

УДК 551.248.2+550.348.098.64

НОВЕЙШИЕ ПОДНЯТИЯ НА ДРЕВНИХ КРАТОНАХ: ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

© 2017 г. Е.В. Артюшков¹, П.А. Чехович^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Музей земледования, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Большинство современных горных сооружений и высоких плато образовалось за последние несколько миллионов лет в результате резкого ускорения восходящих движений земной коры. По объему сформированного рельефа новейшие поднятия земной коры представляют собой самое мощное явление в континентальной литосфере, для объяснения которого предложен ряд механизмов, среди которых наиболее популярным является увеличение мощности коры за счет латерального сжатия. Однако этот механизм неприменим для покрывающих 70 % площади континентов древних (докембрийских) кратонов, на которых сильное сжатие коры завершилось полмиллиарда лет назад или раньше. Другие возможные объяснения, такие как динамическая топография в мантии, деламинация мантийной литосферы и магматический андерплейтинг, также не согласуются с имеющимися геолого-геофизическими данными по докембрийским кратонам.

В качестве причины быстрых новейших поднятий в таких областях может рассматриваться разуплотнение пород в земной коре вследствие ретроградного метаморфизма при поступлении в неё мантийных флюидов. Проникновение флюидов в крупные разломные зоны коры снижает ее прочность, на что указывает неоднородность распределения поднятий по площади. Это способствует возникновению сильных землетрясений. Примерами могут служить произошедшие в центральной части Северо-Американской платформы Нью-Мадридские землетрясения 1811–1812 гг. ($M \approx 8$), а также землетрясения в Вятском авлакогене на Восточно-Европейской платформе ($M = 4.2$ и 4.7). Поэтому докембрийские кратоны являются отнюдь не такими “спокойными” в сейсмическом отношении, как это часто предполагается.

Ключевые слова: неотектоника, ретроградный метаморфизм, мантийные флюиды, разуплотнение континентальной коры, сейсмичность.

Введение

В плиоцен-четвертичное время на основной части площади континентов произошло резкое ускорение восходящих движений земной коры (см. [Николаев, 1962; Кинг, 1967; Artyushkov, Hofmann, 1998; Summerfield, 2000] и др.). В названное время возникло большинство современных горных сооружений и высоких плато. Амплитуда поднятий коры при этом составила от 100–200 м на северо-западе Сибирской платформы до 5–6 км на Памире, в Андах и Гималаях [Неотектоническая..., 1981; Карта..., 1997]. По объему сформированного рельефа новейшие поднятия – самое мощное явление в континентальной литосфере, в связи с чем его природа представляет большой интерес.

Для объяснения поднятий континентальной коры был предложен ряд механизмов (см., например, обзор в [Cloetingh, Willet, 2013]). Наиболее популярным является увеличение мощности коры при сжатии. Чтобы исключить его действие, можно рассмотреть новейшие поднятия на докембрийской коре, сжатие которой завершилось полмиллиарда лет назад или раньше. Докембрийская кора покрывает основную (около 70 %) часть площади континентов. Ее новейшие поднятия составляют 100–200 м в Северо-Западной Африке и на большей части площади Восточно-Европейской платформы,

500–1000 м на Алданском щите и большей части территории Австралии и достигают 1000–1500 м в Восточной Антарктиде, в Юго-Восточной Африке, на кратонах Бразильском и Конго, а также на плато Путорана на северо-западе Сибирской платформы.

Поднятия коры часто связывают с динамической топографией, возникающей на верхней границе астеносферы под влиянием конвективных течений в мантии и создающей большие вертикальные смещения литосферного слоя (см., например, [Flament, Gurnis, Müller, 2013]). Реальное распределение новейших поднятий и погружений коры резко отличается, однако, от предсказанного на основе главных моделей динамической топографии [Артюшков, Чехович, 2016]. Для объяснения крупных поднятий коры часто используются также деляминация мантийной литосферы и магматический андерплейтинг – подход к коре больших масс горячей магмы. Эти механизмы не согласуются с тем, что в большинстве областей докембрийская кора подстилается слоем мантийной литосферы, имеющей толщину 150–250 км (рис. 1) [Schaeffer, Lebedev, 2013]. Для объяснения поднятий коры можно использовать также упругий изгиб литосферы под влиянием дальнодействующих сил (см., например, [Artyushkov, 1974] и др.). Однако на крупных докембрийских кратонах, составляющих в поперечнике 1000 км и более, этот механизм может обеспечить лишь слабые (~10 м) поднятия.

Частичное или полное замещение мантийной литосферы менее плотной астеносферой наблюдается под многими областями крупных новейших поднятий коры палеозойского и мезо-кайнозойского возраста, как например, под Североамериканскими Кордильерами [Schaeffer, Lebedev, 2013] и Центральным Тянь-Шанем [Vinnik et al., 2004]. Сильно деплетированная мантийная литосфера докембрийских кратонов на ≥ 0.2 г/см³ легче мантийной литосферы в областях, где кора имеет возраст менее полу-миллиарда лет [Artemieva, 2011]. В результате этого докембрийские кратоны, существующие два миллиарда лет и более, оказались очень устойчивыми. Заместить докембрийскую мантийную литосферу может лишь вещество очень сильно нагретого плюма, что, возможно, в недавнее время произошло в Афарской зоне Эфиопии.

Под рядом докембрийских областей, например, таких как кратон Слейв на Канадском щите, Каапваальский кратон в Юго-Восточной Африке и Сибирский кратон, в нижней части мантийной литосферы в ряде мест залегает слой с повышенным содержанием железа и повышенной плотностью (см. [O'Reilly, Griffin, 2006] и др.). В принципе можно допустить, что в некоторых докембрийских областях новейшие поднятия были обусловлены недавним замещением такого тяжелого слоя менее плотной астеносферой. Как показывают расчеты, в этом случае для объяснения наблюдаемых поднятий потребовалось бы разрушение в низах мантийной литосферы слоя толщиной ≥ 50 –100 км [Артюшков, Чехович, 2016]. При подходе астеносферы с температурой 1300 °С к нижней границе утоненной литосферы на этой границе возник бы перепад температуры более 200 °С, что привело бы к снижению скоростей поперечных волн на несколько процентов. Однако таких скачков скоростей под докембрийскими кратонами не наблюдается [Lekić, Romanowitz, 2011]. Это означает, что частичное замещение мантийной литосферы астеносферой не играло существенной роли в новейших поднятиях.

С учетом отмеченного можно предположить, что новейшие поднятия докембрийских кратонов обусловлены разуплотнением пород на малых глубинах – в пределах земной коры [Артюшков, 2012; Артюшков, Чехович, 2016]. На первый взгляд такая возможность представляется неожиданной, но она подтверждается существованием во многих местах сильной неоднородности площадного распределения поднятий. Как хорошо видно на картах [Неотектоническая ..., 1981; Карта ..., 1997], новейшие поднятия часто образуют склоны с крутизной ~1 %. Их протяженность составляет от нескольких десятков до сотни километров при высоте от 100–200 до 1000 м (рис. 2).

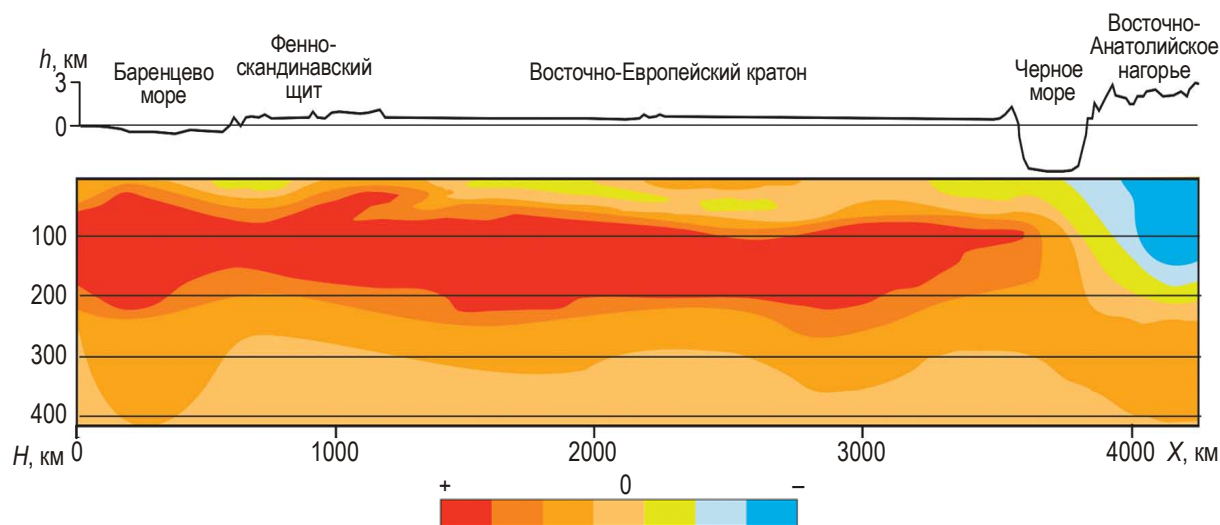


Рис. 1. Вертикальный разрез скоростей поперечных волн в верхней мантии под Скандинавией, Восточно-Европейской платформой и Восточной Анатolieй (по [Schaeffer, Lebedev, 2013] с изменениями)

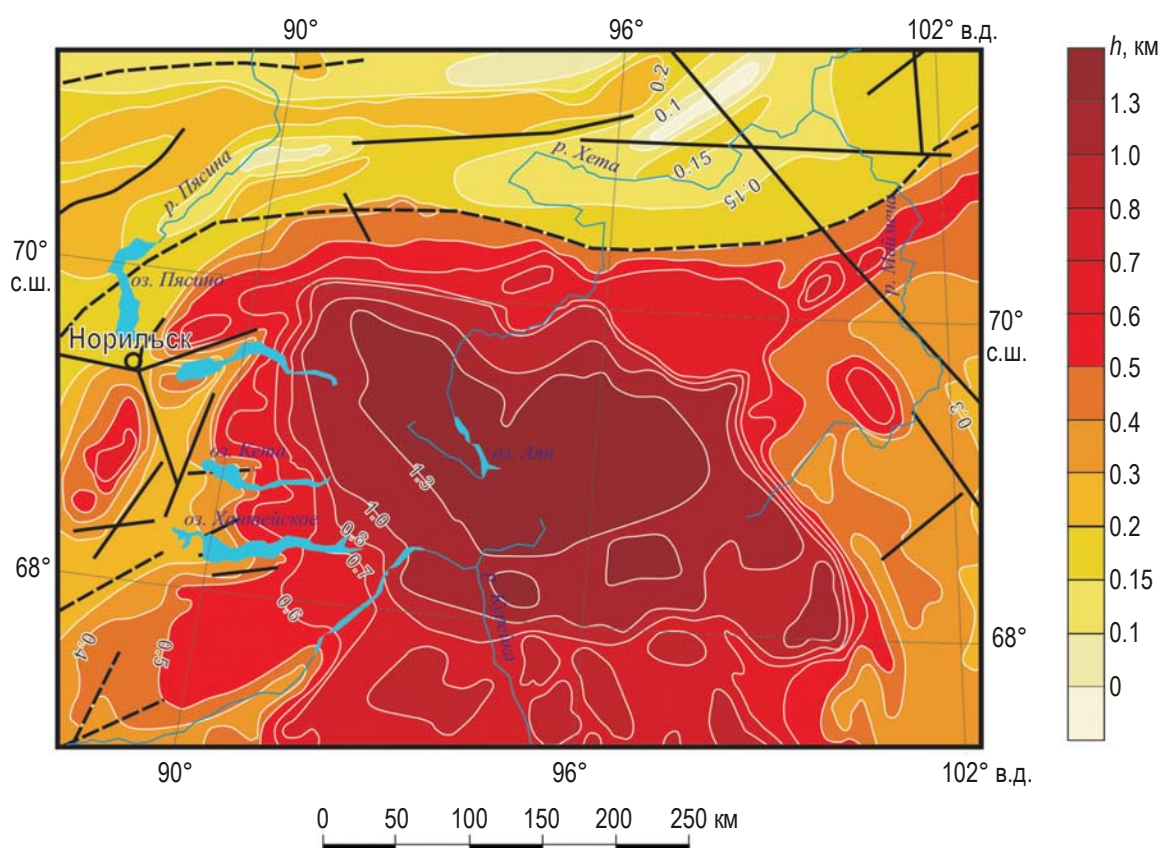


Рис. 2. Новейшие поднятия коры на плато Путорана, расположенном на северо-западе Сибирской платформы (изолинии h , км). Сплошные линии – достоверно установленные разрывные нарушения, пунктирные – предполагаемые. С изменениями по [Карта..., 1997]

Так, плато Путорана на северо-западе Сибирской платформы ограничено склонами шириной 20–30 км и высотой 300–400 м. Формирование таких склонов свидетельствует о неравномерности разуплотнения пород на небольших глубинах, сравнимых с шириной склонов, т.е. в пределах земной коры.

Характерной особенностью плато Путорана является его образование в центре крупной пермо-триасовой трапповой магматической провинции (*LIP*¹). Связывая новейшие поднятия плато с изостатической реакцией коры на увеличение ее толщины, которое произошло 250 млн лет назад, для данной области можно было бы предположить интенсивный андерплейтинг. Согласно данным о послеледниковых поднятиях на докембрийских Канадском и Балтийском щитах, изостатическое равновесие восстанавливается за несколько десятков тысяч лет [Артюшков, 1979]. На сейсмическом профиле “Метеорит” [Суворов и др., 2013] под плато Путорана не наблюдается существенного увеличения мощности коры. В таких условиях новейшее поднятие плато не могло быть связано с пермо-триасовым андерплейтингом.

Разуплотнение в континентальной коре

Новейшие поднятия коры, произошедшие за несколько миллионов лет, нельзя объяснить ее прогревом, для которого требуются десятки миллионов лет. В качестве причины быстрых поднятий можно предположить метаморфизм в породах коры при поступлении флюидов из мантии [Артюшков, 2012; Артюшков, Чехович, 2016]. На это указывает произошедшее в новейшую эпоху резкое повышение гидротермальной и магматической активности во многих внутриплитных областях (см., например, [Ярмолюк, Коваленко, Иванов, 1995; Лаверов и др., 2006; Кузьмин, Ярмолюк, Кравчинский, 2011]). По сообщению крупнейшего южноафриканского геолога Т. Партриджа, на холодном архейском Каапваальском кратоне действуют множество горячих источников (см., например, [Nyabeze et al., 2013]), а в прошлом веке там произошло трещинное излияние базальтовых лав.

На поверхности кристаллической коры докембрийских кратонов залегают породы, образовавшиеся при давлениях от 0.2 до 1.0 ГПа (см. [Ранний..., 2005] и др.). Это указывает на поступательную денудацию с поверхности кратонов толщ суммарной мощностью от 7 до 35 км. Поэтому в настоящее время в средней и верхней коре кратонов залегают породы, образовавшиеся ~2 млрд. лет назад в нижней коре при более высоких температурах T и давлениях P . В равновесном состоянии плотность пород земной коры увеличивается с ростом давления и температуры [Spear, 1993]. Оказавшись на меньших глубинах, комплексы нижней коры могли испытать ретроградный метаморфизм, сопровождавшийся значительным разуплотнением. Метаморфические реакции протекают, однако, с заметной скоростью только в присутствии флюидов [Austrheim, 1987]. Достигнув уровня средней или верхней коры, глубинные породы в “сухом” состоянии оставались метастабильными и сохраняли высокую начальную плотность. Инфильтрация в кору в новейшую эпоху мантийных флюидов привела к быстрому развитию метаморфизма с образованием так называемых “водных минералов”. Как показывает анализ фазовых диаграмм основных типов метаморфических пород, слагающих континентальную кору (метабазиты, гнейсы, метапелиты и др.), их плотность должна была при этом понизиться на 3–10 % [Massonne, Willner, Gerya, 2007]. При сохранении

¹ От англ. *Large Igneous Province*.

изостатического равновесия понижение плотности породы ρ на величину $\Delta\rho$ в слое начальной толщиной h приводит к поднятию коры на величину $\zeta=(\Delta\rho/\rho)h$.

При относительном разуплотнении на $\Delta\rho/\rho=3-10\%$ в слое толщиной 10–15 км поднятие коры составляет 300–1500 м, что сопоставимо с величиной поднятий на большинстве докембрийских кратонов.

Для образования новейших поднятий коры вследствие разуплотнения пород за счет метаморфизма в нее должны были бы поступить из мантии флюиды в объеме, сопоставимом с объемом сформированного рельефа. Субсинхронное возникновение поднятий на разных континентах после продолжавшегося около 100 млн лет периода относительной стабильности заставляет предполагать существование единого источника, который в течение сравнительно короткого отрезка времени (несколько миллионов лет) мог бы обеспечить отмеченную субсинхронность. Необходимым условием этого, скорее всего, должна быть низкая вязкость вещества в данной области. В качестве осторожного предположения можно допустить, что этим источником служит земное ядро, из которого в новейшую эпоху был выброшен большой объем водорода. Однако данный вопрос требует отдельного рассмотрения.

Обычно предполагается, что на докембрийских кратонах эффективная упругая толщина литосферного слоя T_y [Burov, Diament, 1995] очень велика и составляет ~60 км [Artemieva, 2011]. Существование многочисленных крутых склонов на крыльях новейших поднятий указывает на присутствие в верхней части докембрийской коры значительно более тонкого слоя, отделенного от нижележащей части литосферы слоем с сильно пониженной вязкостью. Толщина упругого слоя T_y связана с характерной шириной его изгиба L соотношением $T_y \sim 0.05[(L)_{\text{км}}]^{4/3}$ [Artyushkov, Mörner, Tarling, 2000].

Для склона с высотой 1000 м и шириной $L \sim 100$ км, отделяющего высоко приподнятый Каапваальский кратон на юго-востоке Африки от Индийского океана [Partridge, Maud, 1987], эффективная упругая толщина литосферы T_y составляет около 16 км. Для ряда склонов новейших поднятий на плато Путорана, имеющих ширину ~20–30 км (см. рис. 2), $T_y \approx 4$ км. Резкое понижение вязкости коры на небольших глубинах можно, вероятно, связать с проявлением эффекта Ребиндера [Ребиндер, 1979] в результате недавнего поступления в кору мантийных флюидов. В присутствии тонких пленок флюидов вдоль граней зерен деформация кристаллов происходит с высокой скоростью за счет перекристаллизационной ползучести (*pressure solution creep*). С появлением флюидов и понижением вязкости пород коры, вероятно, можно связать отмечаемое во многих областях наличие в коре слоя с пониженной скоростью и повышенной электропроводностью [Каракин, Курьянов, Павленкова, 2003]. Согласно последним данным [Vinnik et al., 2017], необычно высокое отношение скоростей продольных и поперечных волн и высокая электропроводность указывают на существование под архейско-раннепротерозойской Сибирской платформой и докембрийской частью Индии слоя, в котором на глубинах от 20–30 до 40 км содержание флюида составляет порядка 1 %.

В разных областях объем флюида, поступившего в кору из мантии, и проницаемость пород могут сильно различаться. В связи с этим разными могут быть как степень метаморфизма, так и степень обусловленных им разуплотнения коры и амплитуд её поднятия. Состав пород, слагающих земную кору, существенно меняется по площади и по разрезу. Для пород разных типов при одних и тех же изменениях давления (ΔP) и температуры (ΔT) разуплотнение $\Delta\rho$ существенно различно. Более того, $\Delta\rho$ для пород одного и того же типа может быть разным в зависимости от содержания Fe, Al, H₂O и других компонентов [Semprich, Simon, Podladchikov, 2010]. Величина поверхностного

среза коры также сильно варьирует по площади. Соответственно варьируют и ΔP и ΔT в породах нижней коры, испытавших подъем на более высокие уровни. Как показывает анализ фазовых диаграмм [Massonne, Willner, Gerya, 2007], вместе с ними варьирует и возможное понижение плотности $\Delta\rho$ при повторном метаморфизме. Совокупность всех этих факторов вместе с латеральными вариациями эффективной упругой толщины литосферы приводит к сильной неоднородности площадного распределения новейших поднятий коры.

Сейсмичность

В тектоническом отношении докембрийские кратоны часто считаются спокойными, в связи с чем вероятность возникновения сильных землетрясений в них оценивается как очень низкая. Амплитуды новейших поднятий на кратонах существенно меньше, чем в областях с палеозойской и мезо-кайнозойской корой. Тем не менее, они достаточно значительны и достигают 1.0–1.5 км. Более того, во многих областях, как это наблюдается на плато Путорана (см. рис. 2), поднятия сильно неоднородны на площади. Даже на Восточно-Европейской платформе, где новейшие поднятия достигают в основном лишь 100–200 м, существует ряд областей с высокими градиентами вертикальных смещений коры, к которым относится, например, Приволжская возвышенность (рис. 3). В нескольких местах на территории этой возвышенности новейшие вертикальные смещения коры различаются на сотни метров при расстояниях между ними в несколько десятков километров. Вертикальные смещения коры в этой области достигают 600–700 м, но в результате интенсивной эрозии высота рельефа оказывается небольшой.

Значительное ускорение поднятий коры на докембрийских кратонах после длившегося ~100 млн лет периода относительной стабильности говорит о том, что в течение последних нескольких миллионов лет в их литосферу поступал большой объем флюидов. В таких условиях вязкость пород должна была сильно снизиться. Легче всего флюиды проникали в зоны древних разломов, резко понижая их прочность на сдвиг. Вследствие этого в разломных зонах могли возникать крупные смещения со снятием ранее накопленных напряжений, что должно было сопровождаться сильными землетрясениями.

Наиболее мощным среди сейсмических событий, зарегистрированных в историческое время на докембрийских кратонах, является серия из четырех катастрофических землетрясений, произошедших зимой 1811–1812 гг. в бассейне среднего течения р. Миссисипи (центральная часть Северо-Американской платформы) [Johnston, Schweig, 1996]. По разным оценкам, магнитуды толчков составляли от $M=7.0$ – 8.0 до $M=7.4$ – 8.6 ; вертикальные смещения по разрывам достигали 2 м, ширина раскрывшихся трещин – 3 м. Согласно археологическим данным, в этой области и в прошлом происходили сильные землетрясения, которые были связаны с сейсмической зоной Нью-Мадрид, приуроченной к неопротерозойскому авлакогену Рилфут.

Множество аналогичных структур известно и в архейско-палеопротерозойском фундаменте Восточно-Европейской платформы [Валеев, 1978; Грачев, Николаев, Селавинский, 1994; Bogdanova et al., 1996; Kostyuchenko, Egorkin, Solodilov, 1999]. Одной из крупнейших является протягивающаяся от Сыктывкара до Скифской плиты и Кавказа субмеридиональная разрывная зона, осложненная значительными деформациями пород фундамента и чехла, сопровождающимися образованием флексур и авлакогенов. На северном фланге этой зоны находится Вятский (Казанско-Кажимский) авлакоген протяженностью до 700 км, на южном – Доно-Медведицкий авлакоген.

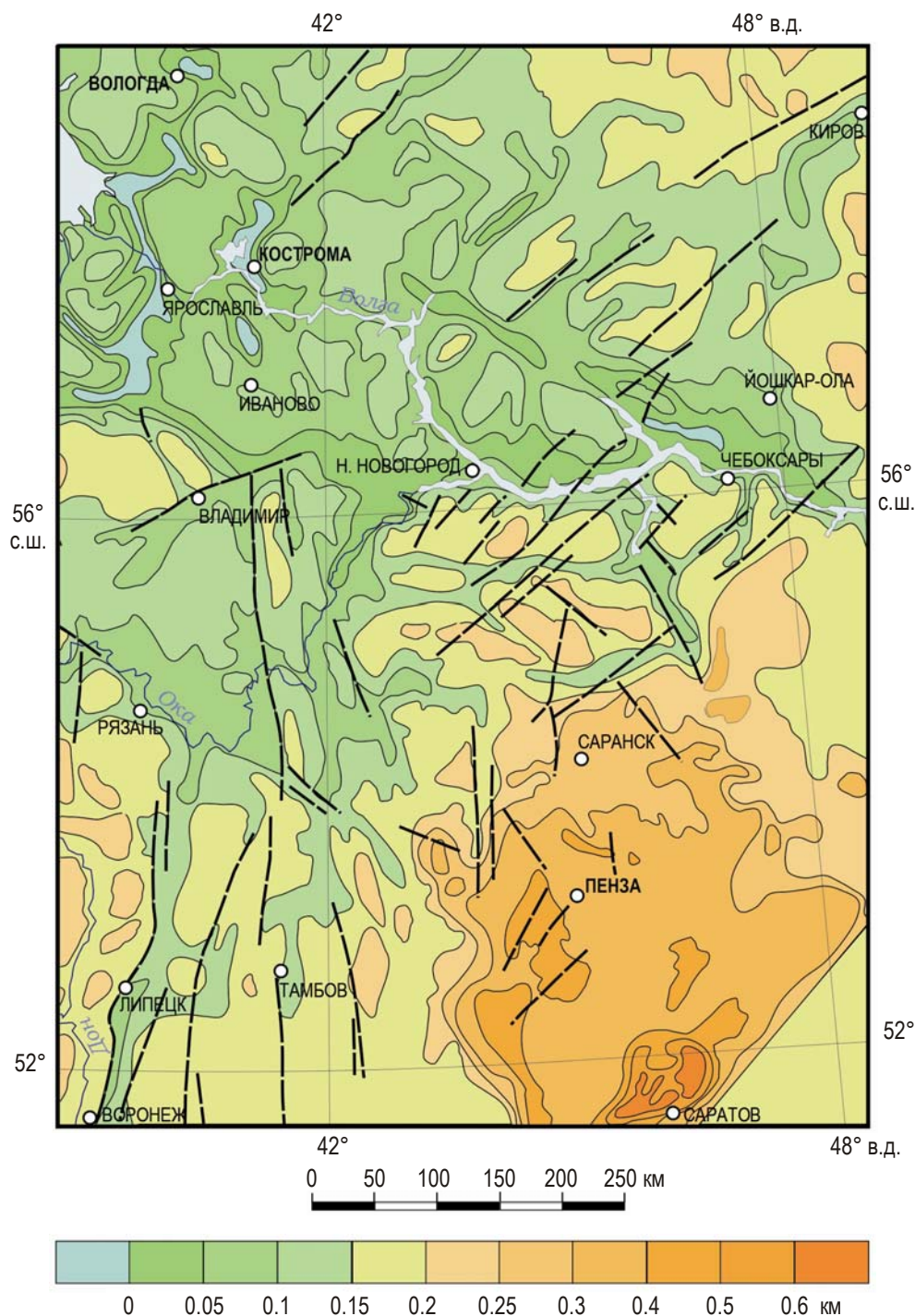


Рис. 3. Новейшие поднятия коры в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы (Приволжская возвышенность). С изменениями по [Карта..., 1997]

В позднем девоне в этих авлакогенах проявлялся трапповый магматизм; в сопряженных структурах (южная часть Днепровско-Донецкого авлакогена) известны и более молодые комплексы щелочных габброидов и лампрофиров с возрастом 162–166 млн лет [Грачев, Николаев, Сеславинский, 1994; Грановский, 2016]. О современной активности этой разломной зоны, возможно, свидетельствуют землетрясения, произошедшие в 1807 г. в Вятке (4 балла, $M=4$) [Никонов, Мокрушина, Лубягина, 2000] и в 1939 г. в Сыктывкаре (7 баллов, $M=4.5$) [Никонов, Чепкунас, 2009].

Заключение

В связи с резким оживлением в новейшую эпоху поднятий земной коры, указывающих на инфильтрацию в литосферу мантийных флюидов, на Восточно-Европейской платформе стали возможны сильные землетрясения. Частота их проявления будет по крайней мере на порядок ниже, чем в тектонически активных областях, но магнитуда может достигать 5–6 и более. Пример подобных событий – землетрясение, произошедшее в 2004 г. в 100 км к востоку от Калининграда. При относительно небольшой магнитуде ($M=4.8$) оно сопровождалось образованием разлома с вертикальными смещениями в несколько десятков сантиметров, разрушениями железнодорожного полотна и шоссе-ских дорог. Это событие не является чем-то уникальным для Калининградской области – в историческую эпоху землетрясения отмечались здесь неоднократно.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в современную эпоху докембрийские кратоны, занимающие основную часть площади континентов, не могут считаться структурами, спокойными в тектоническом отношении. На них происходят значительные, неоднородные по площади деформации литосферы, изучение которых представляет интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам – профессору В.О. Михайлову и члену-корреспонденту РАН Ю.А. Морозову – за конструктивные замечания и предоставленные дополнительные данные.

Литература

- Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука, 1979. 326 с.
- Артюшков Е.В. Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 6. С.738–760.
- Артюшков Е.В., Чехович П.А. Мощность литосферы под докембрийскими кратонами и механизмы их новейших поднятий // Докл. РАН. 2016. Т. 466, № 2. С.188–192.
- Валеев Р.Н. Авлакогены Восточно-Европейской платформы. М.: Недра, 1978. 152 с.
- Грановский А.Г. Магматические комплексы Донецкого складчатого сооружения (Восточный Донбасс) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Пермь: Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета, 2016. С.148–156.
- Грачев А.Ф., Николаев В.Г., Сеславинский К.Б. Эволюция структуры, осадконакопления и магматизма Восточно-Европейской платформы в позднем докембрии и палеозое // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М.: КМК, 1994. С.5–36.
- Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИгеосистем, 2003. 222 с.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии. 1:5000000 / Гл. ред. А.Ф. Грачев. М.: Мин-во природ. ресурсов России, РАН, 1997.
- Кинг Л. Морфология Земли. Изучение и синтез сведений о рельефе Земли. М.: Прогресс, 1967. 560 с.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Кравчинский В.А. Фанерозойский внутриплитный магматизм Северной Азии: абсолютные палеогеографические реконструкции Африканской низкоскоростной мантийной провинции // Геотектоника. 2011. № 6. С.3–23.
- Лаверов Н.П., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Богатииков О.А., Акинин В.В., Гурбанов А.Г., Евдокимов А.Н., Кудряшова Е.А., Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сахно В.Г. Новейший вулканизм Северной Евразии: районирование и обстановки формирования // Докл. РАН. 2006. Т. 410, № 4. С.498–502.

- Неотектоническая карта мира. М-б 1:15 000 000 / Под ред. Н.И. Николаева, Ю.Я. Кузнецова, А.А. Неймарка. М.: Мингео СССР, 1981.
- Николаев Н.И. Неотектоника и её выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 238 с.
- Никонов А.А., Мокрушина Н.Г., Лубягина Л.И. Исторические землетрясения Вятского края // Вестник Вятского государственного педагогического университета. Киров, 2000. № 2/99. С.76–80.
- Никонов А.А., Чепкунас Л.С. Сысольское землетрясение 13 января 1939 г. на Русской плите – уточнение параметров // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36, № 4. С. 25–41.
- Ранний докембрий Балтийского щита / Отв. ред. В.А. Глебовицкий. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Рейбиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 382 с.
- Суворов В.Д., Мельник Е.А., Мишенькина З.Р., Павлов Е.В., Кочнев В.А. Сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном (профиль Метеорит) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 9. С.1411–1426.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская – кайнозойская вулканическая провинция Центрально-Восточной Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. Т. 29, № 5. С.395–421.
- Artemieva I.M. The Lithosphere. An Interdisciplinary Approach. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 773 p.
- Artyushkov E.V. Can the Earth's crust be in a state of isostasy? // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P.741–752.
- Artyushkov E.V., Hofmann A.W. Neotectonic crustal uplift on the continents and its possible mechanisms. The case of Southern Africa // Surveys in Geophysics. 1998. V. 19. P.369–415.
- Artyushkov E.V., Mörner N.-A., Tarling D.L. The cause of loss of lithospheric rigidity in areas far from plate tectonic activity // Geophys. J. Inter. 2000. V. 143. P.752–776.
- Austrheim H. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones // Earth Planet. Sci. Lett. 1987. V. 81. P.221–232.
- Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbatshev R., Orlyuk M.I. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // Tectonophysics. 1996. V. 268. P.1–21.
- Burov E.B., Diament M. The effective elastic thickness (T_e) of the continental lithosphere: What does it really mean? // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P.3095–3927.
- Cloetingh S., Willett S.D. TOPO-EUROPE: Understanding of the coupling between the deep Earth and continental topography // Tectonophysics. 2013. V. 602. P.1–14.
- Flament N., Gurnis M., Müller R.D. A review of observations and models of dynamic topography // Lithosphere. 2013. V. 5, N 2. P.189–210. doi: 10.1130/L245.
- Johnston A.C., Schweig E.S. The Enigma of the New Madrid Earthquakes of 1811–1812 // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1996. V. 24. P.339–384.
- Kostyuchenko S.L., Egorkin A.V., Solodilov L.N. Structure and genetic mechanisms of the Precambrian rifts of the East-European Platform in Russia by integrated study of seismic, gravity, and magnetic data // Tectonophysics. 1999. V. 313. P.9–28.
- Lekić V., Romanowitz B. Inferring upper-mantle structure by full waveform tomography with the spectral element method // Geophys. J. Int. 2011. V. 185. P.799–831. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04969.x.
- Massonne H.-J., Willner A.P., Gerya T. Densities of metapelitic rocks at high to ultrahigh pressure conditions: what are the geodynamic consequences? // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 256. P.12–27.
- Nyabeze P., Saeze H., Yibas B., Tekere M., Tshibalo A.E., Venter J.S., Olivier J., Jonker C.Z., Sekiba M., Motlakeng T. The Geological and Biological Hot Spring Scene in South Africa // Optimal Utilization of Thermal Springs in South Africa. Water Research Commission / Eds. Jana Olivier, Nelia Jonker. 2013. P.15–35.
- O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications // Tectonophysics. 2006. V. 416. P.289–309.

- Partridge T.C., Maud R.P.* Geomorphic evolution of southern Africa since the Mesozoic // *S. Afr. J. Geol.* 1987. V. 90. P.179–208.
- Schaeffer A.J., Lebedev S.* Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194. P.417–449.
- Semprich J., Simon N.S.C., Podladchikov Yu.Yu.* Density variations in the thickened crust as a function of pressure, temperature, and composition // *Int. J. Earth Sci.* 2019. V. 99. P.1487–1510. DOI: 10.1007/s00531-010-0557-7.
- Spear F.S.* Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Miner. Soc. Amer. Monograph.* Washington DC, 1993. 799 p.
- Summerfield M.A.* Geomorphology and Global Tectonics. N.Y.: Wiley, 2000. 386 p.
- Vinnik L., Oreshin S., Makeyeva L., Dündar S.* Fluid-filled porosity of magmatic underplates from joint inversion of P and S receiver functions // *Geophys. Res. Abstr.* 2017. V. 19. EGU2017-4039.
- Vinnik L.P., Reigber C., Aleshin I.M., Kosarev G.L., Kaban M.K., Oreshin S.I., Roecker S.W.* Receiver function tomography of the central Tien Shan // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 225. P.131–146.

Сведения об авторах

АРТЮШКОВ Евгений Викторович – академик РАН, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(962) 920-30-71. E-mail: arty-evgenij@yandex.ru

ЧЕХОВИЧ Петр Андреевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; заведующий сектором, Музей землеведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(903) 203-36-28. E-mail: p.chekhovich@gmail.com

NEOTECTONIC CRUSTAL UPLIFT ON ANCIENT CRATONS: SOME POSSIBLE MECHANISMS AND SEISMICITY

E.V. Artyushkov¹, P.A. Chekhovich^{1,2}

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Earth Science Museum, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Abstract. Most of the present mountain ranges and high plateaus have been formed during the past few million years due to an abrupt acceleration of the crustal uplift. According to a very large volume of the formed relief, recent crustal uplift represents the most powerful phenomenon in continental lithosphere. Several mechanisms have been proposed as the explanations. The most popular one is shortening of the crust due to its lateral compression. However, this mechanism is not applicable to ancient cratons that cover 70 % of the total continental area since strong shortening of the crust terminated in them half a billion years ago or earlier. Other possible explanations, such as dynamic topography in the mantle, delamination of mantle lithosphere and magmatic underplating are also inconsistent with the available geological and geophysical data for the Precambrian cratons. It can be supposed that recent crustal uplift in such areas was the result of expansion of rocks in the crustal layer due to retrograde metamorphism under infiltration of mantle fluids. Penetration of fluids into large faults in the earth's crust reduced their strength. Together with lateral heterogeneity of recent crustal uplift this contributed to the occurrence of large earthquakes. The examples are the New Madrid earthquakes in 1811–1812 with the magnitudes $M \approx 8$ in the South-East of the North American Platform, and the earthquakes with $M=4.2$ and 4.7 in the Vyatka Aulacogen on the East European Platform. Therefore, the Precambrian cratons are not so seismically “quiet”, as is often supposed.

Keywords: neotectonics, retrograde metamorphism, mantle fluids, crustal expansion, seismicity.

References

- Artemieva I.M. *The Lithosphere. An Interdisciplinary Approach*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011.
- Artyushkov E.V. *Geodynamics / Developments in Geotectonics*, Elsevier. 1983.
- Artyushkov E.V. Can the Earth's crust be in a state of isostasy? *J. Geophys. Res.*, 1974, vol. 79, pp. 741–752.
- Artyushkov E.V. Neotectonic crustal uplifts as a consequence of mantle fluid infiltration into the lithosphere, *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 6, pp. 566–582.
- Artyushkov E.V. and Hofmann A.W. Neotectonic crustal uplift on the continents and its possible mechanisms. The case of Southern Africa. *Surveys in Geophysics*, 1998, vol. 19, pp. 369–415.
- Artyushkov E.V., Mörner N.-A., and Tarling D.L. The cause of loss of lithospheric rigidity in areas far from plate tectonic activity, *Geophys. J. Intern.*, 2000, vol. 143, pp. 752–776.
- Artyushkov E.V. and Chekhovich P.A. Thickness of the Lithosphere beneath Precambrian Cratons and Mechanisms of Their Neotectonic Crustal Uplift, *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 466, no. 1, pp. 6–10. DOI 10.1134/S1028334X16010098
- Austrheim H. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1987, vol. 81, pp. 221–232.
- Bogdanova, S.V., Pashkevich, I.K., Gorbatshev, R., and Orlyuk, M.I. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics. *Tectonophysics*, 1996, vol. 268, pp. 1–21.
- Burov E.B. and Diament M. The effective elastic thickness (T_e) of the continental lithosphere: What does it really mean? *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, pp. 3095–3927.
- Cloetingh S., Willett S.D. TOPO-EUROPE: Understanding of the coupling between the deep Earth and continental topography. *Tectonophysics*, 2013, vol. 602, pp. 1–14.
- Flament N., Gurnis M., and Müller R.D. A review of observations and models of dynamic topography, *Lithosphere*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 189–210. doi: 10.1130/L245.
- Grachev A.F., Nikolaev V.G., and Seslavinsky K.B. Evolution of structure, sedimentation, and magmatism of the East-European in the Late Precambrian and Paleozoic, *Tektonika i magmatizm Vostochno-Yevropeiskoi Platformy* (Tectonics and magmatism of East-European Platform), Moscow: KMK, 1994, pp. 5–36. (Proceedings of the International Europrobe Workshop “Intraplate Tectonics and Basin Dynamics”).
- Granovsky A.G. Magmatic complexes of Donetsk folded structure (Eastern Donbass), *Problemy mineralogii, petrografii i mineragenii*. (Problems of mineralogy, petrography and metallogeny), 2016, no. 19, pp. 148–156.
- Johnston A.C. and Schweig E.S. The Enigma of the New Madrid Earthquakes of 1811–1812, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, vol. 24, pp. 339–384.
- Karakin A.V., Kur'yanov Yu. A., and Pavlenkova N.I. *Razlomny, treshchinovatyie zony i volnovody v verhnikh sloyakh zemnoy obolochki* (Faults, joint systems and wave guides in the upper layers of the Earth shell), Moscow: VNIIGeosistem, 2003.
- Karta noveishei tektoniki Severnoi Evrazii. 1:5 000 000* (Neotectonic Map of Northern Eurasia. Scale 1:5 000 000), ed. Grachev A.F. Ministry of Natural Resources of Russia, Russian Academy of Sciences, 1997.
- King L. *The Morphology of the Earth. A Study and Synthesis of World Scenery*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1962.
- Kostyuchenko, S.L., Egorkin, A.V., and Solodilov, L.N. Structure and genetic mechanisms of the Precambrian rifts of the East-European Platform in Russia by integrated study of seismic, gravity, and magnetic data. *Tectonophysics*, 1999, vol. 313, pp. 9–28.
- Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V., and Kravchinsky V.A. Phanerozoic within-plate magmatism of North Asia: Absolute paleogeographic reconstructions of the African large low-shear-velocity province. *Geotectonics*. 2011, vol. 45, no. 6, pp. 415–438.
- Laverov N.P., Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatkov O.A., Akinin V.V., Gurbanov A.G., Evdokimov A.N., Kudryashova E.A., Pevzner M.M., Ponomareva V.V., and Sakhno V.G. Recent Volcanism of Northern Eurasia: Regionalization and Formation Settings, *Dokl. Earth Sci.*, 2006, vol. 410, no. 7, pp. 1048–1052. DOI: 10.1134/S1028334X06070105
- Lekić V. and Romanowitz B. Inferring upper-mantle structure by full waveform tomography with the spectral element method, *Geophys. J. Int.*, 2011, vol. 185, pp. 799–831, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04969.x
- Massonne H.-J., Willner A.P., and Gerya T. Densities of metapelitic rocks at high to ultrahigh pressure conditions: what are the geodynamic consequences? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, vol. 256, pp. 12–27.
- Neotektonicheskaya karta mira. Masshtab 1:15 000 000* (Neotectonic Map of the World. Scale 1:15 000 000), eds. N.I. Nikolaev, Yu. Ya. Kuznetsov, A.A. Naimark, Moscow: MinGeo SSSR, 1981.

- Nikolaev N.I. *Neotektonika i ee vyrazhenie v structure i rel'efe territorii SSSR* (Neotectonics in terms of pattern and topography of the USSR), Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1962.
- Nikonov A.A., Mokrushina N.G., and Lubyagina L.I. Historical earthquakes in the Vyatka Krai, *Vestnik Vyatskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* (Herald of Yyotka State University of pedagogics). Kirov, 2000, no. 2/99, pp. 76-80.
- Nikonov A.A. and Chepkunas L.S. Sysola Earthquake 13st January 1939 on the Russian platform, *Voprosy inzhenernoi seismologii* (Seismic instruments), 2009, vol. 36, no. 4, pp. 25-41.
- Nyabeze P., Saeze H., Yibas B., Tekere M., Tshibalo A.E., Venter J.S., Olivier J., Jonker C.Z., Sekiba M., and Motlakeng T. The Geological and Biological Hot Spring Scene in South Africa, *Optimal Utilisation of Thermal Springs in South Africa. Water Research Commission*, Editors: Jana Olivier & Nelia Jonker, 2013, pp. 15-35.
- O'Reilly S.Y. and Griffin W.L. Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications. *Tectonophysics*, 2006, vol. 416, pp. 289–309.
- Partridge T.C. and Maud R.P. Geomorphic evolution of southern Africa since the Mesozoic, *S. Afr. J. Geol.*, 1987, vol. 90, pp. 179–208.
- Rannii dokembrii Baltiiskogo shchita* (Early Precambrian of the Baltic Shield), ed. V. A. Glebovitsky. St. Petersburg: Nauka, 2005.
- Rebinder P.A. *Izbrannye trudy* (Selected Works). Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical Mechanics, Moscow: Nauka, 1979.
- Schaeffer A.J. and Lebedev S. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone, *Geophys. J. Int.*, 2013, vol. 194, pp. 417-449.
- Semprich J., Simon N.S.C., and Podladchikov Yu.Yu. Density variations in the thickened crust as a function of pressure, temperature, and composition, *Int. J. Earth Sci.*, 2010, vol. 99, pp. 1487–1510. DOI: 10.1007/s00531-010-0557-7.
- Spear F.S. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*, Miner. Soc. Amer. Monograph, 1993.
- Suvorov V.D., Mel'nik E.A., Mishen'kina Z.R., Pavlov E.V., and Kochnev V.A. Seismic inhomogeneities in the upper mantle beneath the Siberian craton (Meteorite profile), *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 9, pp. 1108-1120.
- Summerfield M.A. *Geomorphology and Global Tectonics*, N.Y.: Wiley, 2000.
- Valeev R.N. *Avlakogeny Vostochno-Yevropeiskoi Platformy* (Aulacogens of the East European Craton), Moscow: Nedra, 1978.
- Vinnik L, Oreshin S., Makeyeva L., and Dündar S. Fluid-filled porosity of magmatic underplates from joint inversion of P and S receiver functions, *Geophysical Research Abstracts*, 2017, vol. 19, EGU2017-4039.
- Vinnik L.P., Reigber C., Aleshin I.M. et al. Receiver function tomography of the central Tien Shan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, vol. 225, pp. 131-146.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., and Ivanov V.G. The intraplate late Mesozoic-Cenozoic volcanic province in central east Asia as a projection of the mantle hot field, *Geotectonics*, 1996, vol. 29, no. 5, pp. 395-421.