кировоградского блока Украинского щита по данным ГСЗ (профили Бабанка—Пятихатки и Черкассы—Новый Буг). *Геофиз. журн.* 2003а. Т. 25. № 6. С. 30—43.
- Ильченко Т.В.* Строение земной коры и верхов мантии Кировоградского блока Украинского щита по данным ГСЗ (модель Бабанка—Пятихатки). *Доп. НАН України.* 2003б. № 7. С. 100—106.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П.* Зоны разуплотнения земной коры центральной части Украинского щита (по материалам петрофизического и сейсмогравитационного моделирования). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 84—99. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781>.
- Красовский С.С.* Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 261 с.
- Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Легостаева О.В.* Трехмерная

- плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2007а. Т. 29. № 2. С. 17—41.
- Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Легостаева О.В. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2007б. Т. 29. № 5. С. 3—27.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. Киев: Наук. думка, 1986. 200 с.
- Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII. Гл. ред. А.В. Чекунов. Киев: Наук. думка, 1988. 170 с.
- Омельченко В.Д., Трипольский А.А., Носенко А.Б. Скоростные неоднородности и рельеф раздела Мохоровичича Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 6. С. 113—126.
- Павленкова Н.П., Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В. Обобщенная геофизическая модель земной коры некоторых геоструктур Украины. *Геофиз. сборник.* 1974. Вып. 62. С. 16—28.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Савченко А.С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей. *Геофиз. журн.* 2015а. Т. 37. № 1. С. 42—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322>.
- Старостенко В.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Савченко А.С., Легостаева О.В. Плотностная неоднородность земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Геофиз. журн.* 2015б. Т. 37. № 3. С. 3—21. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111089>.
- Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Шарыпанов А.В., Савченко А.С., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. Интерактивный программный комплекс Isohypse для построения трехмерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 30—42. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107720>.
- Старостенко В.И., Шарыпанов В.М., Савченко А.С., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Куприенко П.Я. Об автоматизированной интерактивной обработке геофизических изображений геологических и геофизических объектов. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 1. С. 54—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i1.2011.117325>.
- Схема глубинного строения литосферы юго-западной части Восточно-Европейской платформы. 1 : 1 000 000. Под ред. А.В. Чекунова. Киев: Изд. Госкомгеологии Украины, 1992.
- Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: КаНЦ РАН, 2004. 159 с.
- Ярошук М.А. Железорудные формации Белоцерковско-Одесской металлогенической зоны (западная часть щита). Киев: Наук. думка, 1983. 224 с.
- Artemieva I. M., 2011. The lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge: Cambridge University Press. 773 p.

Three-dimensional Earth's crust density model of the central part of the Golovanevsk suture zone of the Ukrainian Shield

V. I. Starostenko, P. Ya. Kuprienko, I. B. Makarenko, A. S. Savchenko, O. V. Legostaeva, 2018

Three-dimensional Earth's crust density model of the central part of the Golovanevsk suture zone of the Ukrainian Shield at the scale 1 : 50 000 has been given. Model calculations were carried out using automated complex GMT-Auto. The model takes into account the change in density both laterally in accordance with petrophysical data, and with depth in accordance with seismometry data. In this case, an abrupt change in the density in one direction or another, of the inversion zone and zone of constant density was taken into consideration. The density of rated bodies on the surface of the basement was defined based on the percentage ratio of the constituent rocks, in the depth — from the dependence of density on velocity. The block structure of the Earth's crust upper part, which was previously revealed by seismometry in some areas of the zone, was confirmed. During the modeling it was found out that the structure of investigated territory in the density model from the surface to a depth of ≥ 20 km is divided into the central, eastern and western parts. The central one, which corresponds to the most part of the Golovanevsk suture zone, is represented by rocks, whose density is much higher than in the western and especially in the eastern parts. The existence of essentially decompacted rocks in the eastern and northern parts of the zone to a depth of 10 km indicates the presence of granitization processes in the past. From the depth of 30 km and up to the Moho discontinuity two parts are distinguished: the western and the eastern. These parts are separated by a sharp submeridional stage in the Moho discontinuity from 46 to 55—65 km, which are traced along the center line of the Golovanevsk suture zone. The density of rocks is much higher in the western part both in area and with depth. The density distribution across the entire crustal section was obtained both in local structures with an abnormally high density on the surface of the basement (represented by gabbro amphibolites, ferruginous quartzites, crystal shales and gneiss garnet-biotite gneisses) and in the enclosing rocks. The performed calculations made it possible in the first approximation to determine the nature of the density variation with depth in the anomalous structures and to establish the depth of their propagation. According to preliminary data, these structures can be traced to a depth of 3—5 km.

Key words: the Golovanevsk suture zone, density, Earth's crust, structures with an abnormally high density on the surface of the basement.

References

- Geological map of the crystalline base of the scale of 1 : 200 000. Sheet M-36-XXXI (Per-vomaik), 1990. Kiev: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company" (in Russian).
- Gintov O. B., Yentyn V. A., Mychak S. V., Pavlyuk V. N., Zyuysle V. V.*, 2016. Structural-petrophysical and tectonophysical base of geological map of crystalline basement of the central part of the Golovanevsk suture zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(3), 3—28 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.

- Gintov O. B., Orlyuk M. I., Mychak S. V., Bakarzhieva M. I., Farfulyak L. V., 2008. Subbotko-Moshorinsky stage of the Earth's crust deformation of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 30(6), 23—38 (in Russian).
- Entin V. A., 1987. Geologist-structural features and prognosis estimation of resources of iron-ore deposit of Middle Bug area from geolog-geophysical data: Abstract of thesis for the degree of candidate of geol.-min. sci. Kiev, 32 p. (in Russian).
- Ilchenko T. V., 2003a. The structure of the Earth's crust and the uppermost mantle of the Kirovograd block of the Ukrainian Shield by DSS data (Babanka—Pyatikhatki and Cherkassy—Noviy Bug profiles). *Geofizicheskiy zhurnal*, 25(6), 30—43 (in Russian).
- Ilchenko T. V., 2003b. Structure of the crust and upper mantle of the Kirovograd block Ukrainian Shield according to the NHS (model Babanka—Piatihatki). *Dopovidi NAN Ukrainy*, (7), 100—106 (in Russian).
- Korchin V. A., Burtnyy P. A., Kobolev V. P., 2016. Zones of decompaction of the Earth's crust of the central part of the Ukrainian Shield (according to materials of petrophysical and seismogravitational modeling). *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(3), 84—99 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781>.
- Krasovsky S. S., 1981. Reflection of the dynamics of the continental crust in the gravitational field. Kiev: Naukova Dumka, 261 p. (in Russian).
- Kuprienko P. Ya., Makarenko I. B., Starostenko V. I., Legostaeva O. V., 2007a. Three-dimensional density model of the crust and upper mantle of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(2), 17—41 (in Russian).
- Kuprienko P. Ya., Makarenko I. B., Starostenko V. I., Legostaeva O. V., 2007b. Three-dimensional density model of the crust and upper mantle of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(5), 3—27 (in Russian).
- Lebedev T. S., Korchin V. A., Savenko B. Ya., Shapoval V. I., Shepel S. I., 1986. Physical properties of mineral matter under PG-conditions of the lithosphere. Kiev: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian).
- Chekunov A. V. (Ed.), 1988. The lithosphere of Central and Eastern Europe: geotraverse: IV, VI, VIII. Kiev: Naukova Dumka, 170 p. (in Russian).
- Omelchenko V. D., Tripolskiy A. A., Nosenko A. B., 2008. Velocity heterogeneities and the relief of Mokhorovichich discontinuity of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 30(6), 113—126 (in Russian).
- Pavlenkova N. I., Buryanov V. B., Gordienko V. V., 1974. Generalized geophysical model of the Earth's crust of certain geostructures in the Ukraine. *Geofizicheskiy sbornik*, (62), 16—28 (in Russian).
- Starostenko V. I., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Savchenko A. S., 2015a. Software system for automated data interpretation of potential fields (GMT-Auto). *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(1), 42—52 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015.111322>.
- Starostenko V. I., Kuprienko P. Ya., Makarenko I. B., Savchenko A. S., Legostaeva O. V., 2015b. Density heterogeneity of the Earth's crust of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield according to the data of three-dimensional gravity modeling. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(3), 3—21 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111089>.
- Starostenko V. I., Sharypanov V. M., Sharypanov A. V., Savchenko A. S., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Kuprienko P. Ya., 2016. Interactive software package Isohypse for three-dimensional geological and geophysical models, and its practical use. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(1), 30—42 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107720>.
- Starostenko V. I., Sharypanov V. M., Savchenko A. S., Legostaeva O. V., Makarenko I. B., Kuprienko P. Ya., 2011. An automated interactive gra-

- physics process of geological and geophysical objects. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(1), 54—61 (in Russian). <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i1.2011.117325>.
- Scheme of deep lithosphere structure in South-Western part of Eastern-European platform in the scale 1 : 1 000 000, 1992. Ed. A. V. Chekunov. Kiev: Publ. of the State Committee for Geology of Ukraine (in Russian).
- Tripolsky A. A., Sharov N. V.*, 2004. Structure of the Precambrian shields of the Earth lithosphere by seismic data. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS. 159 p. (in Russian).
- Yaroshchuk M. A.*, 1983. Iron ore formations of the Belotserkovsky-Odessa metallogenic zone (the western part of the shield). Kiev: Naukova Dumka, 224 p. (in Russian).
- Artemieva I. M.*, 2011. The lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge: Cambridge University Press. 773 p.
- Tripolsky A. A., Sharov N. V.*, 2004. Structure of