

УДК 551.24

В.М. Макеев¹, Н.В. Макарова², Т.В. Суханова³**ДЕФОРМАЦИИ ГЛУБИННЫХ СЛОЕВ ЗЕМНОЙ КОРЫ
ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,**119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**ФГБУН Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**Sergeev Institute of Geoecology RAS, 101000, Moscow, Ulsansky pereulok, 13*

Рассмотрено внутреннее глубинное строение земной коры Восточно-Европейской платформы и поверхности мантийной литосферы. На представленных схемах трех основных слоев земной коры (нижнего, среднего и верхнего), а также поверхности мантийной литосферы впервые выделены деформации по изменению мощности слоев. Деформации сопоставлены по всем слоям, что позволило выделить активные центры, главные (сквозные) и локальные (проявленные в отдельных слоях) области. Границы этих областей — активные зоны разного ранга. Наблюдаемое сквозное развитие деформаций от слоя к слою или выражение некоторых из них лишь в отдельных слоях свидетельствует о субгоризонтальной расслоенности и субвертикальной делимости земной коры. Деформации глубинных слоев предварительно сопоставлены с приповерхностными новейшими платформенными структурами. Это позволило установить их связь и рассматривать глубинные деформации как новейшие. Исследования актуальны для решения фундаментальных проблем происхождения новейших структур и решения ряда практических задач.

Ключевые слова: деформации глубинных слоев, утолщение и утонение слоев, расслоенность земной коры, геодинамические области, активные центры и зоны, новейшие структуры, платформа.

The article deals with the internal deep structure of the earth's crust of the East European platform and the surface of the mantle lithosphere. The presented charts of the three main layers of the earth's crust — the lower, middle and upper and the surface of the mantle lithosphere — for the first time identified deformation by changing the thickness of the layers. Deformations are compared on all layers that allowed to allot the active center, the main (through) and local (developed in separate layers) areas. The boundaries of these regions are active zones of different ranks. The observed end-to-end development of strain from layer to layer or expression of some of them only in separate layers indicates on the sub-horizontal stratification and vertical divisibility of the earth's crust. Deformations of the deep layers are compared with the latest near-surface platform structures. This made it possible to establish a connection of near-surface deformations with deep ones and to consider the latter as the latest. These studies are relevant for solving fundamental problems of the origin of new structures and a number of practical problems.

Key words: deformation of deep layers, thickening and thinning of layers, geodynamics zones and centers, latest structures, tectonic lamination of the lithosphere.

Введение. Изучение глобальных и региональных геодинамических процессов в платформенной литосфере представляет собой актуальную задачу теоретической и практической геодинамики [Копп и др., 2014; Леонов и др., 2018; Леонов и др., 2001; Макаров и др., 2007; Новейшая..., 2000; Юдахин и др., 2003]. Признание того, что любой объем земной коры независимо от его размеров находится под влиянием разнородных напряжений и деформаций впервые привело к геодинамическому районированию платформ на принципиально новой основе [Макаров, 1996; Макарова и др., 2017; Ма-

кеев и др., 2018; Юдахин и др., 2003]. Источниками латеральных сил традиционно считаются конвергентные и дивергентные зоны литосферных плит и блоков. В качестве дополнительных источников сил рассматриваются глубинные тектоно-магматические (активные) центры, локализованные на разной глубине в земной коре. Платформенные деформации — суммарное выражение латеральных и глубинных процессов, активность которых изменяется по латерали и во времени.

Поскольку один из основных признаков деформации — изменение формы, в задачу иссле-

¹ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, лаборатория эндогенной геодинамики и новейшей тектоники, докт. геол.-минер. н.; e-mail: vmakeev@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, канд. геол.- минер. н.; e-mail: makarovnat@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, канд. геол.- минер. н.; e-mail: tanikamgu@mail.ru

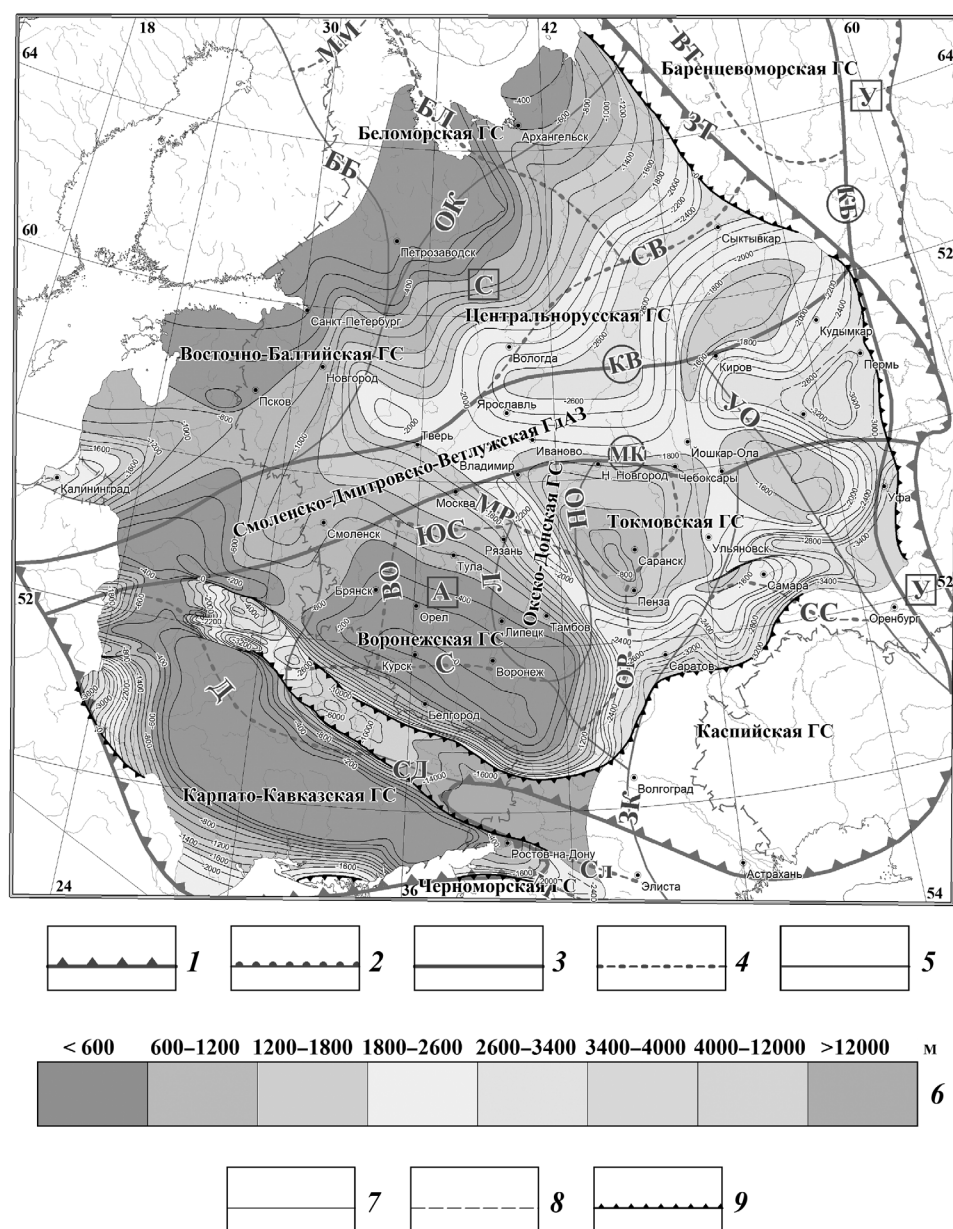


Рис. 1. Новейшие геодинамические системы Восточно-Европейской платформы (ВЕП), по [Макарова и др., 2017; Юдахин и др., 2003], наложенные на деформации кристаллического фундамента. Границы: 1 — ВЕП, 2 — орогенов Урала и Кавказа; геодинамически активные зоны: 3 — панрегиональные, 4 — региональные, 5 — локальные. 6 — деформации поверхности фундамента ВЕП (м); 7 — установленные, 8 — предполагаемые. 9 — высокоградиентные уступы рельефа.

Панрегиональные геодинамические системы (буквы в квадратах): А — Альпийская, С — Скандинавская, У — Уральская. Геодинамически активные зоны (буквы в кругах): КБ — Камско-Бельская, KB — Клинско-Вятская, МК — Москворецко-Камская. Остальные зоны: ББ — Беломоро-Балтийская, БЛ — Беломорская, ВО — Верхнеокская, ВТ — Восточно-Тиманская, Д — Днепровская, ЗК — Западно-Каспийская, ЗТ — Западно-Тиманская, Л — Лосевская, М — Манычская, ММ — Мурманская, МР — Москворецко-Рязанская, НО — Нижнеокская, ОК — Онежско-Карпогорская, С — Сеймская, СВ — Сухоно-Вычегдская, СД — Северско-Донецкая, Сл — Сальская, СР — Сурская, СС — Сызрань-Самарская, УО — Уржум-Оренбургская, ЮС — Юхнов-Серпуховская. Названия региональных систем см. на рисунке

дования входило определение закономерностей изменения толщины глубинных слоев как по отдельности (нижний, промежуточный и верхний слои), так и в целом. Цель исследований — выявление геодинамических условий формирования глубинных и приповерхностных деформаций.

Материалы и методы исследований. Исходными данными для этих исследований послужили материалы глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [Атлас..., 2013; Атлас..., 1989; Строение..., 2006], геолого-геофизических исследований [Краснопевцева, Щукин, 2000; Юдахин и др., 2003; Bogdanova et al., 2016], а также тектонического и геодинамического районирования [Karabanov, 2014; Макарова и др., 2017]. Поскольку графические материалы опубликованы в разных масштабах и проекциях, нами их привязка и сопоставление выполнены исключительно в ГИС MapInfo.

Методы изучения глубинных деформаций. Восточно-Европейская платформа (ВЕП) подвергалась

неоднократным тектоно-магматическим преобразованиям циклического характера, в процессе которых сформировались добайкальский, каледонский, киммерийский и альпийский структурно-вещественные этажи. Новейший тектонический этап с тридцатимиллионной историей геологического развития как часть альпийского цикла продолжается поныне, что позволяет привлечь метод актуализма для изучения глубинных процессов.

Новейший этап выражен в деформациях позднемезозойской поверхности выравнивания, несогласно наложенных на структуры древнего субстрата (рис. 1), по этой причине различаются инверсионные поднятия в пределах Московской и Мезенской синеклиз и т.п. Согласно концепции новейших геодинамических систем деформации развиваются под влиянием глобальных, региональных и локальных сил и процессов.

Сейсмологические и геолого-геофизические исследования показали, что мощность нижнего,

промежуточного и верхнего слоев земной коры ВЕП не выдержана и характеризуется разнотипными утолщениями и утонениями [Краснопевцева, Шукин, 2000; Строение..., 2006]. Изменчивость толщины слоев (изопахиты, км) и земной коры в целом (глубина Мохо, км) указывает на их вещественно-структурное преобразование под влиянием разноранговых источников сил и напряжений (тектонно-магматические центры). Изопахиты и изогипсы слоев — замкнутые, а также незамкнутые, это позволяет рассматривать их в качестве изгибов (деформаций) с полным и прерывистым типом развития соответственно. Полные деформации имеют линейную (спрямленную), овальную и изометричную конфигурацию, прерывистые — заливо- и террасообразную. На рисунках стиль деформаций подчеркнут осевыми линиями.

Согласно геодинамическим принципам деформации типизированы на геодинамически активные и относительно пассивные (наведенные) [Макарова и др. 2017; Макеев и др. 2018]. В качестве первых рассматриваются контрастные выступы и погружения границы Мохо, аномальные раздувы и утонения глубинных слоев, которые при прочих равных условиях (выраженность в деформациях поверхности кристаллического фундамента и земной поверхности и т.д.) рассматриваются как геодинамически активные центры или источники тектонических сил, в качестве вторых выступают пассивные в геодинамическом отношении деформации, согласующиеся с конфигурацией активных центров. Активные и пассивные деформации районированы с выделением геодинамических областей, включающих активный центр и конформные с ним деформации (наведенные), включая концентрические и радиальные деформации с прерывистым типом развития.

Результаты исследований и их обсуждение.
Деформации раздела Мохоровичича (Мохо). Раздел Мохо в ВЕП интенсивно дифференцирован по глубине от 35 до 50 км [Атлас..., 2013; Краснопевцева, Шукин, 2000]. Его дифференцированность позволяет выделить поднятия и опускания, принадлежащие к трем разным геодинамическим областям: 1) Каспийской, 2) Балтийской и 3) Приднестровской⁴ (рис. 2).

Каспийская область (I) выделена в юго-восточной части ВЕП. Ее локализация совпадает с Прикаспийской синеклизой и частично с Воронежской и Волго-Уральской антеклизмами. Активный центр области — Центрально-Каспийский мантийный выступ на глубине 35 км (I). От него в разные стороны распространяется несколько деформаций радиального типа. Наиболее протяженная из них Общесыртно-Камская (ОБК) субмеридионального простирания. Две другие

(безымянные) менее протяженные, при этом одна направлена из центра на запад в сторону Рязани, другая — почти на юг в сторону Предкавказья. От выступа к Воронежской антеклизме отмечена зона резкого погружения раздела Мохо с 35 до 45 км. С ней согласуется новейшая Западно-Каспийская геодинамически активная зона сейсмогенного типа (ГдА3) [Землетрясения..., 2007].

Над мантийным выступом мощность отложений Прикаспийской синеклизы составляет ~24 км. Литостатическое давление этой толщи на выступ и, возможно, его встречное поднятие вызывают субвертикальное сжатие и развитие тангенциальных (касательных) напряжений растяжения. Отток (отжатие) глубинного вещества в стороны, наиболее ярко выраженный в обширной редукции промежуточного слоя, сопровождается образованием складок волочения. На удалении от центра происходит утолщение земной коры и его изостатическая компенсация, что выражено в рельефе образованием Ергенинского, Приволжского, Бугульминско-Белебеевского и Урало-Эмбенского поднятий. Центробежный характер движения глубинного вещества привел к образованию Каспийской радиально-концентрической области, конформной с новейшим Циркум-Каспийским прогибом.

Балтийская область (II) выделена в северо-западной части ВЕП. Над ней находятся Фенно-скандинавский щит и три синеклизы: Балтийская, Московская и Мезенская. Здесь выделены два активных центра, выраженных высокоамплитудными деформациями Мохо: 1) Центрально-Финляндское (ЦФ) погружение и 2) Северо-Ботническое (СБН) поднятие (рис. 2).

Над ЦФ погружением (до 50 км) отмечено утолщение земной коры, а на земной поверхности — сводовое поднятие. Их образование могло быть связано с локальным интенсивным погружением мантийной литосферы, которое вызвало растяжение и опускание вышележащих слоев земной коры. Верхнемантийное опускание компенсируется центростремительным «притоком» глубинного вещества с периферии с развитием послонных складок волочения, что приводит к утолщению коры и последующему ее поднятию. Эти процессы привели к образованию Балтийской концентрической области, согласной с новейшим Циркум-Балтийским поднятием, или Скандинавской системой (рис. 1).

Над СБН поднятием (до 40 км) расположена северная часть Ботнического залива, происхождение которого связано с ледниковым периодом. Аккумуляция мощной ледниковой шапки (до 3 км) в позднечетвертичное время вызвало опускание под ней раздела Мохо, а последующая деградация ледника — его поднятие [Mourner, 2004]. Счита-

⁴ Названия глубинных геодинамических областей, активных центров и зон даны в соответствии с географической привязкой.

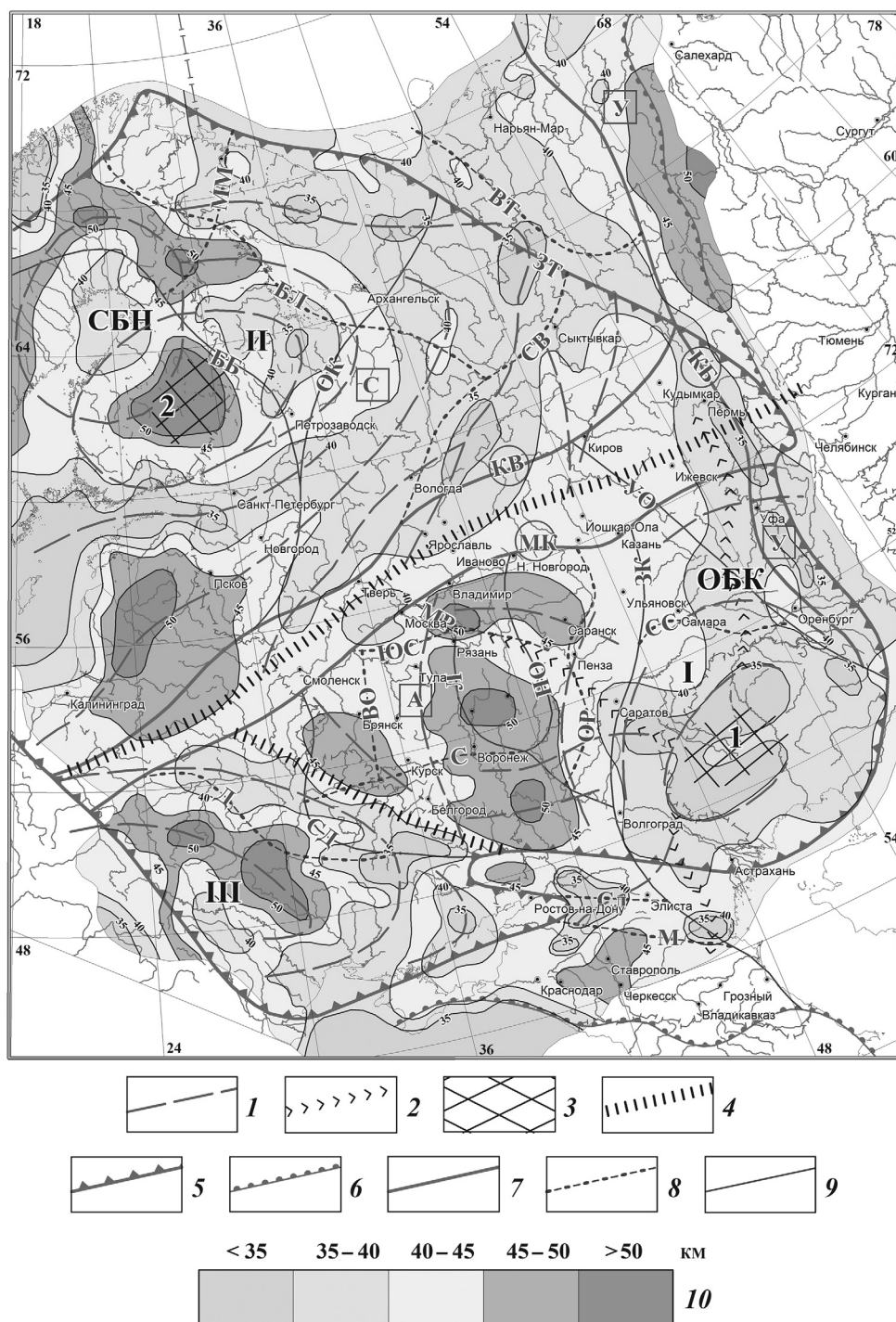


Рис. 2. Деформации поверхности мантийной литосферы (раздел Мохо): 1 — деформации раздела Мохо; 2 — неполные (прерывистые) деформации; 3 — геодинамически активные центры; 4 — глубинные активные зоны, отвечающие границам геодинамических областей; границы: 5 — Восточно-Европейской платформы, 6 — орогенов Кавказа и Урала. Геодинамически активные зоны: 7 — региональные, 8 — локальные; 9 — изолинии раздела Мохо (км); 10 — шкала глубин раздела Мохо, по [Краснопевцева, Шукин, 2000]

Геодинамически активные центры: 1 — Центрально-Каспийский и 2 — Центрально-Финляндский. Геодинамические области: I — Каспийская, II — Балтийская, III — Приднестровская. СБН — Северо-Ботнический мантийный выступ, ОБК — Общесыртыско-Камская заливообразная структура

ется, что инверсия Мохо продолжается поныне. Подтверждает это компенсационное погружение, наметившееся вокруг активного поднятия.

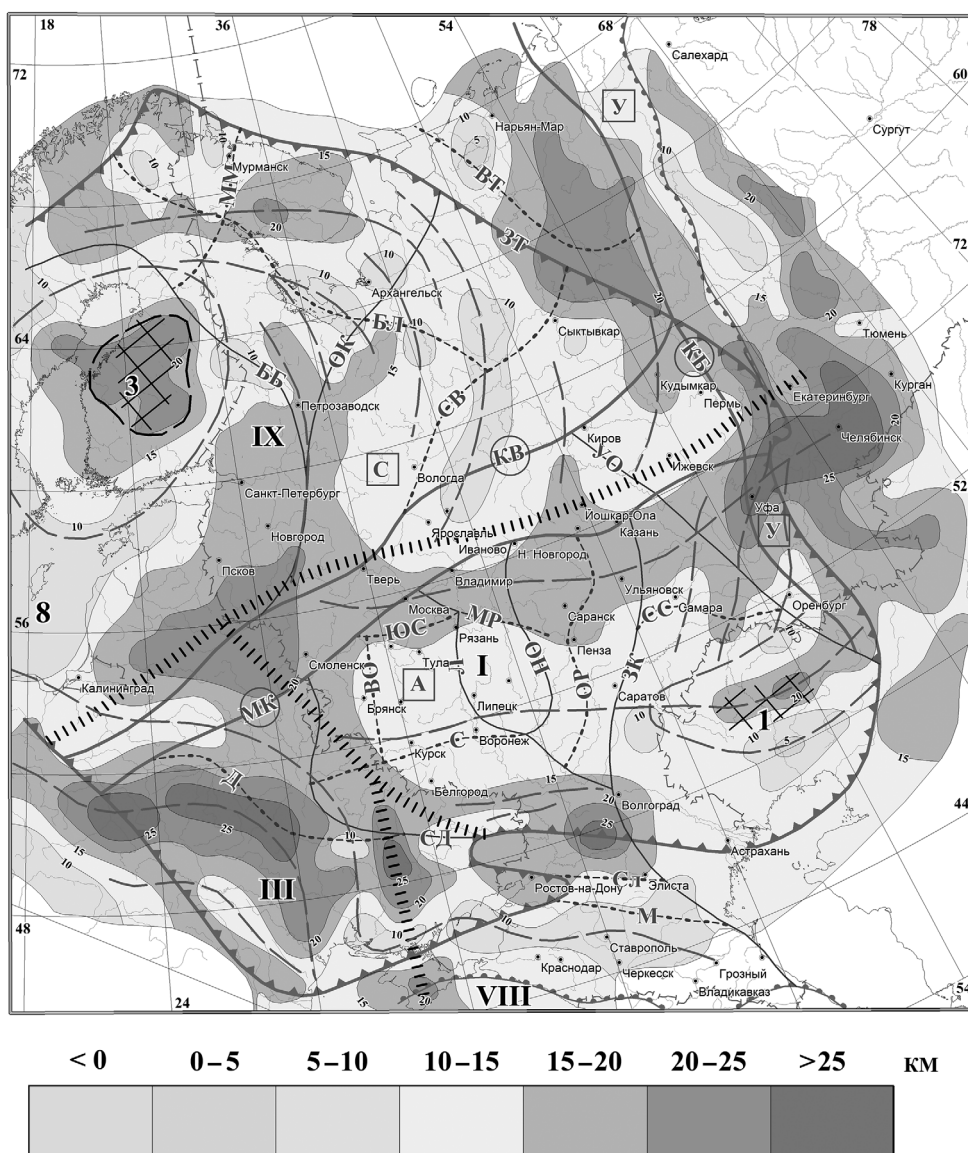
Граница Балтийской и Каспийской областей рассматривается как активная. В новейшей структуре ей соответствует граница Скандинавской и Альпийской геодинамических систем, или, точнее, Смоленско-Дмитровско-Ветлужская зона (ГдАЗ) [Макарова и др., 2017] (рис. 1).

Приднестровская область (III) выделена в юго-западной части ВЕП. Над ней находятся Украинский щит и Днепровско-Донецкая (Украинская) синеклиза с одноименным авлакогеном в основании. По размерам область сравнительно небольшая

и с интенсивно дифференцированным разделом Мохо от 35–40 до 50 км. Деформации выражены выпуклыми на северо-восток относительно пассивными поднятиями и опусканиями (рис. 2), которые наводятся со стороны Карпатской дуги новейшего орогенеза (зона конвергенции литосферных плит и блоков). От нее фронт деформаций распространяется в восток–северо-восточном направлении в сторону ВЕП.

Граница Приднестровской и Каспийской областей активна. Она согласуется с древним Днепровско-Донецким авлакогеном и новейшей Днепровской ГдАЗ (рис. 1), с которыми связана сейсмическая активность в регионе.

Рис. 3. Деформации нижнего слоя земной коры, изолинии с цифрами — изопакиты (км) нижнего слоя земной коры, по [Краснопевцева, Шукин, 2000]. Геодинамические области: III — Приднестровская, I — Каспийская, VIII — Прикавказская, IX — Восточно-Балтийская. Геодинамически активные центры: 3 — Карело-Финский, 8 — Готландский (предполагаемый). Остальные условные обозначения см. на рис. 1 и 2



Деформации нижнего слоя земной коры. Мощность (толщина) нижнего слоя дифференцированная и составляет от 5 до 25 км. Ее закономерное изменение отражает изгибы, принадлежащие четырем разным областям: 1) Каспийской, 2) Восточно-Балтийской, 3) Приднестровской и 4) Прикавказской (рис. 3).

Каспийская область (I), выделенная в Мохо, имеет продолжение и в нижнем слое, здесь ее форма из изометричной становится субширотной. Над Центрально-Каспийским выступом проявлены малые по размеру утолщения до 25 км и несколько изометричных утонений до 5–10 км, от которых в западном направлении вплоть до меридиана Брянска отмечено относительно широкое утонение овальной формы. К северу утонение сопряжено с относительно узким утолщением слоя до 15 км, которое рассматривается как граница Каспийской и Восточно-Балтийской областей. В западной (Новгород, Калининград, Смоленск) и восточной частях выступа (Уфа, Челябинск) выявлены два аномальных раздува мощности слоя (до 20 км).

Первое расположено почти над аномально выраженным погружением раздела Мохо, вызвавшим его образование. Второе утолщение находится на пересечении с Южно- и Среднеуральскими субмеридиональными структурами.

Субширотная зона утолщения, выраженная несогласным сочленением Каспийской и Восточно-Балтийской областей, согласуется с новейшей Смоленско-Дмитровско-Ветлужской ГдАЗ [Юдахин и др., 2003].

Восточно-Балтийская область (IX), как и Балтийская, занимает обширную площадь на северо-западе ВЕП (рис. 3). Но, несмотря на схожесть их циркумобразных деформационных рисунков, эти области различаются. Причина этого явления кроется в геодинамически активных центрах, которых в рассматриваемой области два — Карело-Финский и Готландский.

Карело-Финский центр выражен аномальным раздувом мощности до 20–25 км. Как показано выше, его образование вызвано локальным погружением раздела Мохо. По направлению от

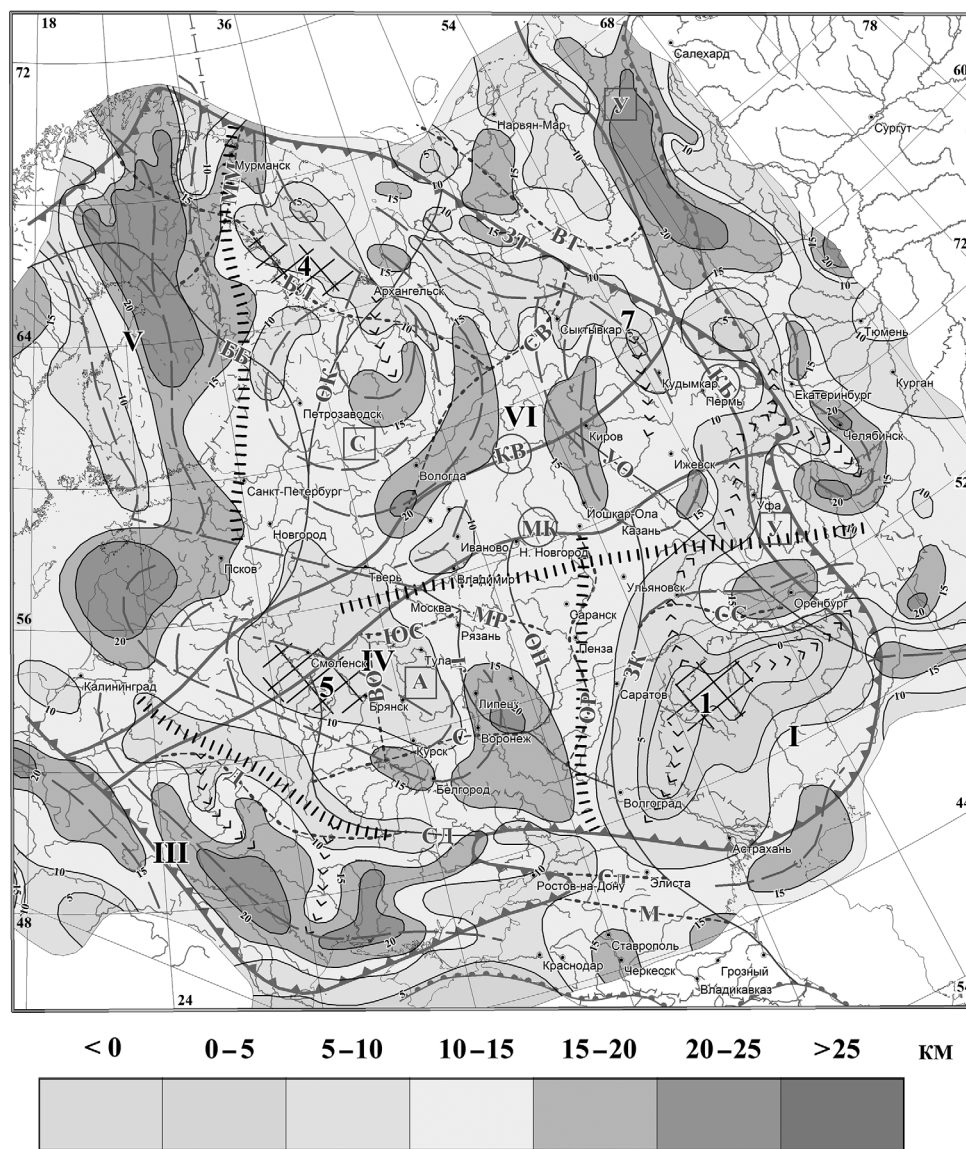


Рис. 4. Деформации промежуточного слоя земной коры, изопахиты (км) промежуточного слоя, по [Краснопевцева, Шукин, 2000]. Геодинамические области: III — Приднестровская, IV — Центрально-Русская, V — Норландская, VI — Беломорско-Предтима́нская. Геодинамически активные центры: 4 — Канда́лакшский, 5 — Смо́ленско-Орловский, 7 — Предтима́нский (предполагаемый). Остальные условные обозначения см. на рис. 1 и 2

границ области с юго-востока к центру происходит неравномерно выраженное утолщение слоя с 5–10 до 25 км, сопряженное с дугообразными деформациями. Они отвечают относительным утолщениям и утонениям слоя, по механизму образования складок «тяги».

Готландский центр расположен юго-западнее Карело-Финского центра и выражен утонением нижнего слоя до 5–10 км, которое в общих чертах согласуется с выступом раздела Мохо (рис. 2). Заметим, что в более высоких слоях эти особенности строения нижней коры и мантийной литосферы не проявляются, но с ними согласуются впадина Балтийской синеклизы и молодой Восточно-Балтийский среднечетвертичный грабен, приуроченный к наиболее прогнута́й части синеклизы.

Приднестровская область (III) характеризуется устойчивым развитием. Она выделена в разделе Мохо, а также в нижнем слое в виде сопряженных дугообразных утонений до 10–15 км и утолщений до 25 км. Источником сил и напряжений, вызвавшим их образование, служит новейшая дуга

Карпат. От конвергентной границы литосферных плит напряжения распространяются по латерали в сторону ВЕП. Механизм передачи напряжений отвечает принципу «толкай», что, очевидно, вызывает перераспределение мощности в нижнем слое с образованием дуг, выпуклых на северо-восток. Они, в свою очередь, могут вызвать развитие складок волочения в промежуточном слое.

Прикавказская область (VIII) выделена на крайнем юге в районе Скифской молодой (эпипалеозойской) плиты. Область выражена утонениями нижнего слоя до 10 км, сопряженными с утолщениями (до 15–20 км) широтного простирания, которые согласуются с кавказским (зона конвергенции литосферных плит) динамическим фронтом. Линейные прикавказские деформации и дуговые приднестровские деформации несогласно сочленяются в виде узкой субмеридиональной зоны утолщения до 25 км, рассматриваемой в качестве активной и сейсмогенной [Землетрясения..., 2007]. В районе Крымского п-ова активная зона согласуется с транзитной

Центрально-Крымской линеаментной зоной [Макарова и др., 2017].

Деформации промежуточного слоя земной коры.

Мощность промежуточного слоя изменяется в широких пределах — от 5 до 20 км, что позволяет выделить изгибы, относящиеся к пяти областям: 1) Каспийской, 2) Норландской 3) Приднестровской, 4) Центрально-Русской и 5) Беломорско-Предтиманской (рис. 4). Из активных центров этих областей в промежуточном слое устойчиво проявлен Центрально-Каспийский выступ. В остальных случаях центры выражены локально, т.е. в отдельных слоях.

Каспийская область (I), выявленная в разделе Мохо и в нижнем слое, ярко выражена и в промежуточном слое. Согласно активным зонам, которые ее ограничивают, она изометричная и относительно уменьшенная по площади. В центральной части слой аномально утонен вплоть до выклинивания, что можно рассматривать как результат оттока глубинного вещества в стороны, вызванного воздействием Центрально-Каспийского выступа. В качестве своеобразных деформаций радиального типа («каналов»), по которым, возможно, происходит отток, выступают утонения слоя до 5 км шириной до 150 км и длиной >1000 км. Радиальных утонений выделено три, и все они направлены из центра на север, восток и юго-запад.

Норландская область (V) выделена в крайней северо-западной части ВЕП — над ней находится Фенноскандинавский щит (рис. 4). Ее площадь в 2 раза меньше Балтийской и Восточно-Балтийской областей. Активные центры здесь не выделены, поскольку они находятся за пределами ВЕП в акватории. В качестве таковых можно рассматривать дивергентные границы литосферных плит и блоков — Северо-Атлантическую и Арктическую зоны спрединга.

Область характеризуется развитием субмеридиональных деформаций, отражающих интенсивную дифференциацию мощности слоя от 10 до 25 км. Их развитие в юго-восточном направлении ограничено более активной Беломорско-Предтиманской областью, что позволяет выделить на их границе активную зону. Исходя из геодинамического принципа, согласно которому менее активные (пассивные) деформации подчиняются более активным, деформации Норландской области следует рассматривать в качестве пассивных.

Приднестровская область (III) устойчиво выделяется в юго-западной части ВЕП, занимая, как всегда, относительно небольшую площадь. Она характеризуется утолщением слоя до 20–25 км, сопряженным с его утонением до 5–10 км. В отличие от нижнего слоя, где деформации согласуются с Карпатской дугой, деформации промежуточного слоя — «антикарпатские» — в нем дуги выпуклы в обратную сторону, т.е. в сторону Карпат. Происхождение этих дуг можно связать с расслоенностью

литосферы по деформациям, т.е. более активные карпатские деформации нижнего слоя вызывают развитие над ними в менее активном промежуточном слое антикарпатских складок волочения (рис. 3, 4).

Центрально-Русская область (IV) выделена в центральной части ВЕП. Она имеет овальную форму, несколько вытянутую в северо-западном направлении по линии Смоленск—Орел. Над ней находятся поднятия Белорусской и Воронежской антеклиз. Активный центр, вызвавший ее образование — Смоленско-Орловское аномальное утонение коры до 5–10 км, сопряженное с двумя пассивными в геодинамическом отношении утолщениями до 20–25 км: первое находится на юго-востоке области и имеет угловатую форму, второе — на северо-западе и имеет изометричную форму (район Рижского залива). Утонение в промежуточном слое, возможно, вызвано литостатическим давлением раздува (мощность >25 км), расположенным над ним в верхнем слое. Его давление привело к оттоку глубинного вещества в нижнем слое и в сторону рассмотренных утолщений (рис. 2, 3).

Граница Центрально-Русской и Каспийской областей отвечает активной зоне, согласующейся с новейшей Западно-Каспийской зоной (ГдАЗ). В рельефе ей отвечает высокоградиентный правобережный склон (эрозионный уступ) Волги. Юго-западной границей рассматриваемой области служит узкое утонение до 5–10 км, с которым согласуется прогиб Днепровско-Донецкого авлакогена. Северо-восточная граница области отвечает зоне сопряжения Онежско-Предтиманской и Норландской областей.

Беломорско-Предтиманская область (VI) обширная, она объединяет деформации, разнотипные по морфологии: дуговые, линейные и изометричные. Над областью в верхнекоровом слое расположены Мезенская и Московская синеклизы и Волго-Уральская антеклиза. В области выделяются Кандалакшское (западное) и Предтиманское (восточное) утонения небольшой мощности (5–10 км) северо-западного простирания, относимых к активным центрам (рис. 4). Вместе эти утонения образуют две левосторонние кулисы — западная тяготеет к Кандалакшскому четвертичному прогибу-грабену, а восточная — к Предтиманью. От них на юг — к центру Московской синеклизы и Волго-Уральской антеклизы — распространяются короткие радиальные утонения (5–10 км) и дугообразные утолщения (15–20 км), указывающие на активность центров.

Деформации верхнего слоя земной коры. Мощность верхнего слоя сокращается с 20 км до полной редукции. В нем выделены четыре геодинамические области — Каспийская, Онежско-Норландская, Приднестровская и Центрально-Русская (рис. 5).

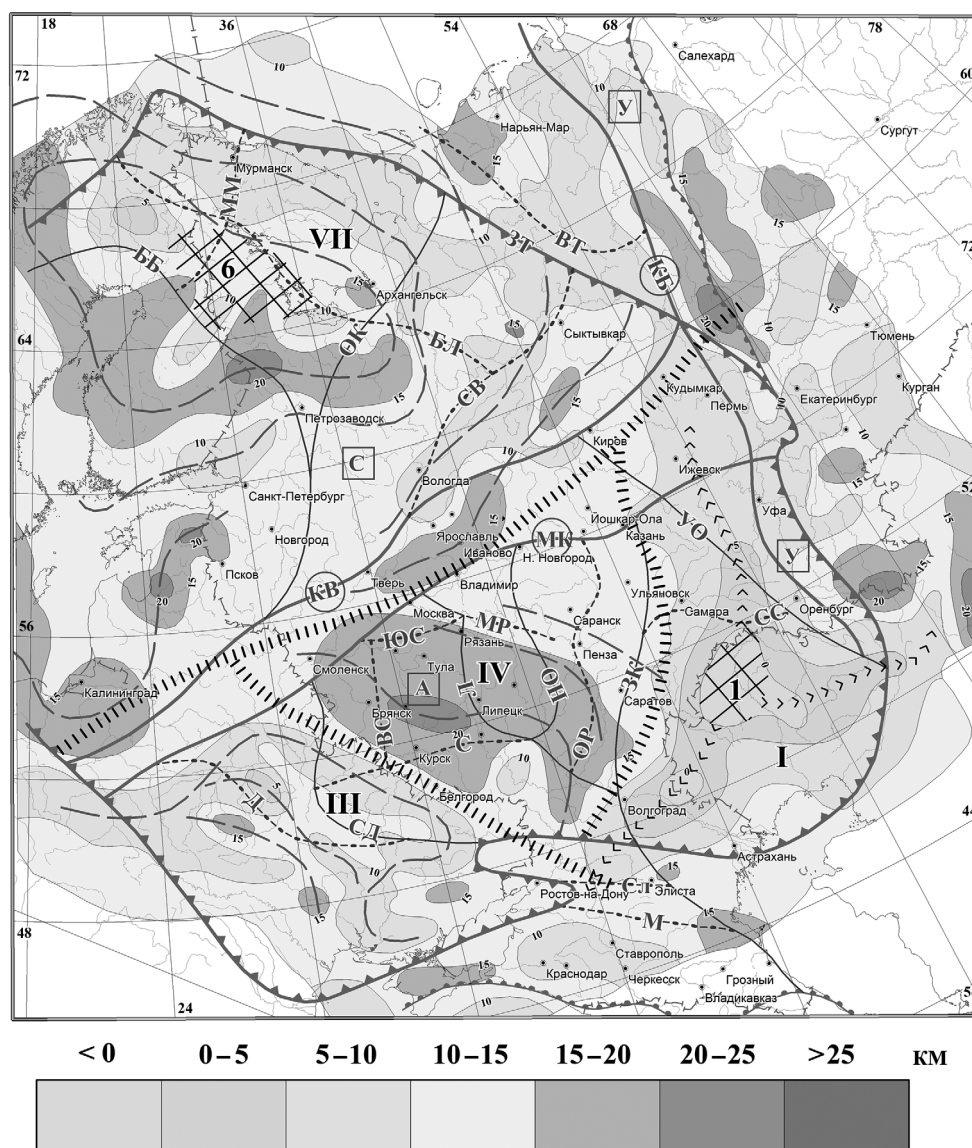


Рис. 5. Деформации верхнего слоя земной коры, изолинии с цифрами — изопакиты (км) промежуточного слоя, по [Краснопевцева, Шукин, 2000]. Геодинамические области: III — Приднестровская, IV — Центрально-Русская, VII — Онежско-Норландская; 6 — Северо-Норландский геодинамически активный центр. Остальные условные обозначения см. на рис. 1 и 2

Каспийская область (I), относящаяся к категории длительно и устойчиво развивающихся, имеет радиально-лучистое строение. Ее активный центр, выраженный редуцированной частью слоя, отвечает Центрально-Каспийскому выступу слоя Мохо. Характерная особенность области — узкие утонения слоя радиального типа, расходящиеся от центра в стороны. Наиболее протяженное утонение меридиональное, направленное на север вдоль Предуралья. Менее протяженные утонения направлены на восток к Урало-Эмбенскому плато и на юг к Днепровско-Донецкому авлакогену. Утонения могут отражать движение глубинного вещества, направленного из активного центра в стороны. Согласно границам морфология Каспийской области в разных слоях разная: в разделе Мохо и нижнем слое область вытянута субширотно, в промежуточном слое она приобретает изометричную форму, а в верхнем — становится субмеридиональной. При этом ее активный центр, выраженный мантийным выступом, устойчив на протяжении всей эволюции земной коры.

Онежско-Норландская область (VII), так же, как Балтийская и Восточно-Балтийская области, занимает северо-западную часть ВЕП. По отношению к небольшой Норландской области она резко дискордантна, что, возможно, служит причиной развития субгоризонтальной расслоенности по деформациям и повышенной сейсмической активности Балтийского щита [Землетрясения..., 2007].

Северо-Норландский активный центр (СН) представлен здесь тремя малыми аномальными утонениями слоя (5–10 км и менее). В рельефе им отвечают поднятия Северного Норланда, Карельского массива и Ветреного пояса. Непосредственно вокруг СН центра развиты дугообразные утонения до 10–15 км и утолщения до 25 км. По мере удаления на юго-запад от центра установлена подковообразное утолщение слоя до 20–25 км, а на северо-восток, наоборот, — его утонение до 5–10 км. В южной и юго-восточной частях области мощность слоя также уменьшается до 5–15 км. Южная граница рассматриваемой области

согласуется с новейшей Смоленско-Дмитровско-Ветлужской зоной (ГдАЗ) (рис. 1).

Приднестровская область (III) устойчиво выражена, как и в других слоях земной коры, но менее ярко. Ее деформации подчиняются Карпатскому динамическому фронту, действующему в направлении платформы. С деформациями промежуточного слоя они не согласуются, поскольку в нем выпуклость ориентирована в обратную — юго-западную — сторону. Подобную расслоенность связывают со способностью земной коры передавать напряжения снизу вверх по разрезу к земной поверхности. Наиболее активен в этом смысле нижний слой, который вызывает развитие в промежуточном слое пассивных складок волочения «антикарпатского» типа. Под их влиянием, в свою очередь, развиваются деформации в верхнем слое.

На земной поверхности под влиянием карпатского динамического фронта формируется ряд поднятий (Предкарпатское, Волыно-Подольское и Приднестровское), сопряженных с прогибами (Приднепровский и др.). Их амплитуда постепенно уменьшается в северо-восточном направлении, и на границе Приднестровской и Центрально-Русской областей подобного типа структуры угасают.

Центрально-Русская область (IV), выделенная в промежуточном слое, находит свое продолжение и в верхнем слое. Здесь она имеет угловатую форму и увеличенную площадь. Активный центр области — аномально выраженный раздув до 15–25 км овальной формы, отвечающий Воронежской антеклизе. Его образование, возможно, стало причиной развития под ним в промежуточном слое своеобразного утонения, о чем сказано выше. Восточная граница рассматриваемой области с Каспийской областью плавная, нерезкая. Такое же строение имеет северо-западная граница области. Юго-западная граница с Приднестровской областью — высокоградиентная, вдоль нее резко уменьшается мощность слоя с 25 до 5–10 км.

Заключение. Изгибы слоев земной коры ВЕП, выраженные в изменениях мощности слоев, районированы с выделением геодинамических областей. По устойчивости развития области типизированы на главные и локальные.

К главным геодинамическим областям относятся: 1) Каспийская, 2) Балтийская, 3) Приднестровская, 4) Центрально-Русская. Они устойчиво и длительно развиваются и проявлены во всех глубинных слоях земной коры.

Каспийская область характеризуется утонением всех слоев над мантийным выступом Мохо вплоть до их полной редукции. От выступа к границам области наблюдается увеличение мощности земной коры от 35 до 50 км с развитием радиальных и концентрических деформаций центробежного типа. Площадь Каспийской области сокращается снизу вверх по разрезу, и ее конфигурация изменяется от субширотной до

изометричной и субмеридиональной. Последняя характерна для новейшей внутриплатформенной Циркум-Каспийской системы деформаций.

Балтийская область характеризуется активным центром, выраженным высокоградиентным погружением поверхности Мохо, над которым отмечены раздувы мощности слоев до 25 км. От центра к периферии области мощность коры сокращается до 10–15 км с развитием дугообразных деформаций центростремительного типа. Балтийская область в поверхности Мохо в нижнем и верхнем слоях — овальная субширотная, а в промежуточном слое — субмеридиональная. Ее образование можно связать с суперпозицией разнородных латеральных и глубинных сил, проявившихся в виде новейшей Циркум-Балтийской системы деформаций.

Приднестровская область также устойчиво и длительно развивается от слоя к слою. Ее образование, в отличие от Каспийской области, связано с латеральным источником сил, находящимся за пределами ВЕП. Закономерная черта ее развития — разнонаправленная выпуклость деформаций: в нижнем и верхнем слоях раздела Мохо их выпуклость карпатская, а в промежуточном слое — «антикарпатская». Причина разнонаправленных деформаций кроется в латеральных напряжениях, которые вызывают развитие послойных складок волочения. В приповерхностной зоне им отвечает новейшая Карпатская система деформаций.

Центрально-Русская область выделена в промежуточном и верхнем слоях земной коры. В нижнем слое и в разделе Мохо она не установлена. В качестве активного центра рассматривается аномальный раздув мощности до 20–25 км в верхнем слое и его литостатическое давление на промежуточный слой, что привело к его аномальному утонению до 5–10 км. Выжимание глубинного вещества в стороны вызвало образование конформных с ними пассивных деформаций. В новейшей структуре этим глубинным процессам отвечает новейшее Среднерусское (Воронежское) поднятие — часть Альпийской системы деформаций.

К локальным геодинамическим областям относятся: Восточно-Балтийская, Онежско-Норландская, Норландская, Беломорско-Предтимианская. Они выражены в отдельных слоях земной коры и принадлежат в основном к главной Балтийской геодинамической области. Их формирование можно объяснить особенностями интерференции локальных деформаций, вызывающих интенсивную расслоенность в земной коре, что требует дальнейшего специального рассмотрения.

Таким образом, глубинные геодинамические области (ГДО) рассматриваются как разноранговые и разнотипные по генезису. Их образование связано с *глубинными и латеральными источниками сил и напряжений*, при этом первые выражены активными выступами и погружениями мантийной литосферы и аномальными раздувами и утонени-

ями слоев. Добавим, что деформации слоев могут быть вызваны мощными ледниковыми центрами, а другими источниками деформаций — конвергентные и дивергентные зоны литосферных плит и блоков. Деформации в промежуточном слое чаще всего компенсационные. Глубинная активность передается в приповерхностную зону ВЕП, вызывая образование новейших систем деформаций, выраженных поднятиями, прогибами и

флексурами (ступенями), а также геодинамически активными зонами (ГдАЗ). Зоны рассматриваются как источники повышенных напряжений и деформаций, в том числе, сейсмогенного типа.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН (проект № 13000/2215-19) и госзадания ИГЭ РАН (проект № АААА-А19-119021190076-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас карт глубинного строения земной коры и верхней мантии территории СССР. М.: ВНИИГеофизика, 1989. 84 с.

Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. 94 с.

Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Шукина. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2007. 381 с.

Краснопевцева Г.В., Шукин Ю.К. Объемная глубинная модель земной коры Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 73–84.

Копн М.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А., Тверитинова Т.Ю. Новейшее поле напряжений востока Русской плиты и Урала по макро- и мезоструктурным данным // Геотектоника. 2014. № 4. С. 23–43.

Леонов Ю.Г., Гуценко О.И., Копн М.Л., Расцветаев Л.М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении // Геотектоника. 2001. № 1. С. 36–59.

Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В. Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал. М.: Наука, 2018. 329 с.

Макаров В.И. Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // Недр Поволжья и Прикаспия. 1996. № 13. С. 49–60.

Макаров В.И., Шукин Ю.К., Юдахин Ф.Н. Позиция Соловецких островов в неотектонической структуре Беломорья, их природа и современная геодинамика // Литосфера. 2007. № 3. С. 86–94.

Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л. и др. Геодинамические системы и геодинамически актив-

ные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 91. Вып. 4–5. С. 9–25.

Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В. Глубинная геодинамика Восточно-Европейской платформы и ее отражение в новейших геодинамических системах: Мат-лы L (50) тектон. совещ. «Проблемы тектоники и геодинамики земной коры». М.: ГЕОС, 2018. Т. 1. С. 401–405.

Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Пробел, 2000. 487 с.

Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EURO-PROBE. М.: Геокарт, 2006. 736 с.

Тектоническая расслоенность и региональные геологические исследования. М.: Наука, 1990. 293 с.

Шукин Ю.К., Бабак В.И., Краснопевцева Г.В. О связи структурно-геоморфологических и геолого-тектонических глубинных направлений: Мат-лы XIV междунар. конф. «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными». Петрозаводск: КНЦ РАН, 2008. С. 369–373.

Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.

Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EUROPE. East European craton. Reference module in earth systems and environmental sciences. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 205–220.

Karabanov, A.K. Neotectonics and neo-geodynamics of Belarus. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing, 2014. 252 p.

Mörner N.A. Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia, especially Sweden. Primary structures and secondary effects // Tectonophysics. 2004. Vol. 380. P. 139–157.

Поступила в редакцию 25.10.2019

Поступила с доработки 15.01.2020

Принята к публикации 30.06.2020