

УДК 551.243

## Деформации глубинных слоёв земной коры Восточно–Европейской платформы: причины и следствия

© 2020 г. В.М. Макеев<sup>1</sup>, Н.В. Макарова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИГЭ РАН, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>МГУ, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Объектом исследования являются деформации раздела Мохо и глубинных слоёв земной коры Восточно-Европейской платформы, а также новейшие структуры, развитые в её приповерхностной части. Исходные данные – результаты сейсмологических и геолого-геофизических исследований, оценившие мощности нижнего, промежуточного и верхнего слоёв земной коры и глубину Мохо. Методы исследований – структурно-геодинамический и историко-тектонический, позволяющие оценить морфологию и направленность развития деформаций от глубинных к приповерхностным. В основу исследований положены геодинамические принципы, которые позволяют рассматривать деформации земной коры как преимущественно изгибные. Происхождение деформаций связывается с влиянием внеплатформенных и внутриплатформенных активных центров – источников сил и напряжений. Результаты. Активные центры и сопряжённые с ними относительно пассивные деформации районированы с выделением глубинных геодинамических областей. На основе длительности и устойчивости развития областей они разделены на главные и локальные. Первые проявлены во всех глубинных слоях, вторые выражены только в отдельных. К активным центрам традиционно отнесены конвергентные и дивергентные зоны литосферных плит и блоков. В качестве дополнительных рассматриваются глубинные выступы и погружения Мохо, аномальные раздувы и утонения слоёв земной коры. Выводы. Конформное и дисконформное соотношение разных по глубине заложения деформаций является закономерным свойством развития платформенной литосферы, в т.ч. на новейшем этапе её эволюции. Результаты исследований актуальны для решения задач происхождения деформаций и оценки сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** изгибы слоёв, утолщения и утонения слоёв, геодинамическое районирование, неотектонические структуры, дискордантность и конформность деформаций.

**Для цитирования:** Макеев В.М., Макарова Н.В. Деформации глубинных слоёв земной коры Восточно-Европейской платформы: причины и следствия // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.05>

### Введение

Изучение глобальных и региональных геодинамических процессов в платформенной литосфере является актуальной задачей теоретической и практической геодинамики [Копп и др., 2014; Леонов и др., 2018; 2001; Макаров и др., 2007; Новейшая ..., 2000; Юдахин и др., 2003; Sim et al., 2018]. Признание нахождения любого объёма земной коры независимо от его размеров под влиянием разнородных напряжений и деформаций впервые привело к геодинамическому районированию платформ на принципиально новой основе [Макаров, 1996; Макарова и др., 2017; Макеев и др., 2018; Юдахин и др., 2003]. Источниками латеральных сил традиционно считаются

конвергентные и дивергентные зоны литосферных плит и блоков [Копп и др., 2014; Леонов и др., 2001, 2018; Макаров, 1996; Новейшая ..., 2000; Тектоническая ..., 1990; Sim et al., 2018]. В качестве дополнительных источников сил рассматриваются глубинные тектоно-магматические (активные) центры, локализованные на разных глубинах земной коры [Макаров и др., 2007; Макеев и др., 2018]. Платформенные деформации являются суммарным выражением латеральных и глубинных процессов, активность которых изменяется по латерали и во времени.

Поскольку одним из основных признаков деформации является изменение формы, в задачу исследования входит определение закономерностей изменения толщины глубинных

слоёв как по отдельности (нижний, промежуточный и верхний слои), так и в целом. Цель исследований – выявление геодинамических условий формирования глубинных и приповерхностных деформаций. Исходными данными для этих исследований являются материалы глубинного сейсмического зондирования [Атлас ..., 1989, 2013; Строение ..., 2006], геолого-геофизических исследований [Краснопевцева, Шукин, 2000; Шукин, 2014; Юдахин и др., 2003; Bogdanova et al., 2016] и тектонического и геодинамического районирования [Karabanov, 2014; Макарова и др., 2017; Международная ..., 1981]. Поскольку графические материалы опубликованы в разных масштабах и проекциях, в данном исследовании их привязка и сопоставление выполнялась 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 (рис. 1). Новей-

ший тектонический этап с тридцатимиллионной историей [Тектоническая ..., 2007] как часть альпийского цикла продолжается поныне, что является хорошей возможностью привлечь метод актуализма для изучения глубинных процессов.

Новейший этап выражен в деформациях позднемезозойской поверхности выравнивания, несогласно наложенной на синеклизы и антеклизы ВЕП (рис. 2). По этой причине различаются инверсионные поднятия в пределах Московской и Мезенской синеклиз и т.п. Согласно концепции глубинных геодинамических систем, формирование новейших структур происходит под влиянием глобальных, региональных и локальных сил и процессов [Макаров, 1996].

Сейсмологические и геолого-геофизические исследования показали, что мощности нижнего, промежуточного и верхнего слоёв земной коры ВЕП не выдержаны и характеризуются разнотипными утолщениями и утонениями [Краснопевцева, Шукин, 2000; Строение ..., 2006; Шукин, 2014]. Изменчивость толщины слоёв (изопахиты, км) и земной коры в целом (глубина Мохо, км) указывает на их вещественно-структурное преобразование под влиянием разноранговых источников сил и напряжений (тектоно-

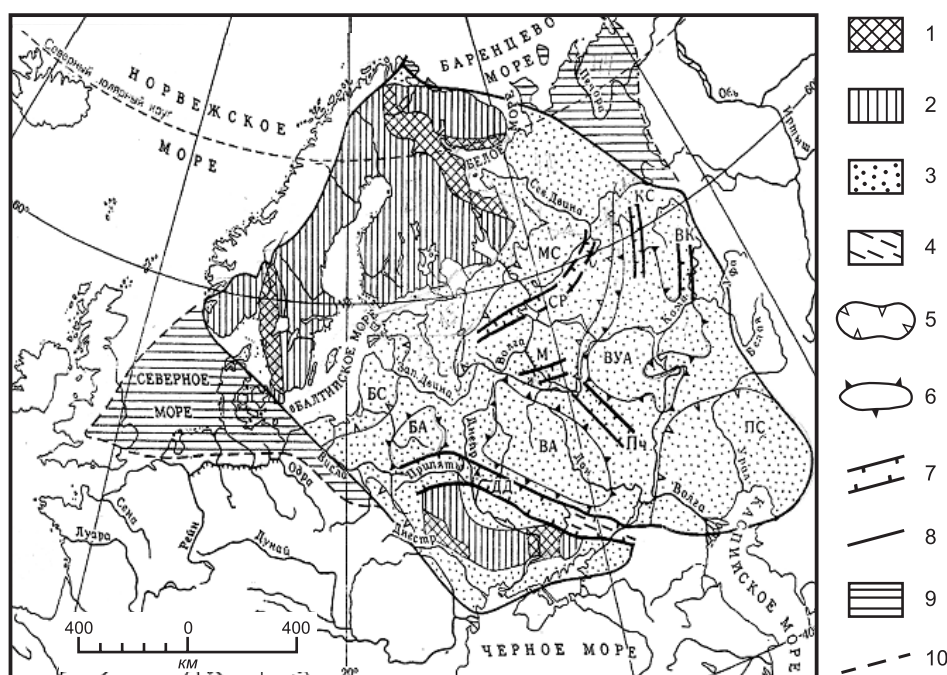


Рис. 1. Тектоника Восточно-Европейской платформы [Тектоническая ..., 2007].

1 – выступы (выходы) архейского фундамента (>2 500 млн. лет); 2 – выступы карельского фундамента (>1600 млн. лет); 3 – эпикарельский осадочный чехол; 4 – складчатое сооружение Донбасса; 5 – синеклизы: БС – Балтийская, МС – Московская, ПС – Прикаспийская; 6 – антеклизы: БА – Белорусская, ВА – Воронежская, ВУА – Волго-Уральская; 7 – авлакогены: ВК – Верхнекамский, ДД – Днепровско-Донецкий, КС – Казанско-Сергиевский, М – Московский, Пч – Пачелмский, СР – Среднерусский; 8 – границы платформы; 9 – области с байкальским складчатым фундаментом; 10 – границы байкальского складчатого фундамента

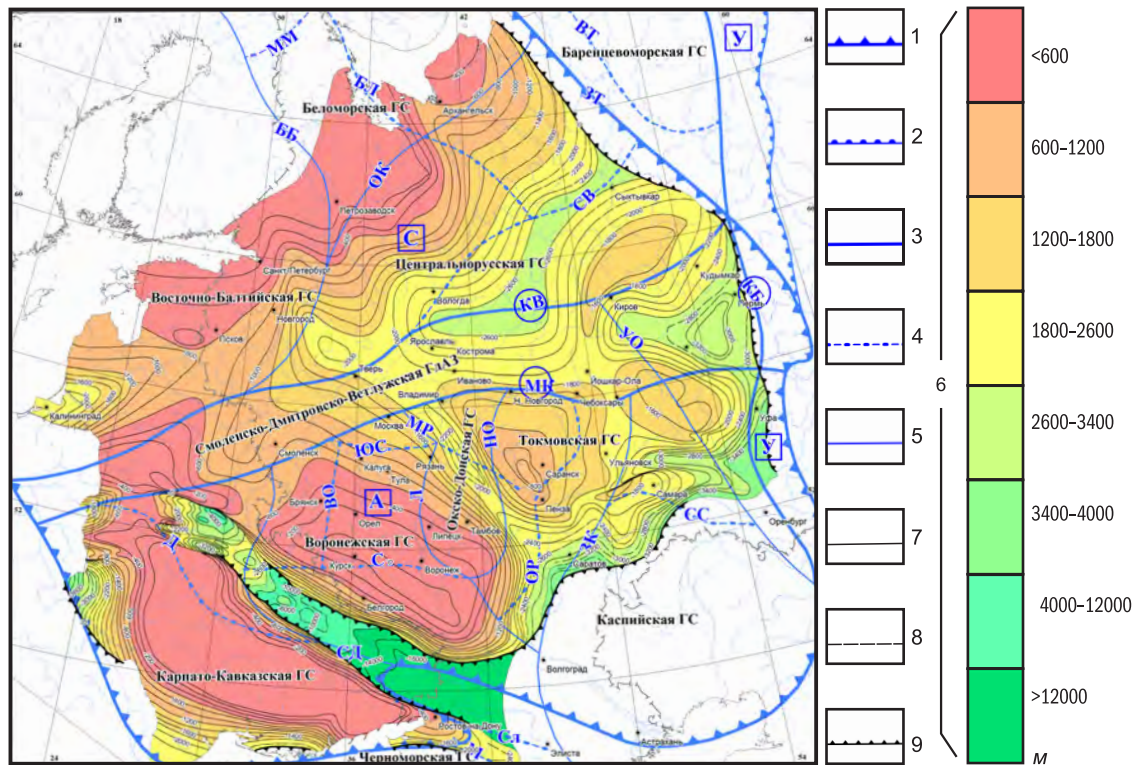


Рис. 2. Новейшие геодинамические системы Восточно-Европейской платформы.

Границы: 1 – ВЕП; 2 – орогенов Урала и Кавказа. Геодинамически активные зоны (ГдАЗ): 3 – панрегиональные (буквы в кругах) (КБ – Камско-Бельская, КВ – Клинско-Вятская, МК – Москворецко-Камская), 4 – региональные, 5 – локальные (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-Вытегдская, СД – Северско-Донецкая, Сл – Сальская, СР – Сурская, СС – Сызрань-Самарская, УО – Уржум-Оренбургская, ЮС – Юхнов-Серпуховская). 6 – шкала глубин поверхности фундамента (м): 7 – установленных, 8 – предполагаемых. 9 – высокоградиентные склоны (уступы) рельефа. Панрегиональные геодинамические системы (буквы в квадратах): А – Альпийская, С – Скандинавская, У – Уральская. Названия региональных систем деформаций показаны на рисунке

магматические центры). Изопахиты и изогипсы слоёв являются как замкнутыми на себя, так и незамкнутыми, что позволяет рассматривать их в качестве изгибов (деформаций), соответственно, с полным и прерывистым типом развития [Атлас ..., 1989; Тектоническая ..., 2007]. Полные деформации имеют линейную (спрямлённую), овальную и изометричную конфигурацию, прерывистые являются заливо- и террасообразными. На рисунках стиль деформаций подчёркивается осевыми линиями.

Согласно геодинамическим принципам, деформации типизированы на геодинамически активные и относительно пассивные (наведённые) [Макарова и др., 2017; Макеев и др., 2018]. В качестве первых рассматриваются контрастные выступы и погружения Мохо, аномальные раздувы и утонения глубинных слоёв, которые при прочих равных условиях (выраженность в деформациях поверхности кристаллическо-

го 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 (наведённые). Некоторым связующим их элементом являются концентрические и радиальные деформации с прерывистым типом развития.

### Деформации раздела Моховичича (Мохо)

Раздел Мохо на ВЕП интенсивно дифференцирован по глубине от 35 до 50 км [Атлас ..., 2013; Краснопецева, Шукин, 2000]. Его дифференцированность позволяет выделить поднятия и опускания, принадлежащие к трём разным



геодинамическим областям – Каспийской, Балтийской и Приднестровской<sup>1</sup> (рис. 3).

1. Каспийская область (I) выделена в юго-восточной части ВЕП. Её локализация совпадает с Прикаспийской синеклизой и частично с Воронежской и Волго-Уральской антеклизами. Активным центром области является Центрально-Каспийский мантийный выступ 35 км (1). От него в разные стороны распространяется несколько деформаций радиального типа. Из них наиболее протяжённой является Общесыртско-Камская (ОБК) субмеридионального простирания. Две другие (безымянные) являются менее протяжёнными, при этом одна направлена из центра на запад в сторону Рязани, другая – почти на юг в сторону Предкавказья. От выступа к Воронежской антеклизе отмечена зона резкого погружения раздела Мохо с 35 до 45 км. С ней согласуется новейшая Западно-Каспийская геодинамически активная зона (ГдАЗ) сейсмогенного типа [Землетрясения ..., 2007; Макарова и др., 2017].

Над мантийным выступом мощность отложений Прикаспийской синеклизы составляет ~24 км. Литостатическое давление этой толщи на выступ и, возможно, встречное его поднятие вызывает 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, выражающаяся в рельефе образованием Ергенинского, Приволжского, Бугульминско-Белебеевского и Урало-Эмбенского возвышенных поднятий [Макеев и др., 2018].

Отток глубинного вещества с вращением вокруг мантийного выступа под действием центробежных сил привёл к образованию Каспийской радиально-концентрической области, конформной с новейшим Циркум-Каспийским прогибом.

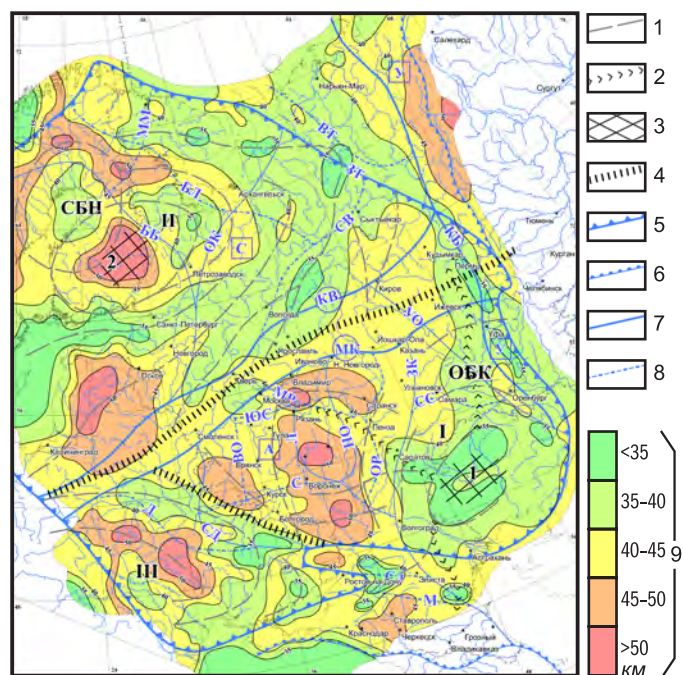


Рис. 3. Деформации раздела Мохо.

1 – осевые линии деформаций; 2 – деформации радиального типа, исходящие из активного центра в стороны (ОБК – Общесыртско-Камская); 3 – геодинамически активные центры; 4 – зоны структурных несогласий (активные зоны); границы: 5 – ВЕП, 6 – орогенов Кавказа и Урала (конвергентные зоны литосферных плит и блоков). Новейшие геодинамически активные зоны (ГдАЗ): 7 – региональные, 8 – локальные; 9 – шкала глубин раздела Мохо. На рисунке жирным шрифтом отмечены геодинамически активные центры: 1 – Центрально-Каспийский мантийный выступ, 2 – Центрально-Финляндское опускание. Геодинамические области: I – Каспийская, II – Балтийская и III – Приднестровская; СБН – Северо-Ботнический выступ. Условные обозначения являются общими для рис. 4–6

<sup>1</sup> Названия глубинных геодинамических областей, активных центров и зон даны в соответствии с географической привязкой.

2. Балтийская область (II) выделена в северо-западной части ВЕП. Над ней находятся Фенноскандинавский щит и три синеклизы: Балтийская, Московская и Мезенская. Активных центров, выраженных высокоамплитудными деформациями Мохо, здесь два – Центрально-Финляндское (ЦФ) погружение и Северо-Ботническое (СБН) поднятие (рис. 3).

Над ЦФ погружением (до 50 км) отмечается утолщение земной коры, а на земной поверхности – сводовое поднятие. Их образование могло быть связано с локальным интенсивным погружением мантийной литосферы, которая вызвала растяжение и опускание вышележащих слоёв земной коры. Верхнемантийное опускание компенсируется центростремительным «притоком» глубинного вещества с периферии с развитием послонных складок волочения, что приводит к утолщению коры и последующему её поднятию. Эти процессы привели к образованию Балтийской концентрической области, согласной с новейшим Циркум-Балтийским поднятием, или Фенноскандинавской системой (рис. 2).

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 вызвала под собой опускание Мохо, а последующая деградация ледника – его поднятие [Mourner, 2004]. Считается, что инверсия Мохо продолжается поныне. Подтверждением этого является 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) (рис. 2).

3. 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, с сильно дифференцированным разделом Мохо от 35–40 до 50 км. Деформации выражены выпуклыми на северо-восток относительно пассивными поднятиями и опусканиями (рис. 3), которые наводятся со стороны Карпатской дуги новейшего орогенеза (зона конвергенции литосферных плит и блоков). От него фронт деформаций распространяется в восток-северо-восточном направлении в сторону ВЕП.

Граница двух областей – Приднестровской и Каспийской – является активной. Она согласуется с древним Днепровско-Донецким авлакогеном и новейшей Днепровской ГдАЗ (рис. 1, 2), с которыми связывается сейсмическая активность в регионе [Землетрясения ..., 2007].

### Деформации нижнего слоя земной коры

Мощность (толщина) нижнего слоя является сильно дифференцированной и составляет от 5 до 25 км. Закономерное её изменение отражает изгибы, принадлежащие к четырём разным областям: Каспийской, Восточно-Балтийской, Приднестровской и Прикавказской (рис. 4).

1. Каспийская область (I), выделенная в Мохо, находит своё продолжение и в нижнем слое. Здесь её форма из изометричной становится субширотной. Над Центрально-Каспийским выступом проявлено малое по размеру утолщение до 25 км и несколько изометричных утонений до 5–10 км, от которых в западном направлении вплоть до меридиана Брянска отмечается относительно широкое овальной формы утонение. 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 его части (Уфа, Челябинск) отмечаются аномальные раздувы мощности до 20 км. Первое утолщение расположено почти над аномально выраженным погружением раздела Мохо, возможно, 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 [Новейшая ..., 2000].

2. Восточно-Балтийская область (IX), так же, как и Балтийская, занимает обширную площадь на северо-западе ВЕП (рис. 4). Но, несмотря на схожесть их деформационных рисунков, являющихся циркумобразными, эти области различаются. Причина – 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 было рассмотрено выше, его образование вызвано локальным погружением Мохо. От границ области и, главным образом, с юго-востока к центру происходит неравномерно выраженное утолщение

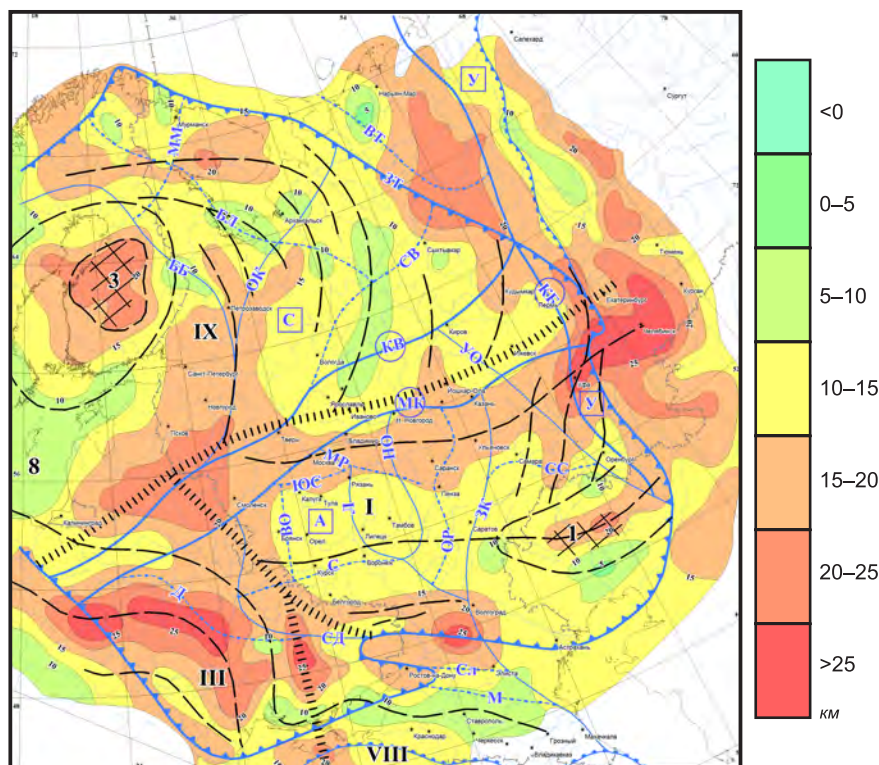


Рис. 4. Деформации нижнего слоя земной коры.

Цветная шкала – изопакиты нижнего слоя (км). Геодинамические области: I – Каспийская, III – Приднестровская, VIII – Прикавказская, IX – Восточно-Балтийская. Геодинамически активные центры: 1 – Центрально-Каспийский, 3 – Карело-Финский, 8 – Готландский. Дополнительные условные обозначения см. на рис. 2 и 3

слоя с 5–10 до 25 км, сопряжённое с дугообразными деформациями. Они отвечают относительным утолщениям и утонениям слоя, образованным по механизму складок «тяги».

Готландский центр расположен к юго-западу от Карело-Финского центра и выражен утонением нижнего слоя до 5–10 км, которое в общих чертах согласуется с выступом раздела Мохо (рис. 3). 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 [Karabanov, 2014]. Последний приурочен к наиболее прогнутой части синеклизы.

3. Приднестровская область (III) является устойчивой по развитию. Она выделена в разделе Мохо, а также в нижнем слое в виде сопряжённых дугообразных утонений до 10–15 км и утолщений до 25 км. Источником сил и напряжений, вызвавшим их образование, является 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 мощ-

ности в нижнем слое с образованием выпуклых к северо-востоку дуг. В свою очередь, они могут вызвать развитие на себе в промежуточном слое складок волочения.

4. Прикавказская область (VIII) выделена на крайнем юге в районе Скифской молодой (эпипалеозойской) плиты. Область выражена утонениями нижнего слоя до 10 км, сопряжёнными с утолщениями до 15–20 км широтного простиранья, 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 полуострова 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: Каспийской, Норландской, Приднестровской, Центрально-Русской и Беломорско-Предтимианской (рис. 5). Из активных центров этих областей в промежуточном слое устойчиво проявлен Центрально-Каспийский выступ. В остальных случаях центры выражены локально, т.е. в отдельных слоях.

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

2. Норландская область (V) выделена в крайней северо-западной части ВЕП — над ней нахо-

дится Фенноскандинавский щит (рис. 5). Её площадь в два раза меньше Балтийской и Восточно-Балтийской областей. Активные центры здесь не выделяются, поскольку они находятся за пределами ВЕП в акватории. В качестве таковых могут рассматриваться дивергентные границы Северо-Атлантической или Арктической зон 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-Предтимианской 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.

3. Приднестровская область (III) устойчиво выделяется в юго-западной части ВЕП, занимая, как всегда, относительно небольшую площадь. Она характеризуется утолщением слоя до 20–25 км, сопряжённым с его утонением до 5–10 км. В отличие от нижнего слоя,

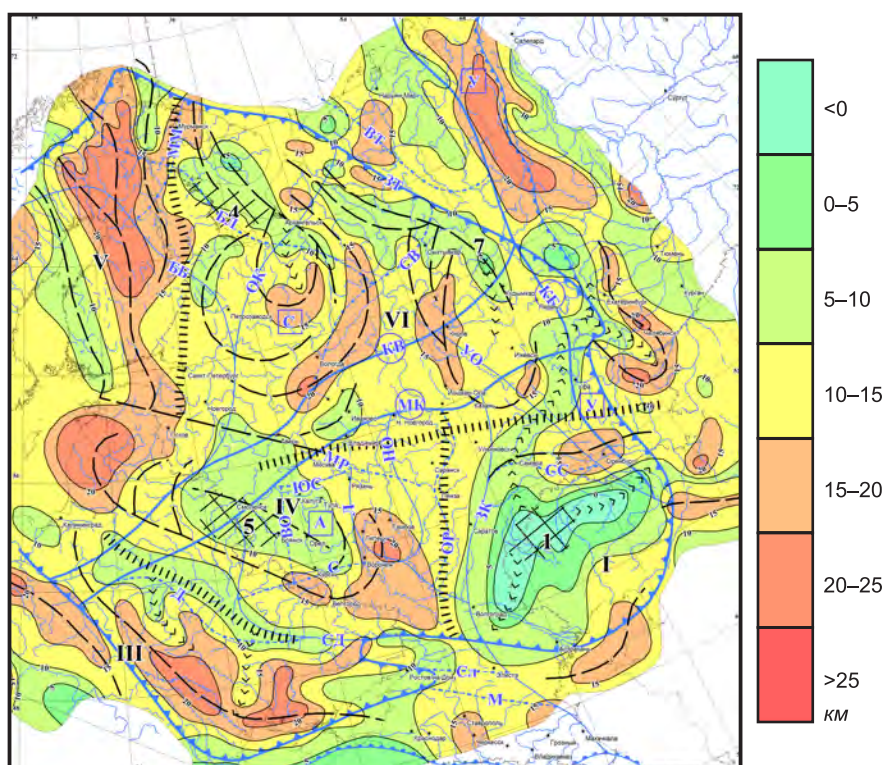


Рис. 5. Деформации промежуточного слоя земной коры.

Цветная шкала — изопахиты промежуточного слоя (км). Глубинные геодинамические области: I — Каспийская, III — Приднестровская, IV — Центрально-Русская, V — Норландская, VI — Беломорско-Предтимианская. Геодинамически активные центры: 4 — Кандалакшский, 5 — Смоленско-Орловский, 7 — Предтимианский. Дополнительные условные обозначения см. на рис. 2 и 3

где деформации согласуются с карпатской дугой, деформации промежуточного слоя являются «антикарпатскими» – в нём дуги выпуклы в обратную сторону, т.е. в сторону Карпат. Происхождение этих дуг можно связать с расщепленностью литосферы по деформациям, т.е. более активные карпатские деформации нижнего слоя вызывают развитие на себе в менее активном промежуточном слое антикарпатских складок волочения (рис. 4, 5).

4. Центральная-Русская область (IV) выделена в центральной части ВЕП. Она имеет овальную форму, несколько вытянутую в северо-западном направлении по линии Смоленск – Орёл. Над ней находятся поднятия Белорусской и Воронежской антеклиз. Активным центром, вызвавшим её образование, является Смоленско-Орловское аномальное утонение до 5–10 км, сопряжённое с двумя пассивными в геодинамическом отношении утолщениями до 20–25 км: первое находится на юго-востоке области и является угловатым, второе – на северо-западе и имеет изометричную форму (район Рижского залива). Утонение в промежуточном слое, возможно, вызвано литостатическим давлением раздува (мощность более 25 км), расположенном над ним в верхнем слое. Его давление привело к оттоку глубинного вещества в нижнем слое и, главным образом, в сторону рассмотренных утолщений (рис. 3, 4).

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) реки Волги. Юго-западной границей рассматриваемой области является узкое утонение до 5–10 км, с которым согласуется прогиб Днепровско-Донецкого авлакогена. Северо-восточная граница области отвечает зоне сопряжения Онежско-Предтимианской и Норландской областей.

5. Беломорско-Предтимианская область (VI) является обширной, объединяющей разнотипные по морфологии деформации: дуговые, линейные и изометричные. Над областью в верхнекоревом слое расположены Мезенская и Московская синеклизы и Волго-Уральская антеклиза. В области выделяются Кандалакшское (западное) и Предтимианское (восточное) утонения небольшой мощности 5–10 км северо-западного простирания, относимые к активным центрам (рис. 5). Вместе эти утонения образуют две левосторонние кулисы, одна из которых, западная, тяготеет к Кандалакшскому позднечетвертичному прогибу-грабену, а восточная –

к Предтимианскому предгорному прогибу. От них к югу в сторону центральных частей 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 нём выделены четыре разные геодинамические области: Каспийская, Онежско-Норландская, Приднестровская и Центральная-Русская (рис. 6).

1. Каспийская область (I), относящаяся к категории длительно и устойчиво развивающихся, имеет радиально-лучистое строение. Её активный центр, выраженный редуцированной частью слоя, отвечает Центрально-Каспийскому выступу Мохо. Характерной особенностью области являются узкие утонения слоя радиального типа, расходящиеся от центра в стороны. Наиболее протяжённое утонение – меридиональное, направленное на север вдоль Предуралья. Менее протяжённые утонения направлены к востоку к Урало-Эмбенскому плато и к югу 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 её активный центр, выраженный мантийным выступом, является устойчивым на протяжении всей эволюции земной коры.

2. Онежско-Норландская область (VII), так же, как Балтийская и Восточно-Балтийская области, занимает северо-западную часть ВЕП (рис. 6). По отношению к небольшой Норландской области она является резко дискордантной, что, возможно, является причиной развития субгоризонтальной расслоенности по деформациям и повышенной сейсмической активности Балтийского щита [*Землетрясения ...*, 2007].

Северо-Норландский активный центр (СН) представлен здесь тремя малыми по размеру аномальными утонениями слоя (10–5 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. На удалении к юго-западу от центра



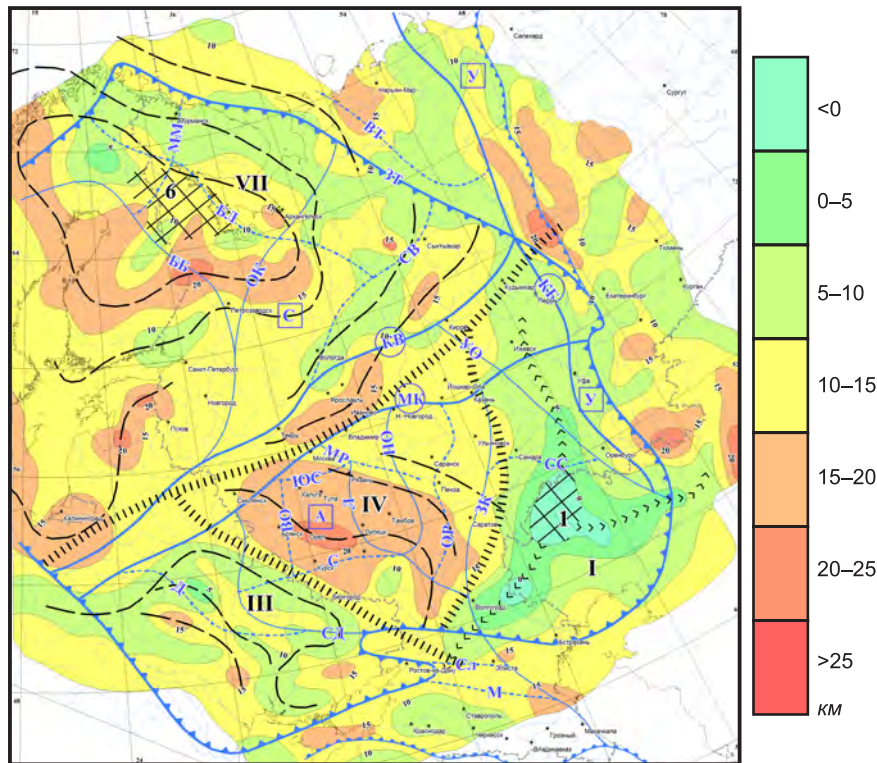


Рис. 6. Деформации верхнего слоя земной коры.

Цветная шкала – изопакиты верхнего слоя (км). Глубинные геодинамические области: I – Каспийская, III – Приднестровская, IV – Центрально-Русская, VII – Онежско-Норландская. 6 – Северо-Норландский активный центр. Дополнительные условные обозначения см. на рис. 2 и 3

образовано подковообразное утолщение слоя до 20–25 км, а к северо-востоку, наоборот, отмечается утонение 5–10 км. В южной и юго-восточной частях области мощности слоя также уменьшаются до 5–15 км. Южная граница рассматриваемой области согласуется с новейшей Смоленско-Дмитровско-Ветлужской зоной (ГдА3) (рис. 2).

3. Приднестровская область (III) устойчиво выражена, как и в других слоях земной коры, но менее ярко. Её деформация подчиняется Карпатскому динамическому фронту, действующему в направлении платформы. Изгибы Приднестровской области не согласуются с деформациями промежуточного слоя, поскольку в нижерасположенном слое выпуклость ориентирована в обратную юго-западную сторону. Подобная расслоённость связывается со способностью земной коры передавать напряжения снизу вверх по разрезу к земной поверхности. Наиболее активным слоем в этом смысле является нижний, который вызывает развитие в промежуточном слое пассивных складок волочения «антикарпатского» типа. В свою очередь, под их влиянием развиваются деформации в верхнем слое.

На земной поверхности под влиянием карпатского динамического фронта формируется ряд поднятий (Предкарпатское, Вольно-Подольское и Приднестровское), сопряжённых с прогибами (Приднепровский и др.). Их интенсивность постепенно угасает в северо-восточном направлении, и на границе Приднестровской и Центрально-Русской областей подобного типа структуры угасают [Макарова и др., 2017].

4. Центрально-Русская область (IV), выделенная в промежуточном слое, находит своё продолжение и в верхнем слое. Здесь она является угловатой и увеличенной по площади. Активный центр области – аномально выраженный раздув до 15–25 км овальной формы, отвечающей Воронежской антеклизе. Его образование, возможно, стало причиной для развития под ним в промежуточном слое своеобразного утонения, о чём было сказано выше. Восточная граница рассматриваемой области с Каспийской областью плавная нерезкая. Такой же построению является северо-западная граница области. Юго-западная граница с Приднестровской областью, наоборот, высокоградиентная, вдоль которой резко уменьшается мощность слоя с 25 до 5–10 км.

## Заключение

Изгибы слоёв земной коры ВЕП, выраженные в изменениях их мощности, районированы с выделением геодинамических областей. Исходя из устойчивости развития, они типизированы на главные и второстепенные (локальные).

**К главным** относятся четыре геодинамические области: Каспийская, Балтийская, Приднестровская, Центрально-Русская. Они характеризуются устойчивым и длительным развитием и проявлены во всех глубинных слоях земной коры.

1. Каспийская область характеризуется утонением всех слоёв над мантийным выступом Мохо вплоть до полной их редукции. От выступа к границам области наблюдается увеличение мощности земной коры от 35 до 50 км с развитием радиальных и концентрических деформаций центрбежного типа. Площадь Каспийской области сокращается снизу вверх по разрезу, и изменяется её конфигурация от субширотной к изометричной и субмеридиональной. Последняя характерна для новейшей внутриплатформенной Циркум-Каспийской системы деформаций.

2. Балтийская область характеризуется активным центром, выраженным высокоградиентным погружением поверхности Мохо, над которым отмечаются раздувы мощности слоёв до 25 км. От центра к периферии области мощность коры может сокращаться до 10–15 км с развитием дугообразных деформаций центростремительного типа. Балтийская область в поверхности Мохо, в нижнем и верхнем слоях является овальной субширотной, в промежуточном слое – субмеридиональной. Её образование можно связать с суперпозицией разнородных латеральных и глубинных сил, проявившихся в виде новейшей Циркум-Балтийской системы деформаций.

3. Приднестровская область также является устойчиво и длительно развивающейся от слоя к слою. В отличие от Каспийской области, её образование связано с латеральным источником сил, находящимся за пределами ВЕП. Закономерной чертой развития является разнонаправленная выпуклость деформаций: в разделе Мохо, нижнем и верхнем слоях их выпуклость – карпатская, а в промежуточном слое – «антикарпатская». Причиной разнонаправленных деформаций являются латеральные напряжения, которые вызывают развитие послонных складок волочения. В приповерхностной зоне им отвечает новейшая Карпатская система деформаций.

4. Центрально-Русская область выделена в промежуточном и верхнем слоях земной коры. В нижнем слое и в разделе Мохо её проявления

не установлены. В качестве активного центра рассматривается аномальный раздув мощности до 20–25 км в верхнем слое и его литостатическое (сверху вниз) давление на промежуточный, 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 как часть панрегиональной Альпийской системы деформаций.

**Локальных геодинамических областей** установлено четыре: Восточно-Балтийская, Онежско-Норландская, Норландская и Беломорско-Предтимаанская. Они выражены в отдельных слоях земной коры и принадлежат, в основном, главной Балтийской геодинамической области. Их формирование связывается с особенностями интерференции локальных деформаций, вызывающих интенсивную расслоённость в земной коре, что требует дальнейшего специального рассмотрения.

Таким образом, глубинные геодинамические области 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 слоёв. Добавим к этому, что деформации слоёв могут быть вызваны мощными ледниковыми центрами. Вторые представлены конвергентными и дивергентными зонами литосферных плит и блоков. Деформации в промежуточном слое чаще всего компенсационные. Глубинная активность передаётся в приповерхностную зону ВЕП, вызывая в ней образование новейших систем деформаций, выраженных преимущественно поднятиями, прогибами и флексурами (ступенями), а также зонами структурных и азимутальных несогласий, или геодинамически активными зонами (ГдАЗ). Зоны рассматриваются как источники повышенных напряжений и деформаций, в т.ч. сейсмогенного типа.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13000/2215-19 и госзадания ИГЭ РАН № АААА-А19-119021190076-9.**

## Литература

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

- Атлас карт глубинного строения земной коры и верхней мантии территории СССР.* — М.: ВНИИГеофизика, 1989. — 84 с.
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы* / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Шукина. Кн. 1: Землетрясения. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. — 381 с.
- Копп М.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А., Тверитинова Т.Ю., Васильев Н.Ю., Корчемагин В.А., Мострюков А.О., Иоффе А.И.* Новейшее поле напряжений востока Русской плиты и Урала по макро- и мезоструктурным данным // *Геотектоника.* — 2014. — № 4. — С. 23–43.
- Краснопевцева Г.В., Шукин Ю.К.* Объёмная глубинная модель земной коры Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований // *Региональная геология и металлогения.* — 2000. — № 10. — С. 73–84.
- Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.* Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал (Труды Геологического института). — М.: Наука, 2018. — 329 с.
- Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Копп М.Л., Расцветаев Л.М.* Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном // *Геотектоника.* — 2001. — № 1. — С. 36–59.
- Макаров В.И.* Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // *Недра 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., Дорошко А.Л., Суханова Т.В., Коробова И.В.* Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // *Бюллетень Московского общества испытателей природы.* — 2017. — Т. 91, вып. 4–5. — С. 9–25.
- Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В.* Глубинная геодинамика Восточно-Европейской платформы и её отражение в новейших геодинамических системах // *Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I тектонического совещания.* Т. 1. — М.: ГЕОС, 2018. — С. 401–404.
- Международная тектоническая карта Европы и смежных областей.* — М.: ГУГК при СМ СССР, 1981.
- Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии* / Ред. А.Ф. Грачев. — М.: Изд-во Пробел, 2000. — 487 с.
- Строение и динамика литосферы Восточной Европы.* Результаты исследований по программе EUROPROBE. — М.: Геокарт, 2006. — 736 с.
- Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий.* — М.: ФГУП ПК «Картография», 2007.
- Тектоническая расчленённость и региональные геологические исследования* // *Труды ГИН РАН.* — М.: Наука, 1990. — 293 с.
- Шукин Ю.К.* Проблемы, вопросы, решения. — Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. — 504 с.
- Шукин Ю.К., Бабак В.И., Краснопевцева Г.В.* О связи структурно-геоморфологических и геолого-тектонических глубинных направлений // *Связь поверхностных структур земной коры с глубинными.* Материалы XIV Международной конференции. — 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., Gorbatschev R., Garetsky R.G.* EUROPE. East European Craton // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.* — Elsevier, 2016. — P. 205–220. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
- 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. — V. 380. — P. 139–157.
- Sim L.A., Marinin A.V., Bryantseva G.V., Gordeev N.A.* Results of tectonic stress of the Northern Eurasia regions // *Geodynamics & Tectonophysics.* — 2018. — V. 9, N 3. — P. 771–800.

#### Сведения об авторах

**Макеев Владимир Михайлович**, д-р геол.-мин. наук, зав. лаб., гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: vmakeev@mail.ru

**Макарова Наталия Валентиновна**, канд. геол.-мин. наук, доцент Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), г. Москва, Россия. E-mail: vladim-makarov@yandex.ru



## Deep deformations of the East European platform Earth's crust: causes and effects

© 2020 V.M. Makeev<sup>1</sup>, N.V. Makarova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IEG RAS, Moscow, Russia; <sup>2</sup>MSU, Moscow, Russia

**Abstract** Object of research is deformation of the deep layers and the Moho surface the East European platform is identified on the basis of structural analysis thickness of the deep layers of the Earth's crust and of the Moho surface. Initial data - geological and geophysical materials of the lithosphere of the East European platform, the thickness of the lower, middle, and upper layers of the Earth's crust and the newest structures. Research methods are structural-geodynamic and comparative- tectonic, which allow us to assess the spatial and temporal variability of deep and near-surface deformations. Results. Active centers and relatively passive deformations associated are combined into geodynamic regions, the boundaries of which are zones of structural disagreement. Geodynamic regions are divided into main and secondary. The first is expressed by stable and long-term development, the second - are shown in separate layers of the Earth's crust. It is established that the protrusions of the mantle lithosphere cause a reduction in the thickness of the layers of the Earth's crust and the formation of the newest trough. The sinking of the mantle lithosphere affects the increase in power in the lower and upper layers and the formation of newest uplifts. The intermediate layer is considered as a compensation layer. Thinning and thick parts of the individual layers lead to the formation of the newest local trough and uplifts. Thus, the conformal and disconform correlation of deformations of deep layers and the newest structures is a characteristic property of the structure of the platform lithosphere. The sources of deep deformations are extra-platform regional areas of recent tectogenesis and intraplatform local active centers - protrusions and trough of the mantle lithosphere, abnormal thickening and thinning of the Earth's crust layers.

**Keywords** Deformation of deep layers, thickening and thinning of layers, geodynamic zoning, tectonic lamination of the Earth's crust, newest structures, discordance and conformality of deformations.

**For citation** Makeev, V.M., & Makarova, N.V. (2020). [Deep deformations of the East European platform Earth's crust: causes and effects]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 57-69. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.05>

### References

- Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profily Rossii». Glubinnye seismicheskie razrezy po profilam GSZ [Atlas "Reference geological and geophysical profiles of Russia". Deep seismic sections according to GSS profiles]. (2013). Saint-Petersburg, Russia: VSEGEI Publ., 94 p. (In Russ.).
- Atlas kart glubinnogo stroeniia zemnoi kory i verkhnei mantii territorii SSSR [Atlas of maps of the deep structure of the Earth's crust and upper mantle of the area of the USSR]. (1989). Moscow, Russia: VNIIGeofizika Publ., 84 p. (In Russ.).
- Bogdanova, S.V., Gorbachev, R., & Garetsky, R.G. (2016). EUROPE. East European Craton. In Reference Module in *Earth systems and Environmental Sciences* (pp. 205-220). Elsevier Publ. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
- Karabanov, A.K. (2014). *Neotectonics and neogeodynamics of Belarus*. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publ., 252 p.
- Kopp, M. L., Verzhbitsky, V. E., Kolesnichenko, A. A., Tveritinova, T. Y., Vasil'ev, N. Y., Korchemagin, V. A., ... & Ioffe, A. I. (2014). Recent stress field in the east of the Russian Plate and the Urals from macro- and meso-structural evidence. *Geotectonics*, 48(4), 273-291.
- Krasnopevtseva, G.V., & Shchukin, Yu.K. (2000). [Volumetric depth model of the Earth's crust of the Eastern European platform based on regional seismic studies]. *Regional'naiia geologiya i metallogeniia* [Regional Geology and Metallogeny], 10, 73-84. (In Russ.).
- Leonov, M.G., Przhiyalgovsky, E.S., & Lavrushina, E.V. (2018). *Granity. Postmagmaticheskaiia tektonika i uglevodородnyi potentsial* [Granites. Postmagmatic tectonics and carbohydrate potential]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 332 p. (In Russ.).
- Leonov, Yu.G., Gushchenko, O.I., Kopp, M.L., & Ras-tsvetaev, L.M. (2001). [Relationship of late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and its Northern platform]. *Geotektonika* [Geotectonics], 1, 36-59. (In Russ.).

- Makarov, V.I. (1996). [Regional features of the newest Geodynamics of platform areas in connection with the assessment of their tectonic activity]. *Nedra Povolzh'ia i Prikaspiia* [The subsoil of the Volga and the Caspian], 13, 49-60. (In Russ.).
- Makarov, V.I., Shchukin, Yu.K., & Yudakhin, F.N. (2007). [The position of the Solovetsky islands in the nontectonic structure of the White Sea, their nature and newest geodynamics]. *Litosfera* [Lithosphere], 3, 86-94. (In Russ.).
- Makarova, N.V., Makeev, V.M., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., & Korobova, I.V. (2017). [Geodynamics systems and geodynamic active zones of the East European platform]. *Biulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody* [Bulletin of the Moscow Society of Naturalists], 91(4-5), 9-25. (In Russ.).
- Makeev, V.M., Makarova, N.V., & Sukhanova, T.V. (2018). [Deep-seated Geodynamics of the East European platform and its reflection in the newest geodynamic systems]. In *Problemy tektoniki i geodinamiki zemnoy kory i mantii. Materialy L tectonicheskogo sovechaniya. T. 1* [Problems of Tectonics and Geodynamics of the Earth's crust and mantle. Materials of the L tectonic meeting. V. 1] (pp. 401-405). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.).
- Mezhdunarodnaia tektonicheskaya karta Evropy i smeznykh oblastey* [International tectonic map of Europe and adjacent areas]. (1981). Moscow, Russia: GUGK CM USSR Publ. (In Russ.).
- Mourner, N.A. (2004). Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia, especially Sweden. Primary structures and secondary effects. *Tectonophysics*, 380, 39-157.
- Noveishaia tektonika, geodinamika i seismichnost' Severnoi Evrazii* [Neotectonics, Geodynamics and seismicity of Northern Eurasia]. (2000). Moscow, Russia: Probel Publ., 487 p. (In Russ.).
- Sharov, N.V., Malovichko, A.A., & Shchukin, Yu.K. (Eds.). (2007). *Zemletriaseniia i mikroiseismichnost' v zadachakh sovremennoi geodinamiki Vostochno-Evropeiskoi platformy. Kn. 1: Zemletriaseniia* [Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform. V. 1: Earthquakes]. Petrozavodsk, Russia: Karelian SCRAS Publ., 381 p. (In Russ.).
- Shchukin, Yu.K. (2014). *Problemy, voprosy, resheniia* [Problems, questions, solutions]. Voronezh, Russia: IPC "Nauchnaya kniga" Publ., 504 p. (In Russ.).
- Shchukin, Yu.K., Babak, V.I., & Krasnopevtseva, G.V. (2008). [On the relationship of structural-geomorphological and geological-tectonic deep directions of the Earth's crust]. *Sviaz' poverkhnostnykh struktur zemnoy kory s glubinnymi. Materialy XIV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Connection of the surface structures of the Earth's crust with the depths. Proceedings of the 14th International Conference] (pp. 369-373). Petrozavodsk, Russia: Karelian SCRAS Publ. (In Russ.).
- Sim, L.A., Marinin, A.V., Bryantseva, G.V., & Gordeev, N.A. (2018). Results of tectonic stress of the Northern Eurasia regions. *Geodynamics & Tectonophysics*, 9(3), 771-800.
- Stroenie i dinamika litosfery Vostochnoi Evropy. Rezul'taty issledovaniia po programme EUROPROBE* (2006). [Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Program research results EUROPRO]. Moscow, Russia: Geocart Publ., 736 p. (In Russ.).
- Tektonicheskaya karta Rossii, sopredel'nykh territorii i akvatorii* [Tectonic map of Russia, adjacent areas and water areas]. (2007). Moscow, Russia: FGUP PKO "Cartography" Publ. (In Russ.).
- Tektonicheskaya rassloennost' i regional'nye geologicheskie issledovaniia (Trudy GIN RAN)* [Tectonic lamination and regional geological studies (Proceedings of the GIN RAS)]. (1990). Moscow, Russia: Nauka Publ., 293 p. (In Russ.).
- Yudakhin, F.N., Shchukin, Yu.K., & Makarov, V.I. (2003). *Glubinnoe stroenie i sovremennye geodinamicheskie protsessy v litosfere Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform]. Yekaterinburg, Russia: UB RAS Publ., 299 p. (In Russ.).

### Information about authors

**Makeev Vladimir Mikhaylovch**, Dr., Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russia. E-mail: vmakeev@mail.ru

**Makarova Nataliya Valentinovna**, PhD, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology (MSU), Moscow, Russia. E-mail: vladim-makarov@yandex.ru