

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС АНТЕКЛИЗ И ЕГО ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ ВЛИЯНИЕ НА НЕОТЕКТониКУ ПЛАТФОРМ И ПАССИВНЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИН (на примере Восточно-Европейской платформы)

М.Л. Копп

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

Разными структурно-геологическими методами установлено для Русской плиты происходящее при растяжении неотектоническое перемещение деформируемого материала от антеклиз (Воронежской и Волжско-Камской) к соседним синеклизам, особенно наиболее глубокой Прикаспийской. Возникающие при этом геологические структуры и формы рельефа морфологически напоминают оползни, однако огромные (до многих сотен километров) латеральные размеры этих структур исключают влияние экзогенных процессов и заставляют квалифицировать данное событие как гравитационный коллапс, захватывающий значительные объемы коры. Это явление прежде рассматривалось только применительно к орогенам, но условия для его возникновения имелись и здесь: в конце кайнозоя Восточно-Европейская платформа испытала коллизийное давление от южной границы Евразийской плиты, создавшее приподнятый, гравитационно-неустойчивый рельеф. Проявления коллапса особо локализируются в зонах сочленения антеклиз и синеклиз, где происходит утонение линз утолщенной континентальной коры под антеклизами. Данный факт, а также использование литературных материалов моделирования позволяют обосновать положение, что коллапсу на платформе способствовала линзовидная текстура коры: легкие коровые линзы, образующие антеклизы, при сжатии всплывали, но при его последующем ослаблении гравитационно растекались вширь. Гравитационное растяжение и проседание в сводах антеклиз компенсировалось сжатием около синеклиз, где формировались складчатые дислокации и неотектонические валы. Установлено, что гравитационный коллапс создает на платформе свой специфический парагенез структур и морфоструктур, что позволит диагностировать его проявления и в других местах, а также объективнее оценивать соотношения рельефообразования с тектоникой. В более широком плане полученные данные обращают внимание на возможную связь новейшей активизации пассивных континентальных окраин с гравитационным коллапсом самых крупных — материкового масштаба — линз континентальной коры.

Гравитационный коллапс, растекание антеклиз, новейшие стрессы, неотектоника, структурная геология, пассивная окраина, Восточно-Европейская платформа.

GRAVITATIONAL COLLAPSE OF ANTECLISES AND ITS PROBABLE IMPACT ON THE NEOTECTONICS OF PLATFORMS AND PASSIVE CONTINENTAL MARGINS (by the example of the East European Platform)

M.L. Kopp

Structural and geological research has shown that the extension of the Russian Plate caused a neotectonic transition of the deformed material from the Voronezh and Volga–Kama anteclises to neighboring synclises, primarily the deepest Peri-Caspian. The resulting geologic structures and landforms morphologically resembled landslides, but their large (up to many hundreds of kilometers) lateral sizes excluded the influence of exogenous processes and made it necessary to treat this event as a gravitational collapse involving a significant crustal mass. This phenomenon was previously considered for orogens only, but the conditions for its appearance here existed too: In the late Cenozoic, the East European Platform experienced a collisional pressure from the southern boundary of the Eurasian Plate, which led to a gravitationally unstable uplift. The collapse was best manifested in the zones of junction of anteclises and synclises, where lenses of the thickened continental crust are thinned beneath anteclises. This fact, along with the published modeling data, gave grounds to state that the platform collapse was favored by the lenticular crustal structure: The light crustal lenses forming anteclises floated up under compression and diverged under subsequent decompression. Gravitational extension and subsidence in the anticline apexes was compensated by compression near the synclises, where folded dislocations and neotectonic ramparts formed. It has been established that a gravitational collapse results in a specific paragenesis of platform structures and morphostructures, which can help to identify its manifestations in other places and to make an unbiased assessment of the relationship between the relief formation and tectonics. In general, the data obtained suggest a relationship between the recent activity of passive continental margins and the gravitational collapse of the largest lenses of the continental crust.

Gravitational collapse, extension of anteclises, recent stresses, neotectonics, structural geology, passive margin, East European Platform

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В основу настоящей статьи положен материал структурно-геологических исследований автора и его коллег динамики и кинематики формирования новейшей структуры востока Русской плиты [Леонов и др., 2001; Копп, 2004; Копп и др., 2014а,б; и др.]. В результате реконструировано напряженно-деформированное состояние этой территории, сделаны выводы об условиях формирования структур разного масштаба и установлен главный источник новейших напряжений — давление коллидировавших с Евразией Аравийской и Индийской литосферных плит. Показана лидирующая роль обстановок сжатия и сдвига в формировании структур, особенно в авлакогенах, и обоснованы структурные признаки усиления сжатия с глубиной.

Однако повторная интерпретация собранного материала и использование приемов геокинематического анализа обстановок растяжения [Копп, 2017а,б] позволили заметить факты, которые сложно связать напрямую с действием удаленных стрессов коллизионного происхождения. В их числе: обширные площади проявления новейшего горизонтального растяжения, особенно заметного на участках древних жестких массивов фундамента (антеклиз, сводов и т.п.). Кроме того, нами обращено внимание на то, что около контуров этих поднятий концентрируются линейные новейшие структуры и морфо-структуры специфической дугообразной формы в плане: флексуры, сбросы и эрозионно-тектонические уступы — «геоморфологические амфитеатры». Объекты такого рода, особенно последние (рис. 1), ассоциируются с оползнями, но их огромная (до нескольких сотен километров) протяженность исключает роль экзогенных процессов в их образовании. Возникает впечатление, что древние антеклизы и своды по-своему активизировались на новейшем этапе и создавали свои собственные поля напряжений и деформаций, природа которых требует отдельного выяснения.

В настоящей статье рассматриваются и анализируются признаки некой автономности развития древних поднятий фундамента платформы в условиях ее вздымания на новейшем этапе. Основные вопросы здесь: 1) каким образом продолжавшийся тогда рост антеклиз согласовывался с одновременно действовавшими наложенными коллизионными стрессами: вели ли себя антеклизы лишь как жесткие неоднородности древней структуры, отклонявшие сильное коллизионное давление, или же они создавали свои собственные поля напряжений, и если да, то какого ранга; 2) в плане кинематики: куда были направлены векторы латеральных перемещений, создаваемых этим полем (или полями?) напряжений, а также формированием каких структур и где именно эти перемещения компенсировались; 3) имелась ли общая причина, ответственная за все перечисленные черты неотектонической активизации востока Русской плиты: влияние мощных коллизионных стрессов на эту активизацию, общее сжатие и воздымание плиты, но при этом отдельный рост антеклиз.

В порядке обсуждения автор обосновывает концепцию, согласно которой такой причиной мог явиться гравитационный коллапс платформы, приподнятой при новейшей активизации. Как известно, гравитационный коллапс — это заключительная стадия орогенеза, где наряду с латеральным выжиманием (эскейпом) коллапс участвует в нивелировке скупивания масс. Однако если при эскейпе это осуществляется посредством перемещения по сдвигам [Molnar, Tapponnier, 1975; Копп, 1979, 1997], то при коллапсе — по структурам растяжения [Dewey et al., 1989; England, Houseman, 1989]. На платформах проявление коллапса прежде не отмечалось, хотя известно, что они также, и не в меньшей степени, деформируются и воздымаются при давлении соседних плит.

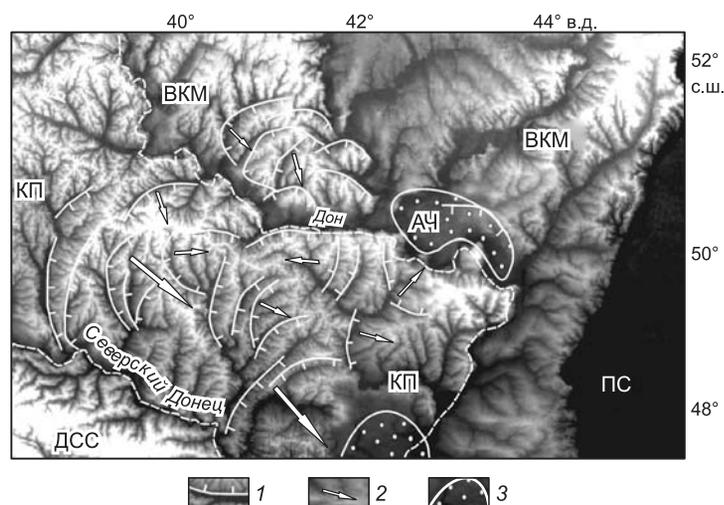


Рис. 1. Выраженный во взаимном расположении геоморфологических амфитеатров латеральный тектонический поток — «тектонический глетчер», спускающийся к Прикаспийской синеклизе по Кантемировскому прогибу между Воронежским массивом и Донецким складчатым сооружением (DEM — цифровая модель рельефа).

ВКМ — Воронежский кристаллический массив, ПС — Прикаспийская синеклиза, КП — Кантемировский прогиб, ДСС — Донецкое складчатое сооружение, АЧ — Арчединско-Чирская новейшая котловина. 1 — геоморфологические амфитеатры, 2 — векторы движения тектонических глетчеров, 3 — новейшие котловины в «устьях» тектонических глетчеров.

МЕТОДИКА

Решение перечисленных вопросов требует углубленного анализа новейшей динамики — вариаций поля напряжений, а также кинематики — направлений, происходящих в этом поле латеральных перемещений блоков по отношению к действующим стрессам и соседним структурам.

Динамика деформации реконструировалась с использованием значительного (более 12 000) массива замеров мезоструктурных кинематических индикаторов (зеркал скольжения, жил, стилолитов и т.п.) в разновозрастных (девон—квартер) породах платформенного чехла. Ко всем им предъявлялось единственное требование — чтобы их новейшая (или, по крайней мере, кайнозойская) деформация была главной в их истории. Попыток вычленивать новейший вклад в суммарную деформацию палеозойских ядер Урала и Донбасса нами не делалось из-за неразработанности бесспорных критериев, зато широко привлекались замеры в дислоцированных позднемезозойско-неогеновых слоях на крыльях этих орогенов. Первичные результаты наблюдений, представленные в виде кинематических стереограмм для каждой точки наблюдений, а также синоптические стереограммы плотности мезоструктур разной кинематики для крупных тектонических доменов опубликованы в работах [Копп, 2004; Копп и др., 2014а,б] и сопутствующих статьях.

Региональные вариации поля напряжений демонстрируются его трехмерной (3D) моделью, синтезированной на компьютере О.И. Гущенко, Н.Ю. Васильевым и А.О. Мострюковым с использованием структурно-кинематического метода О.И. Гущенко [Гущенко, 1982, 1996, 1999; Васильев и др., 2012]. Репродуцированная на горизонтальную картографическую основу (рис. 2) эта модель показывает поле напряжений в его непрерывном виде (с постепенной сменой на местности стресс-режимов разного типа) и с точными ориентацией и направлением наклона осей главных нормальных напряжений. Благодаря последней опции используемая программа еще и компенсирует неизбежное искажение прямых углов между сопряженными осями главных нормальных стрессов противоположного знака при трансформации наклонных линий в трехмерном пространстве на горизонтальную плоскость. Это достигается тем, что программа обеспечивает графическое восприятие направления и крутизны наклона линий: сам наклон направлен от центральной точки символа напряженного состояния, а его крутизна обратно пропорциональна длине проекции соответствующей оси на горизонтальную плоскость.

Тип стресс-режима здесь легко определяется по взаимной конфигурации горизонтальных проекций двух главных осей нормальных напряжений противоположного знака (рис. 3). Из полного ряда выделяемых в структурной геологии стресс-режимов, действующих в горизонтальной плоскости (см., например, [Delvaux et al., 1997]), представительность собранного мезоструктурного материала и необходимый для его обобщения уровень генерализации позволяют выделить три главных режима: горизонтальное сжатие, или надвиговый режим, горизонтальное растяжение, или сбросовый режим, и горизонтальный сдвиг, или сдвиговый режим.

Выделяется и особый стресс-режим вертикального сдвига, когда сопряженные оси главных нормальных напряжений противоположного знака находятся на общем простирании, но при этом косо наклонены в противоположные стороны к горизонту, при этом образуя между собой прямой угол в вертикальной плоскости. Этот стресс-режим, особенно характерный для платформенных плит, возникает при наклонном положении осей действующих напряжений, а в мезотектоническом материале представлен широким распространением субвертикальных зеркал скольжения с наклоном штриховки по падению сместителя, иногда встречаются и субгоризонтальные зеркала скольжения. В значительной мере его проявление — результат динамической расслоенности коры платформенной плиты, подвергшейся воздействию наложенных горизонтальных давлений: инициированные движениями соседних плит горизонтальные стрессы распространяются вширь через жесткий фундамент платформы, тогда как вверх, проходя через мягкий чехол, гасящий напряжения, они передаются лишь в ослабленном виде (подробнее см. [Копп, 2004; Копп и др., 2014б]). Соответственно, в верхах чехла (где как раз производятся мезотектонические замеры) деформация в существенной мере имеет отраженный характер, и над козырьками глубинных надвигов нередко развиваются участки растяжения, а по бортам валов — субвертикальные разрывы «взрезового» типа (термин В.В. Белоусова). Доказанные примеры такого рода — Саратовские и Вятские дислокации [Копп, 2004; Копп и др., 2014а,б]. Эти отраженные деформации в верхах чехла в целом являются фоновыми, и при повышении уровня генерализации их представительность снижается: они выпадают из статистики. И это, в свою очередь, помогает обратить внимание на мезоструктурные парагенезы, связанные с действием глубинных горизонтальных напряжений. Однако, по нашим наблюдениям, участки распространения «взрезового» режима иногда образуют устойчивые ареалы и при высокой генерализации (см. рис. 2), и дальше попробуем предложить тому свое объяснение.

Возможность использования наклонов осей напряжений оказалась эффективной для анализа динамики деформации в платформенной плите с мощным чехлом, причем, как выяснилось на практике, направления наклонов осей сжатия, с одной стороны, и осей растяжения — с другой, вызваны своими фундаментальными причинами: первые чаще наклонены по направлению регионального давления, вы-

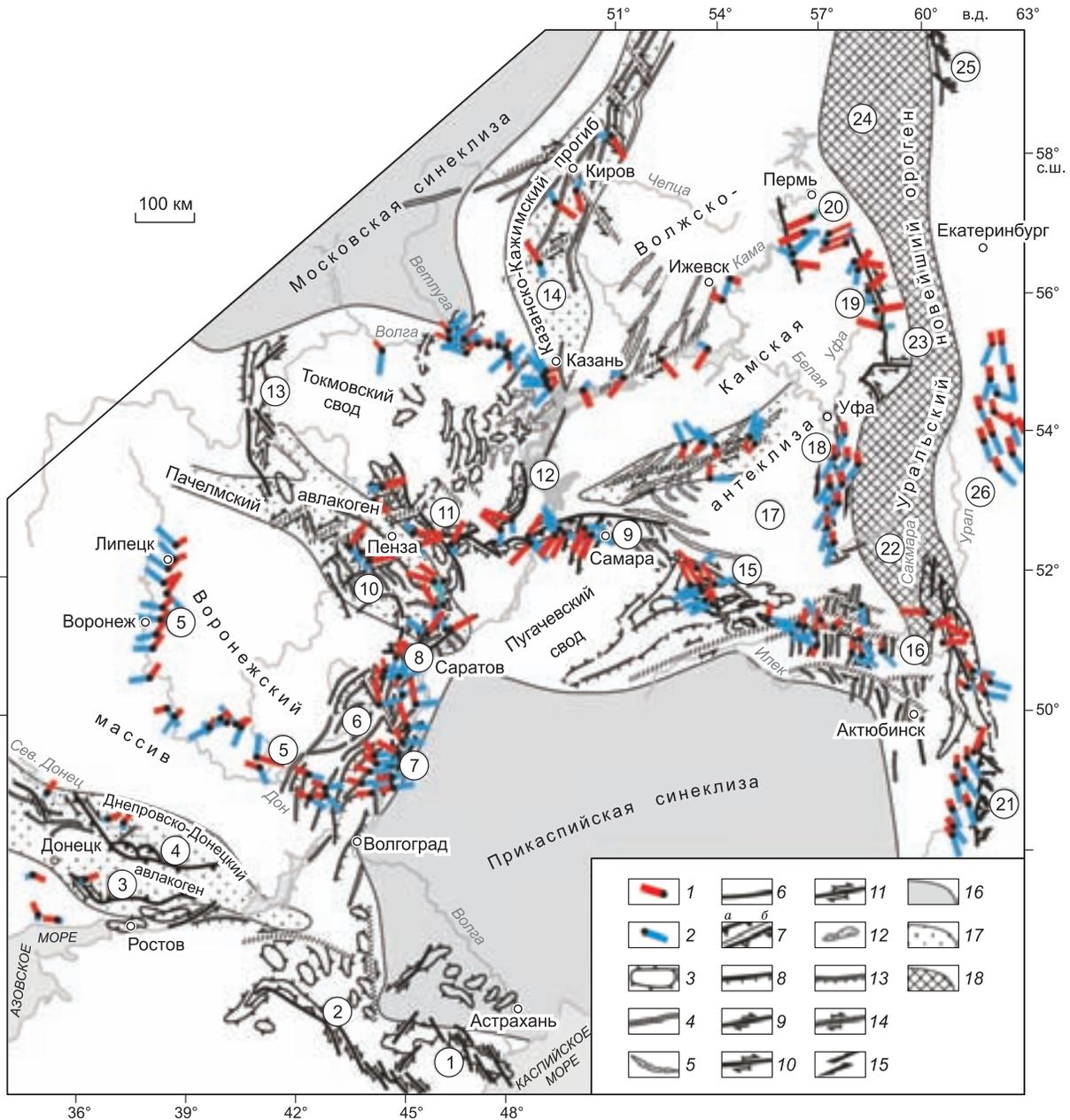
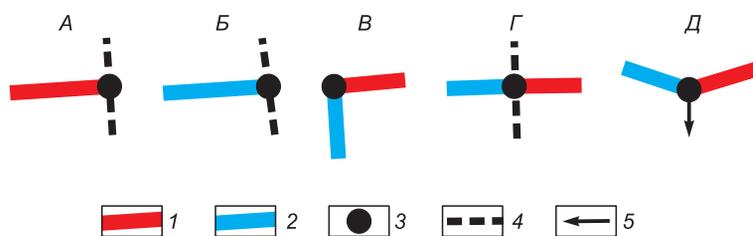


Рис. 2. Проецированная на горизонтальную плоскость трехмерная (3D) модель новейших напряжений востока Русской плиты и Южного—Среднего Урала на фоне региональных кайнозойских структур.

Компьютеризирована О.И. Гущенко, Н.Ю. Васильевым и А.О. Мострюковым по результатам анализа мезоструктурных данных, собранных автором и его коллегами; радиус палетки осреднения равен 3° для 60 замеров. Горизонтальные проекции осей главных нормальных напряжений: 1 — сжатия, 2 — растяжения. Наклон каждой оси направлен от центральной точки символа, крутизна наклона обратно пропорциональна длине соответствующей проекции оси. 3—15 — кайнозойские структуры: 3—5 — пликативные: 3 — линейные мегавалы и изометричные поднятия, 4 — оси валов, 5 — оси валов предположительно кайнозойского возраста; 6—14 — дизъюнктивные: 6—11 — разрывы: 6 — неясной кинематики, 7 — надвиги (вершины треугольников обращены к надвинутому крылу); а — доказанные, б — предполагаемые; 8 — сбросы (штрихи обращены к сброшенному крылу), 9—11 — сдвиги с кинематикой: 9 — определенной по смещениям структур, 10 — предполагаемой по макроструктурному рисунку, 11 — то же, с подтверждением по мезоструктуре; 12 — зоны мелких надвиговых дислокаций, 13 — вертикальные флексуры (штрихи — по падению смыкающего крыла), 14 — горизонтальные флексуры (с кинематикой сдвига, предполагаемой по макроструктурному рисунку), 15 — широкие зоны сдвига (по структурному рисунку), с неясными ограничениями; 16—18 — элементы районирования: 16 — синеклизы, 17 — авлакогены, 18 — новейший Урал. Новейшие структуры (цифры в кружках): 1 — Промышленно-Цубукский вал, 2 — Сальско-Маньчский вал, 3 — Персиановский надвиг, 4 — Северодонецкий взбрососдвиг, 5 — Среднедонская новейшая флексура, 6 — Доно-Медведицкие дислокации, 7 — Балыклейские грабены, 8 — Саратовские дислокации, 9 — Жигулевские дислокации, 10 — Керенско-Чембарские дислокации, 11 — Сурско-Мокшинские дислокации, 12 — Борлинский вал, 13 — Окско-Цнинский вал, 14 — Вятские дислокации, 15 — свод Общего Сырта, 16 — складчатые дислокации там же, 17 — Бугульминско-Белебеевский свод, 18 — Бельские дислокации, 19 — Уфимский свод, 20 — Тулвинский свод; 21—24 — новейший Урал, сегменты: 21 — Мугоджарский, 22 — Южно-Уральский, 23 — Среднеуральский, 24 — Североуральский; 25 — Лозьвинские дислокации, 26 — Зауральская структурная терраса.

Рис. 3. Схема, облегчающая правила определения типа стресс-режима на трехмерной модели напряженного состояния, проецированной на горизонтальную плоскость (см. рис. 2).



A — режим горизонтального сжатия (надвиговый): ось главного нормального сжатия горизонтальна, ось главного нормального растяжения вертикальна, ребро прямого двугранного угла между плоскостями действия этих напряжений горизонтально (штриховая линия);

B — режим горизонтального растяжения (сбросовый): ось главного нормального растяжения горизонтальна, ось главного нормального сжатия вертикальна, ребро прямого двугранного угла между плоскостями действия этих напряжений горизонтально (штриховая линия); *B* — режим горизонтального сдвига (сдвиговый): оси главных нормальных напряжений сжатия и растяжения горизонтальны, ребро прямого двугранного угла между плоскостями действия этих напряжений вертикально (точка, совпадающая с центром символа напряженного состояния), *Г* — режим вертикального сдвига («взрезовой»): ортогональные одна к другой оси главных нормальных напряжений сжатия и растяжения находятся на одном простирании, но при этом косо наклонены к горизонту в противоположных направлениях, ребро прямого двугранного угла между плоскостями действия этих напряжений горизонтально; *Д* — режим наклонного сдвига: ортогональные одна к другой оси главных нормальных напряжений сжатия и растяжения косо наклонены к горизонту, ребро прямого двугранного угла между плоскостями действия этих напряжений тоже наклонено (стрелка — в сторону наклона).

1 — горизонтальная проекция оси главного нормального сжатия, *2* — то же, оси главного нормального растяжения, *3* — центральная точка символа напряженного состояния (и, одновременно, для *B* — горизонтальная проекция вертикальной промежуточной оси нормальных напряжений (иначе — проекция ребра прямого двугранного угла между плоскостями действия главных нормальных напряжений противоположного знака), *4* (для *A, B, Г*) — горизонтальная проекция ребра прямого двугранного угла между плоскостями действия главных нормальных напряжений противоположного знака, *5* (только для *Д*) — горизонтальная проекция наклоненного, по стрелке, ребра прямого двугранного угла между плоскостями действия главных нормальных напряжений противоположного знака. Знаки *4* и *5* отсутствуют на рис. 2 и 8 во избежание перегрузки рисунков.

зывающего пододвигание блоков, а вторые — отражают кинематику компенсирующих сжатие перемещений материала (подробнее см. [Копп и др., 2014б; Копп, 2017б]); дальше будет показана результативность использования информации такого рода (особенно в аспекте поведения оси растяжения) и для решения вопросов настоящей работы.

Кинематика латеральных перемещений. Для расшифровки согласованных перемещений блоков использовались приемы разрабатываемого автором геокинематического анализа. Согласованность определяется нахождением этих блоков в едином поле напряжений, а специфика — тем, что их предпочтительные направления движений зависят от неоднородностей среды или самого нагружения. Эти обстоятельства, при их наличии, создают кинематическую асимметрию напряженного состояния, когда противоположные крылья разрыва поставлены в неравные условия и лишь одно из них, благодаря меньшему сопротивлению среды, получает ускорение [Копп, 2011, 2017а]. Изучая структуры, компенсирующие смещение, можно установить направление транспорта горных масс относительно более крупных структур, а также путем сопоставления с независимыми данными сделать вывод относительно его причин.

В основе геокинематического анализа находится метод структурных парагенезов [Лукьянов, 1991], в деталях же специфика применения этого анализа рассматривалась для разных стресс-режимов: сдвигового [Копп, 1997], надвигового [Копп, 2007] и сбросового [Копп, 2017а,б]. Для последнего оказалось полезным использование очертаний в плане дизъюнктивных структур растяжения: дугообразный изгиб образуют только те из них, которые, возникнув в общем поле напряжений с прямолинейными структурами, формируются при кинематически асимметричной моде растяжения. При этом облегченное движение испытывает то крыло дугообразной структуры, которое выдвигается от вогнутой стороны образуемой ею дуги (рис. 4). Обоснование этого методического приема и результаты его апробации для конкретных обстановок содержатся в работах [Копп, 2017а,б]. Там, в частности, показано, что формирующиеся в одном и том же поле напряжений дугообразные и прямолинейные структуры растяжения обычно разобщены в пространстве, что подтверждает специфичность их генезиса.

Таковы базовые положения геокинематического анализа, но при его практическом применении, помимо пространственных соотношений крупных (макро-) структур разного знака и очертаний в плане, необходимые сведения удавалось получить привлекая и особенности мезоструктур, замеряемых для определения напряженного состояния. Например, полевые наблюдения позволяют разделить сдвиги со сжатием или, напротив, растяжением поперек сместителя (транспрессионные и транстензионные). Первые из них стеснены в движении, тогда как по вторым движение облегчено. Соответственно, предпочтительное перемещение испытывают те крылья сдвигов или блоки, по краям которых из двух потенциаль-

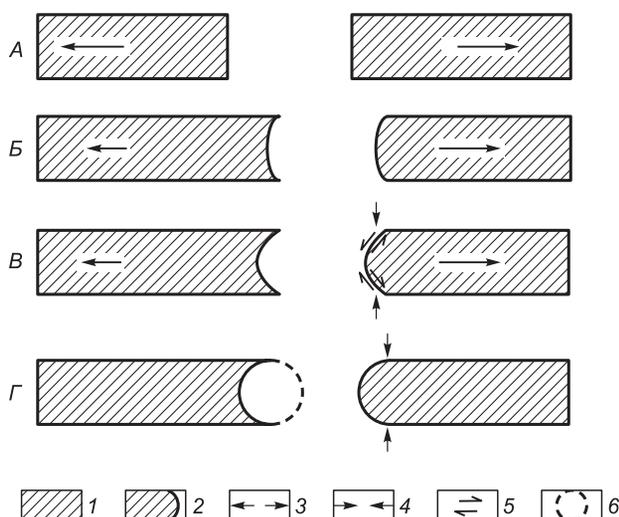


Рис. 4. Влияние кинематики деформации на геометрию в плане линейных структур растяжения (теоретическая схема, план).

A — кинематическая симметрия: разрыв растяжения имеет прямолинейные очертания в плане, *B*, *B* — кинематическая асимметрия: *B* — режим полного растяжения (происходящего без участия сдвига) — разрыв растяжения имеет очертания пологой дуги, *B* — участие сдвига: разрыв растяжения круто изогнут в плане; *Г* — превышение дугообразным разрывом длины полуокружности: возросшее поперечное локальное сжатие блокирует как растяжение, так и сдвиг, возникновение разрыва растяжения становится невозможным [Копп, 2011, 2017а]. 1 — идеализированный растягиваемый блок, 2 — условно гладкая поверхность разрыва, 3 — растяжение, 4 — локальное сжатие, 5 — локальный сдвиг, 6 — виртуальная окружность, в которую вписывается дуга разрыва (*Г*). Более длинные стрелки знака растяжения символизируют вектор предпочтительного смещения, направленного от вогнутой стороны дуги разрыва (*A—B*).

но возможных систем сопряженных сдвигов (левых или правых) реализуется развивающаяся в условиях трансформации. Далее, выше уже отмечалось, что интересную кинематическую информацию предоставляют и реконструированные по мезоструктурным замерам наклон и ориентация оси растяжения.

ДИНАМИКА И КИНЕМАТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ АМФИТЕАТРОВ

Русская плита на востоке включает Воронежскую и Волжско-Камскую антеклизы и Московскую и Прикаспийскую синеклизы. В позднем кайнозое она умеренно деформировалась из-за коллизий Индийской и Аравийской плит с Евразией [Nikishin et al., 1997; Копп, 2004]. При этом с юга от альпийских орогенов Кавказа и Копетдага передавалось субмеридиональное (до ЮЗ-СВ) сжатие и субширотное (до СЗ-ЮВ) растяжение, а с востока — широтное сжатие и меридиональное растяжение от активизированного на новейшем этапе палеозойского Урала (см. рис. 2), находившегося в зоне давления Индийской плиты. По соответствующим вариациям регионального поля напряжений определены ареалы действия этих давлений на платформу и сделана попытка установления их возраста [Копп и др., 2017а,б]. Коллизионные деформации распределились неравномерно: мощные чехлы узких авлакогенов подверглись короблению, тогда как антеклизы и своды фундамента лишь хрупко разрушались при растяжении и сдвиге. Коллизионные сжимающие и растягивающиеся стрессы широко участвовали в деформации рельефа, возникновении трещиноватости и линеаментов, в том числе упомянутых геоморфологических амфитеатров. По поводу природы последних шли долгие дискуссии.

Так, Н.С. Шатский [1922] предположил, что наиболее крупный из них — Ергенинский длиной около 700 км отражает зону погребенных сбросов к западу от Прикаспийской синеклизы, что подкреплялось обнаружением небольших грабенов. В целом же зона разрывов столь большой протяженности не подтвердилась, и Ергенинский уступ стали считать никак не связанным с тектоникой абразионным обрывом плиоценового Палеокаспия. Однако и это объяснение не годится: геоморфологические амфитеатры широко присутствуют и там, куда трансгрессия не доходила, кроме того, около них зафиксированы деформации поверхностей выравнивания и террас [Горелов, 1957; Копп, 2004; Новейшая..., 2006]. Все это заставляет с большим вниманием отнестись к отвергнутой идее дизъюнктивного возникновения амфитеатров.

Динамика формирования геоморфологических амфитеатров. Наши наблюдения показали, что геоморфологические амфитеатры возникли при поперечном к ним растяжении, иногда сопровождающемся сдвигом [Копп, 2004, 2011]. При этом полнота растяжения (по отношению к сдвигу) и его ориентация увязываются с тензором поля коллизионных стрессов.

Во-первых, это проявляется в простирании линеаментов растяжения как дугообразных, так и прямолинейных: на юге (Воронежский массив, Предкавказье), где действует направленное к северу давление от Кавказа, они имеют субмеридиональное простирание, соответствующее ориентации широтного растяжения, ассоциирующего с меридиональным сжатием кавказского происхождения. К северу же (Токмовский и Татарский своды), где усиливается динамическое влияние Урала, линеаменты растяжения ориентированы субширотно, т. е. опять перпендикулярно местной оси растяжения.

Во-вторых, указанные вариации поля региональных стрессов ощущаются в мезоструктурных парагенезах. Так, на главной трассе меридионального Ергенинского уступа между Элистой и Камышином параллельные ему зеркала скольжения сильно наклонены к горизонту, указывая на растяжение в сбросовом режиме (рис. 5), но севернее, где уступ приближается к структурам, сформированным с участием

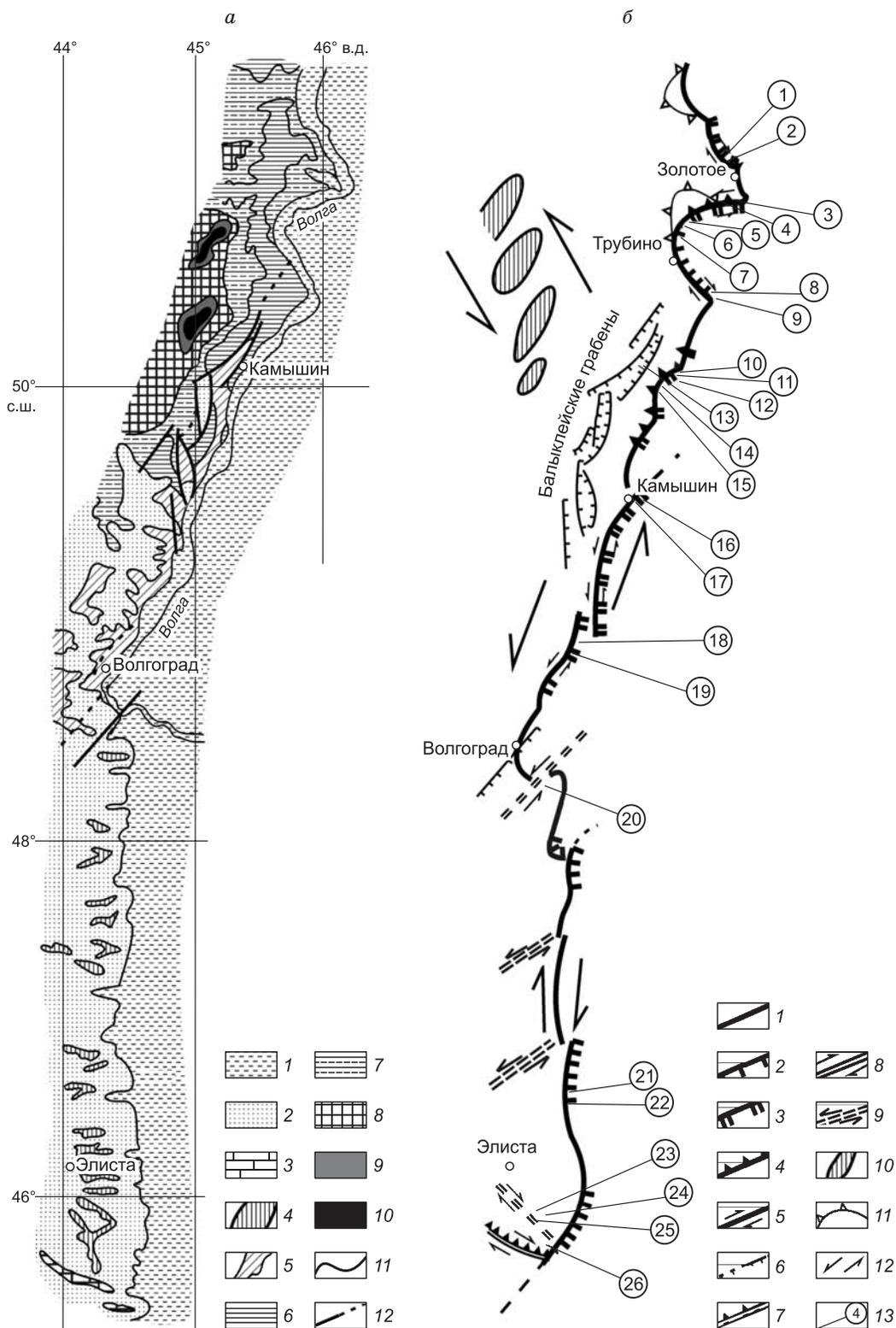


Рис. 5. Структура и динамика формирования Ергенинского уступа.

a — геологическая карта: 1 — четвертичные отложения, 2 — плиоцен, 3 — верхний миоцен, 4 — олигоцен—нижний миоцен, 5 — эоцен, 6 — палеоцен, 7 — верхний мел; 8 — нижний мел, 9 — верхняя юра, 10 — средняя юра, 11 — границы толщ, 12 — разрывы. *б* — структурная схема: 1 — Ергенинский уступ; 2—5 — динамика формирования его участков, по мезоструктурным данным: 2, 3 — сбросы (штрихи — по падению сместителя): 2 — сместителя, наклонного к горизонту, 3 — то же, субвертикального; 4 — взбросы (треугольники — по падению сместителя), 5 — сдвиги; 6 — сбросы, по геологическим данным (штрихи — к сброшенному крылу); 7 — некоторые линеаменты с предполагаемой кинематикой: 7 — взбросовой, 8 — сдвиговой; 9 — то же, предполагаемой по структурному рисунку; 10 — некоторые антиклинали Доно-Медведицких дислокаций; 11 — периклинали погребенных складок; 12 — широкие сдвиги по кулиности структур; 13 — точки наблюдения (1—26).

левого сдвига (Балыклейские грабены), а еще дальше к северу — левого сдвига и сжатия (Доно-Медведицкие и Саратовские складчатые дислокации), продольные к уступу зеркала скольжения становятся круче, зато их штриховка выполаживается, указывая на левый сдвиг со сбросом, а кое-где и со сжатием [Копп, 2004].

В-третьих, региональное стресс-состояние влияет на выраженность самих доменов геоморфологических амфитеатров. Например, их общая приуроченность к контуру Прикаспийской синеклизы резко усиливается у ее северо-западного и северного бортов, где региональные стрессы больше проявились в форме растяжения (рис. 6). Последнее выражено как концентрацией новейших грабенов, так и устанавливается по мезоструктурным данным. Напротив, на восточном (около Урала) и юго-западном (Предкавказье) бортах синеклизы, подвергшихся сжатию со сдвигом, амфитеатры отсутствуют. Точно так же они не выражены и в сжатом Пачелмском авлакогене, хотя в остальных местах Воронежского массива их много (рис. 7).

Значение третьего факта трудно переоценить: он независимо подтверждает образование амфитеатров при растяжении и к тому же указывает на его тектоническую природу. Кроме того, он раскрывает меньшую по сравнению с региональными коллизийными стрессами интенсивность образующего амфитеатры растяжения: на сжатых бортах синеклизы, соседствующих с коллизийными новейшими орогенами Урала или Кавказа, геоморфологические амфитеатры отсутствуют, и это, в свою очередь, заставляет предполагать наличие своего, независимого источника для стрессов, создавших амфитеатры.

Доказанность тектонической природы геоморфологических амфитеатров, наряду с тем, что они встречаются совместно с дугообразными геологическими структурами — флексурами и сбросами (признак парагенетичности), позволяет их использовать для геокинематического анализа и вытекающих сопоставлений. При этом особенно интересным оказалось сопоставление с планом древних структур платформы.

Структурная приуроченность дугообразных vs прямолинейных линеаментов растяжения по отношению к контуру Воронежского массива. Воронежская антеклиза (кристаллический массив), рассматриваемая здесь вместе с Токмовским сводом, демонстрирует обособление прямолинейных линеаментов, образовавшихся при растяжении, от таковых дугообразного очертания (см. рис. 7).

Прямолинейные целиком сосредоточены внутри Окско-Донского меридионального новейшего прогиба, наложенного на свод рассматриваемого массива. На западном борту прогиба они выражены лестницей уступов восточной экспозиции, сформированных при широтном растяжении (см. рис. 7); насчет последнего имеются и соответствующие геофизические данные [Тарков и др., 2002; Орлов, Трегуб, 2009]. Восточнее, около оси прогиба, при сохранении того же простиранья линеаментов, как и их прямолинейных очертаний, развиваются симметричные в профиле и аномально расширенные в плане долины, что можно расценивать как признак нарастающего растяжения внутри прогиба. При этом в целом прямолинейные очертания линеаментов внутри Окско-Донского прогиба свидетельствуют о кинематически симметричной форме растяжения — с приблизительно одинаковым раздвижением и к западу, и к востоку.

Дугообразные линеаменты (геоморфологические амфитеатры), для которых также доказывается обстановка растяжения (см. рис. 7), напротив, сосредоточены не у вершины массива, а у его бортов, где образуют вокруг него цепочку подковообразной формы в плане, приуроченную к границам с Прикаспийской и Московской синеклизами. При этом выраженность и длина амфитеатров отчетливо зависят от относительной крутизны погружения фундамента от антеклизы к ближайшей синеклизе. Так, максимальной длины (многие сотни километров) амфитеатры достигают рядом с наиболее глубокой Прикаспийской синеклизой, тогда как около Московской их длина не превышает 150 км. В седловине же между Токмовским и Татарским сводами, где градиент мощности коры наименьший, они выражены слабо или совсем отсутствуют. Вогнутость амфитеатров повсюду направлена наружу от Воронежского массива, свидетельствуя о центробежном — к соседним синеклизам — движении материала.

Итак, если рассматривать Воронежский массив целиком (вместе с Токмовским сводом), то устанавливается движение масс от его вершины к крыльям и соседним синеклизам. При этом более подчеркнут восточный вектор движения, направленный к самой глубокой Прикаспийской синеклизе. Если считать, что движение материала осуществляется на коровом уровне (а размеры линеаментов и зон их концентрации не позволяют считать иначе), то тогда наложенный на Воронежский массив Окско-Донской прогиб отражает компенсационное утонение коры в центре соответствующей коровой линзы при ее растекании в стороны.

Кинематика движений по структурно-геологическим данным. Предсказываемая геометрией линейных структур растяжения транспортировка материала от антеклиз к синеклизам подтверждается результатами структурно-геологических наблюдений. Здесь примечательны рассчитанные по этим данным ориентация и наклон главных осей нормальных напряжений, особенно оси растяжения. Оказалось, что она повсюду направлена и наклонена по погружению тектонического рельефа: на Среднем и Южном Урале — вдоль него к южной периклинали (см. рис. 2), а от Воронежского массива эта ось погру-

жается во все стороны: на западе к Московской синеклизе, на востоке — к Прикаспийской, на севере — опять к Московской, а на юге — к Днепровско-Донецкой впадине (рис. 8).

Сошлемся также на неоднократно публиковавшиеся автором результаты использования условий формирования сдвигов для определения вектора перемещения [Копп, 2004; и др.]. Так, в зоне меридиональной границы Воронежского массива с Прикаспийской синеклизой из двух возможных систем сдвигов гораздо лучше развиты левые, северо-восточное широтное простирание которых при общем движе-

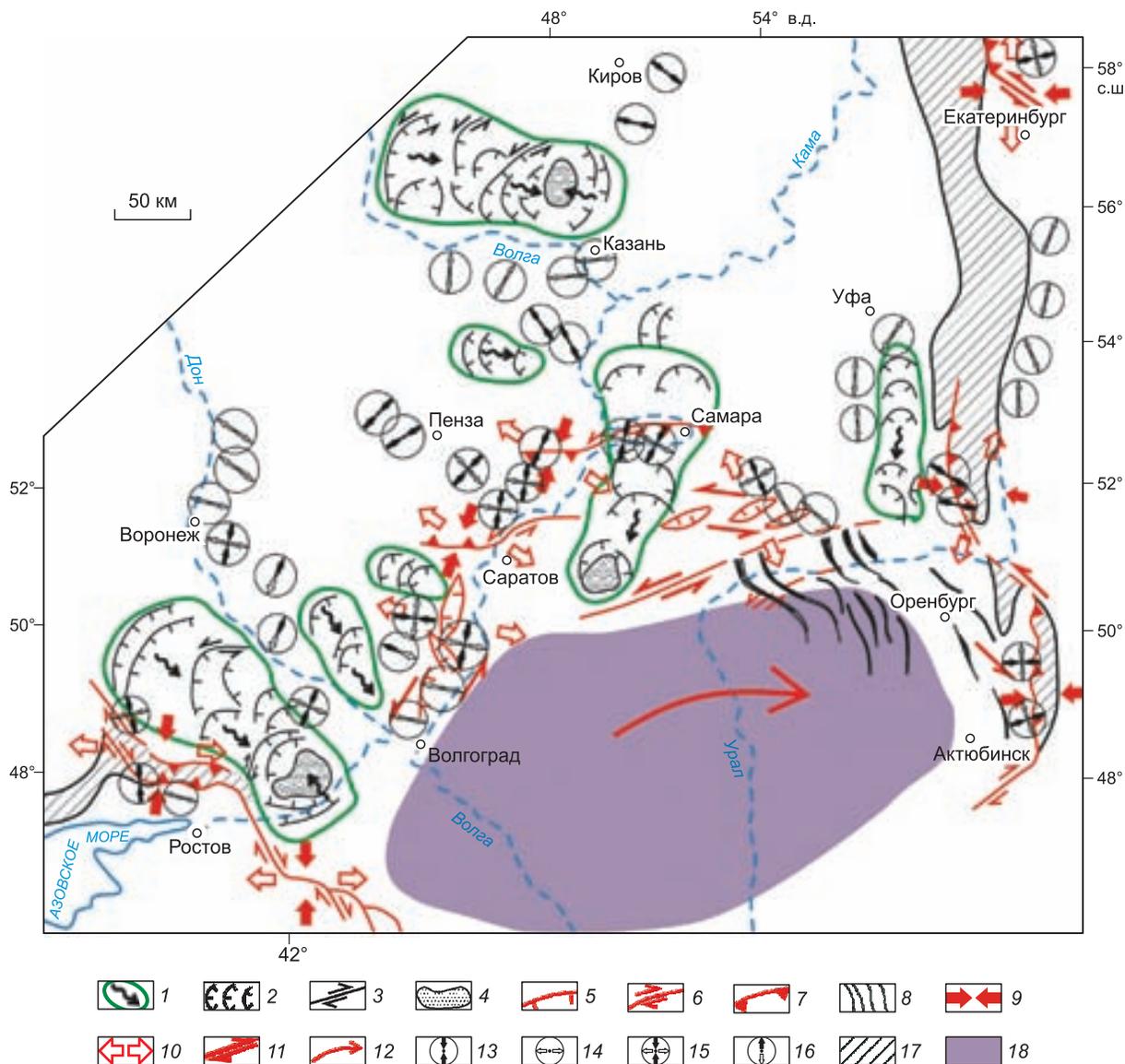


Рис. 6. Структурная позиция геоморфологических амфитеатров по отношению к Прикаспийской синеклизе и к ареалам региональных коллизионных стрессов разного знака.

1—4 — морфоструктурные индикаторы кинематики движений: 1 — латеральные тектонические потоки (тектонические глетчеры) транстензионной природы и векторы их движения — по направлению вогнутости геоморфологических амфитеатров, 2 — геоморфологические амфитеатры (штрихи — по их экспозиции), 3 — направление сдвига на флангах амфитеатров, по кулисности отрезков речных долин, 4 — новейшие котловины в устьях тектонических глетчеров; 5—16 — обозначения, характеризующие новейшую динамическую обстановку в бортах синеклизы: 5—7 — известные новейшие разрывы: 5 — сбросы (штрихи — к сброшенному крылу), 6 — сдвиги, 7 — надвиги (вершины треугольников — к надвинутому крылу), 8 — оси валов и складок, 9, 10 — генерализованная ориентация главных нормальных напряжений, определенная по кинематике разрывов: 9 — сжатие, 10 — растяжение; 11 — широкие сдвиги, по кулисности структур, 12 — предполагаемое левосдвиговое смещение Прикаспийского неотектонического блока, сопровождаемое поворотом по часовой стрелке [Копп, 2004; Копп и др., 2014а,б], 13—16 — типы стресс-режима и генерализованная ориентация главных нормальных напряжений, по мезоструктурным данным (см. также рис. 2): 13 — горизонтальное сжатие, 14 — горизонтальное растяжение, 15 — горизонтальный сдвиг, 16 — вертикальный сдвиг, 17, 18 — элементы тектонического районирования: 17 — активизированные на новейшем этапе орогенеза Урала и Донбасса, 18 — Прикаспийская синеклиза.

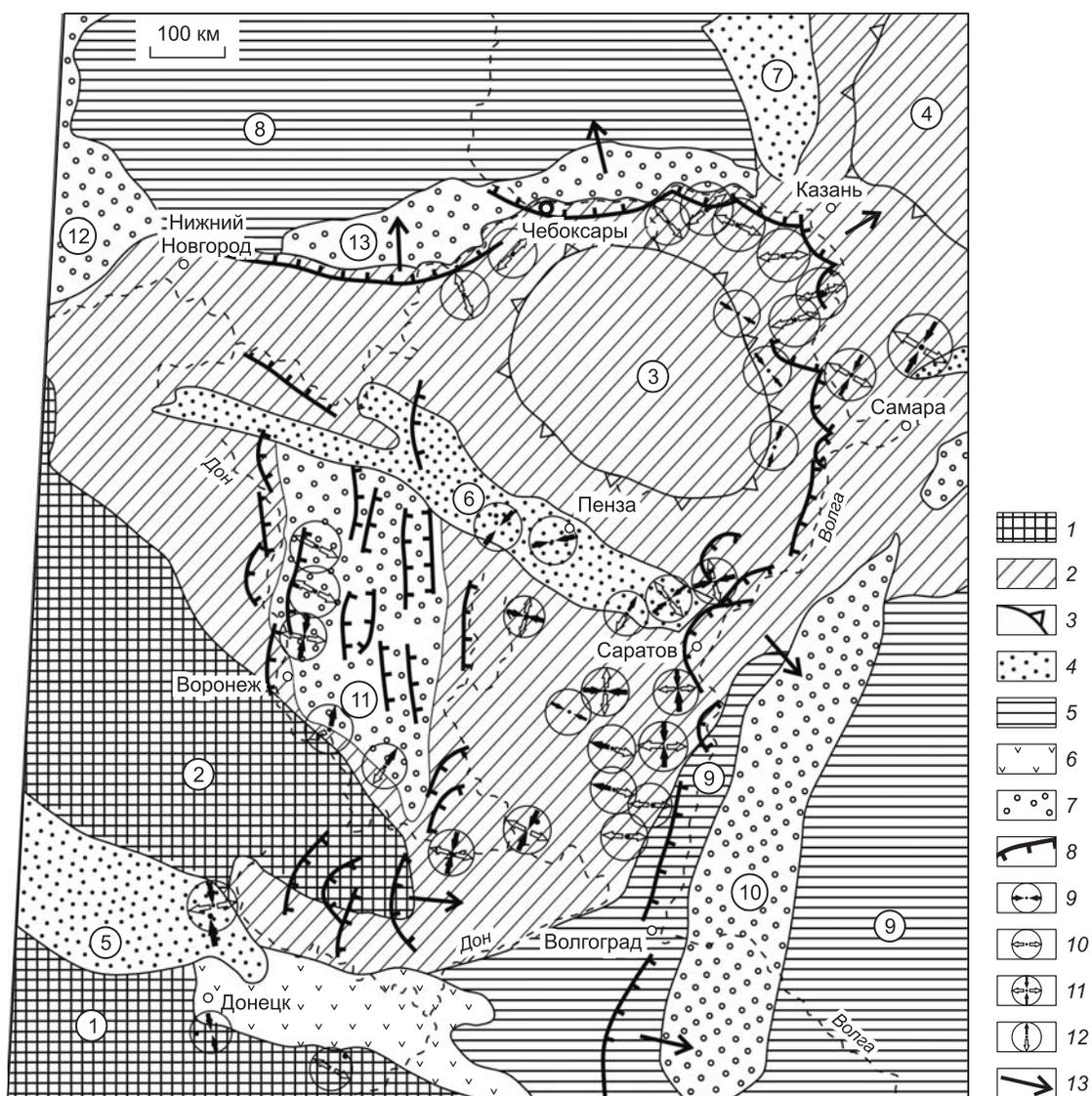


Рис. 7. Структурная позиция прямолинейных vs дугообразных линейментов растяжения по отношению к Воронежской антеклизе.

1 — вершины антеклиз и выступы фундамента; 2 — крылья антеклиз; 3 — границы сводов фундамента внутри антеклиз (вершины треугольников — по погружению фундамента); 4 — авлаогены; 5 — синеклизы; 6 — Донецкое герцинское складчатое сооружение; 7 — новейшие прогибы; 8 — прямолинейные и дугообразные линейменты, образовавшиеся при растяжении (установленном по мезоструктурным данным), штрихи — по экспозиции уступа рельефа; 9–12 — типы стресс-режима и генерализованная ориентация главных нормальных напряжений, по мезоструктурным данным (см. также рис. 2): 9 — горизонтальное сжатие, 10 — горизонтальное растяжение, 11 — горизонтальный сдвиг, 12 — вертикальный сдвиг; 13 — векторы движения масс при растяжении, по направлению вогнутости геоморфологических амфитеатров.

Региональные структуры (цифры в кружках): 1, 2 — антеклизы и щиты: 1 — Ростовский выступ Украинского щита, 2 — вершина Воронежской антеклизы; 3, 4 — своды фундамента внутри антеклиз: 3 — Токмовский, рассматриваемый нами как часть Воронежской антеклизы, 4 — Южно-Татарский, принадлежащий Волжско-Камской антеклизе; 5–7 — авлаогены: 5 — Днепровско-Донецкий, 6 — Пачелмский, 7 — Казанско-Кажимский; 8, 9 — синеклизы: 8 — Московская, 9 — Прикаспийская; 10–13 — новейшие прогибы: 10 — Заволжский, 11 — Окско-Донской (основная часть), 12 — Мещерский (северная ячея Окско-Донского прогиба), 13 — Волжско-Ветлужский.

нии масс от Кавказа к северу обеспечивает кратчайший путь блоков к синеклизе [Копп, 2017б, см. рис. 23]). В региональном плане для всей платформы зависимость знака сдвигов от направления на ближайшую синеклизу нагляднее всего иллюстрируется в работе [Копп и др., 2014б, см. рис. 34].

Прикаспийский регион как область транспортировки и аккумуляции продуктов растяжения антеклиз. Пример Воронежского массива показывает, насколько информативны в плане кинематики структурные рисунки, образуемые дугообразными структурами растяжения. Там они выстраиваются

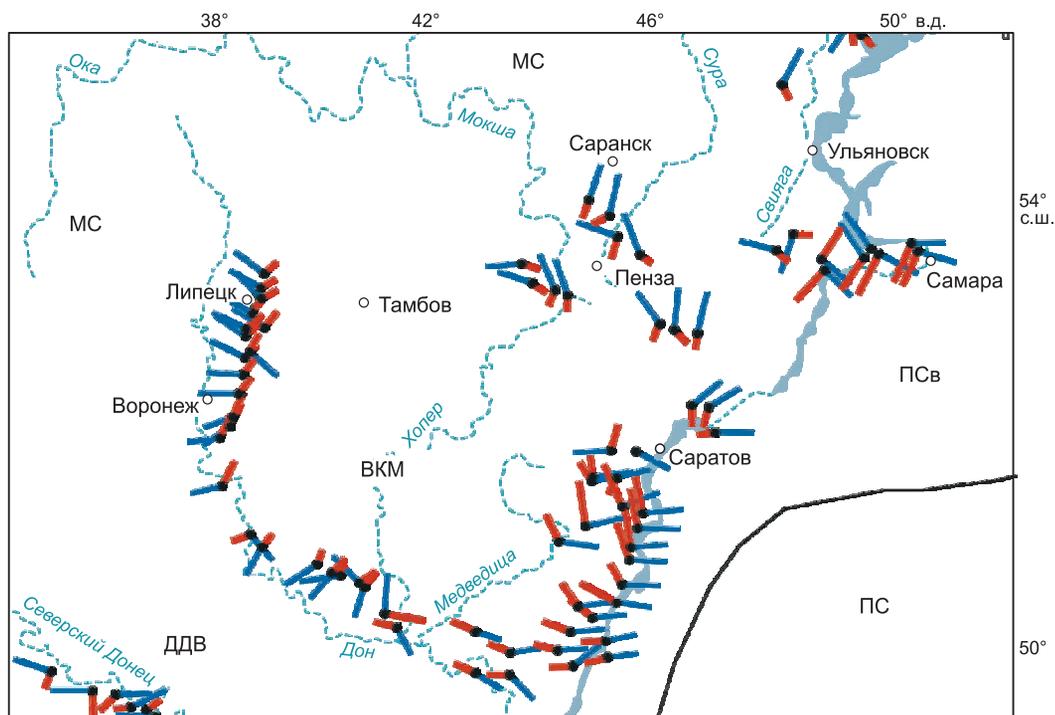


Рис. 8. Радиальное погружение оси главного нормального растяжения от вершины Воронежского массива к соседним прогибам.

Красные штрихи — горизонтальная проекция оси главного нормального сжатия, синие штрихи — то же, оси главного нормального растяжения. Наклон каждой оси направлен от центральной точки символа, крутизна наклона обратно пропорциональна длине штриха. Компьютерная генерализация мезоструктурных замеров, осуществленная О.И. Гущенко, Н.Ю. Васильевым и А.О. Мострюковым, с радиусом палетки осреднения, равным 3° для 60 замеров. ВКМ — Воронежский кристаллический массив, ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина, МС — Московская синеклиза, ПК — Прикаспийская синеклиза, ПКсв — Пугачевский свод.

в цепочки, указывающие на локально ускоренное растекание коры массива на попутных флексурах между массивом и соседними синеклизами. Однако наряду с таким способом расположения (гирляндовидным) часто встречается и эшелонированный: когда множество параллельных дугообразных линейментов растяжения собраны в поперечный к ним пучок (см. рис. 6). Подобный вид их группировки тоже связан с локальным ускорением движения, но уже вдоль русел поперечных к дугам вязких тектонических потоков («тектонических глетчеров», по [Копп, 2013, 2017б]) — в данном случае, связанных с растяжением. Если сравнить морфологию таких тектонических глетчеров растяжения (точнее, трансстензионных глетчеров, ибо любой такой поток сопровождается деформацией сдвига) с морфологией гораздо чаще обсуждаемых транспрессионных глетчеров, развивающихся при сжатии [Латеральные..., 2013], можно видеть, что те и другие имеют одинаковую U-образную форму в плане, однако при этом они противоположны как по кинематике образующих их частных структур, так и по общему вектору движения (рис. 9).

На платформе трансстензионные тектонические глетчеры длиной до 100—300 км выражены эшелонами дугообразных асимметричных долин с вогнутостью их уступов по курсу движения глетчера (см. рис. 1, 6). При этом в районе устьев потоков отсутствуют положительные формы рельефа, которые можно было бы связать с компенсационным сжатием: напротив, в районе своего устья они часто завершаются небольшой котловиной с признаками ее возникновения при растяжении.

Эти черты позволили оконтурить трансстензионные тектонические глетчеры вокруг Прикаспийской синеклизы (см. рис. 6) и оказалось, что они впадают в нее буквально как реки в овальное озеро. При этом самый длинный глетчер в области своего зарождения идет к востоку вдоль широтной границы Токмовского свода и Московской синеклизы, затем круто поворачивает к югу, следуя по седловине между Татарским и Токмовским сводами, а далее — вдоль меридиональной границы Воронежского массива. Другой крупный глетчер уже субширотного простирания стекает к Прикаспийской синеклизе по кайнозойскому прогибу между Воронежским массивом и Донбассом (см. рис. 1, 6) и, таким образом, трансстензионные глетчеры приурочены к частным линейным прогибам фундамента. При этом в случае как продольных гирлянд, так и поперечных эшелонов везде доминирует вектор движения, направ-

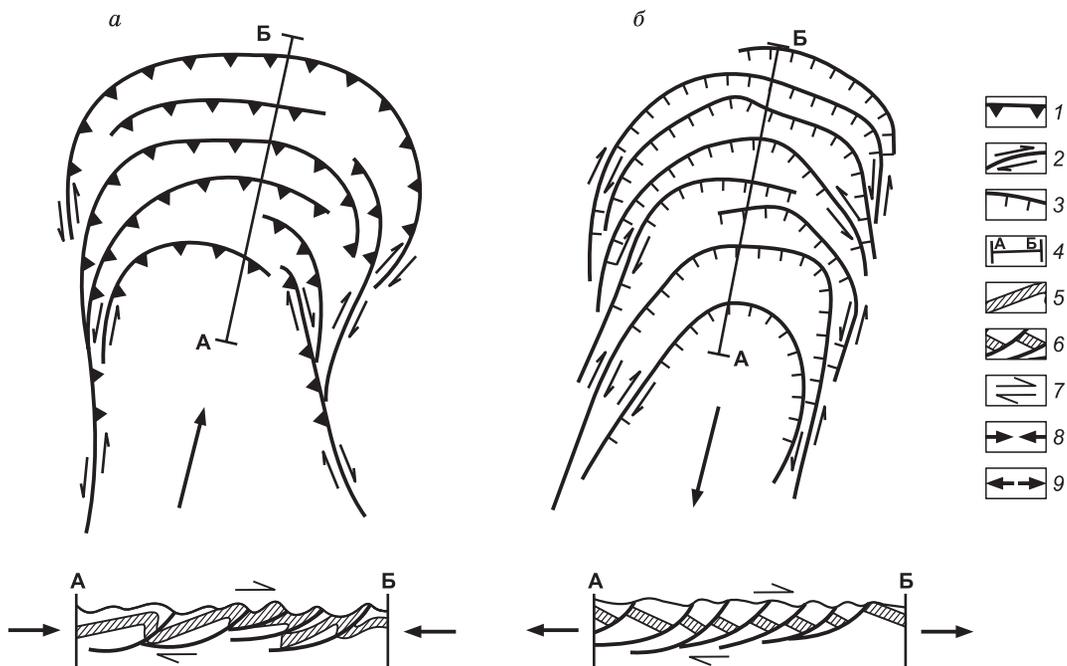


Рис. 9. Сравнение структурных рисунков тектонических глетчеров: сдвигонадвигового (транс-прессионного) (а) и сдвигораздвигового (транстензионного) (б) типов — принципиальная схема, вид в плане.

Черные крупные стрелки — векторы движения тектонических глетчеров. 1 — надвиги; 2 — сдвиги; 3 — сбросы; 4 — направления разрезов; 5, 6 — на разрезах: 5 — условный слой, 6 — разрывы, смещающие условный слой; 7 — направление простого сдвига в вертикальной плоскости; 8 — сжатие; 9 — растяжение.

ленный от антеклиз к синеклизам, особенно Прикаспийской. Некое влияние последней на неотектонику востока платформы отмечалось В.И. Макаровым [Новейшая..., 2006], а теперь можно уточнить, что эта синеклиза, длительно игравшая роль главного седиментационного депоцентра для данной территории, в новейшую эпоху еще и вела себя как центр тектонической аккумуляции продуктов растяжения антеклиз.

Данный вывод ставит вопрос о конечной судьбе этих продуктов: сгружались ли они рядом с синеклизой или при продолжающемся в ней растяжении поглощались ею. Обобщение полевого материала позволяет предпочесть первый вариант ответа: растяжение антеклиз вокруг Прикаспийской синеклизы компенсировалось сжатием рядом с ней.

В этом плане интересны борта синеклизы и, прежде всего, западный, где возникли Доно-Медведицкие дислокации вдоль ее меридиональной западной границы с Воронежским массивом (см. рис. 2, рис. 10). Они представлены спускающимся к синеклизе каскадом структурных ступеней, разделенных вогнутыми к ней дугообразными флексурами. Такой стиль структуры отвечает признакам кинематически асимметричного растяжения (с движением к синеклизе), однако вызывают недоумение необычно высокие для платформенных структур растяжения наклоны слоев — до 30—40°. Возможно, это вызвано тем, что растяжение здесь по латерали сочеталось со сжатием той же ориентировки [Копп, Тверитинова, 2001, см. рис. 3], которое вполне могло увеличить наклоны слоев. Для пространственно-временной сепарации режимов сжатия и растяжения в масштабе стереограмм данных недостаточно, а при высокой (3° на 60 замеров) генерализации здесь выделяется режим вертикального сдвига («взрезовой») с субширотными сжатием и растяжением, оси которых наклонены противоположно: соответственно к западу и востоку (при этом ось второго регулярно бывает положе, см. рис. 2). Существенная роль растяжения подтверждается близким присутствием Балыклейских грабенов, параллельных дислокациям (см. рис. 5). Похожий стиль динамики характерен и для северного борта синеклизы в области ее сочленения с Волжско-Камской антеклизой: и там также, по мезоструктурным данным, проявляются однонаправленные (здесь уже меридиональные) растяжение и сжатие, ориентированные поперек границы синеклизы [Копп, 2004; Копп и др., 2014б].

Противоречивое сочетание однонаправленных растяжения и сжатия не может быть физически однообразным и, соответственно, эти режимы конкурировали во времени и/или пространстве. В реальных условиях их тесное соседство часто является следствием того, что сжатие в одном месте ком-

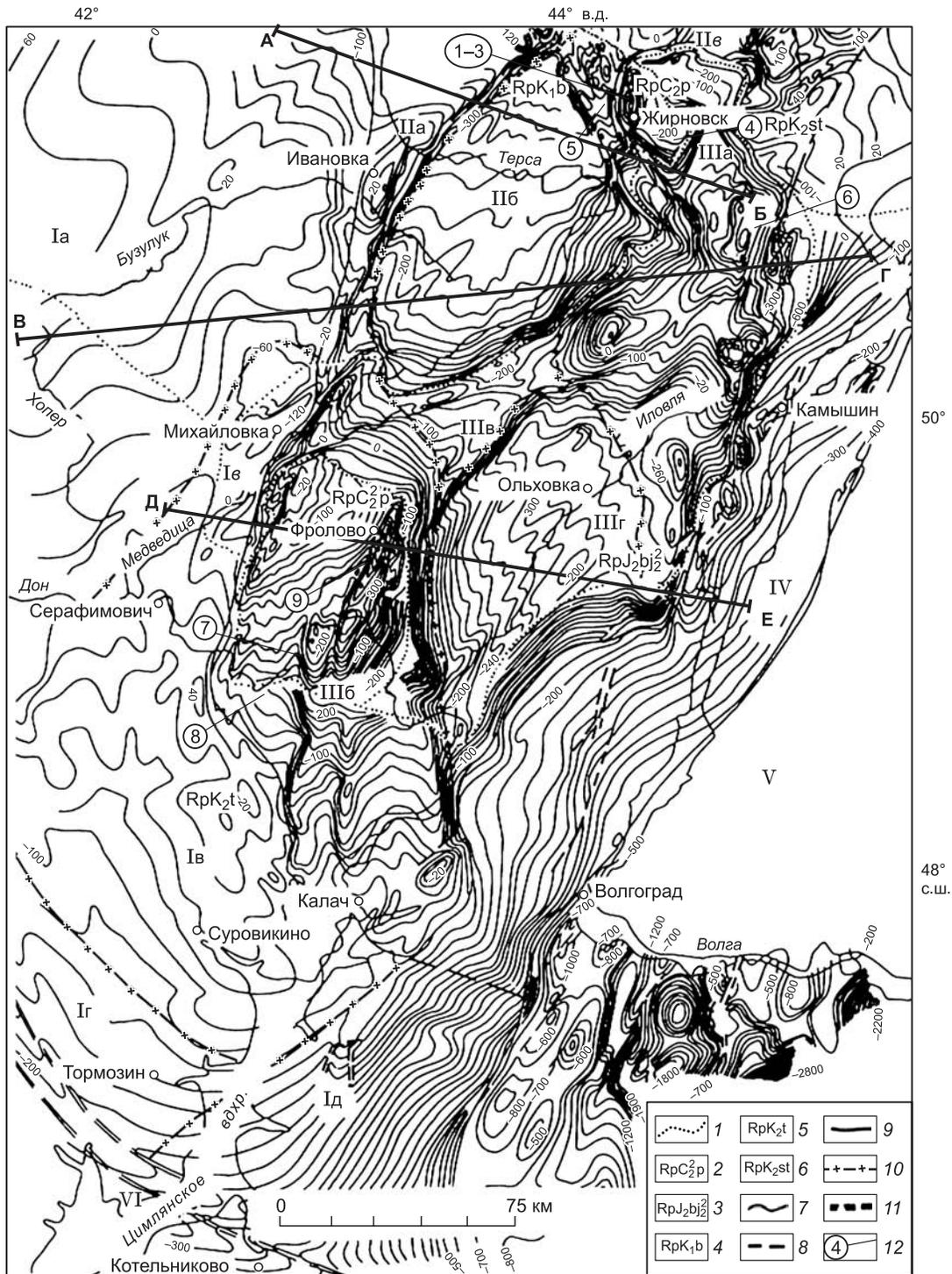


Рис. 10. Структура Доно-Медведицких дислокаций [Бражников и др., 1965].

1 — границы участков смены возраста структурного репера; 2—6 — структурные реперы: 2 — московский ярус карбона, 3 — верхний байос, 4 — кровля баррема, 5 — подошва турона, 6 — подошва сантона; 7 — стратоизогипсы, 8 — разрывы, 9 — границы тектонических областей, 10 — то же, 2-го порядка, 11 — погребенные надвиги, 12 — линии разрезов. Тектонические единицы: I — Воронежская антеклизы: Ia — Хоперская моноклираль, Ib — Михайловская впадина, Iv — Чир-Донские дислокации, Ig — Преддонецкая моноклираль, Id — Северо-Ергенинская моноклираль; II — Пачелмский авлакоген: IIa — Ивановские дислокации, IIб — Терсинская впадина, IIв — Карамышская впадина; III — Доно-Медведицкий вал: IIIa — Жирновско-Линевское поднятие, IIIб — Арчединско-Донское поднятие, IIIв — Березовская седловина; IV — Приволжская моноклираль; V — Прикаспийская впадина; VI — Скифская плита.

пенсруется растяжением в соседнем, и наоборот. Учитывая это, ранее считали [Копп, Тверитинова, 2001], что подобное явление в Доно-Медведицкой зоне вызвано аккомодацией субширотного растяжения западного борта Прикаспийской синеклизы. Свои варианты разделения полей такого рода (по глубинности, степени влияния соседнего Урала и др.) были предложены и для северного борта синеклизы [Копп, 2004].

Очевидно, что эти сложные поля напряжений еще требуют своего изучения. Однако теперь, в связи с данными о неотектоническом перемещении материала от антеклиз к синеклизам, можно предположить, что сжатие западного и северного бортов Прикаспийской синеклизы компенсировало растяжение антеклиз: соответственно Воронежской и Волжско-Камской. При этом обращает на себя внимание, что наиболее ярко выраженные в макроструктуре деформации как растяжения, так и сжатия приурочены к крутому западному борту Прикаспийской синеклизы.

ОБЩИЙ СИНТЕЗ: ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС АНТЕКЛИЗ

«Коровые оползни» на платформе. Итак, разными способами доказывается происходившее при растяжении перемещение материала от антеклиз к соседним синеклизам. Его движение шло по погружению тектонического рельефа, концентрируясь и ускоряясь на попутных флексурах у границ этих структур. Все это ассоциируется с оползнями, скользящими по погружению современного рельефа, с особым ускорением на крутых склонах. Такое сходство становится более очевидным, если учитывать морфологию образовавшихся при растяжении дизъюнктивных структур и линеаментов: многие из них обладают характерным для цирковых оползней дугообразным изгибом стенки отделения, а также (в случае срыва пластичной массы) формируют потоки глетчерных оползней, или оползней-оплывин. Но только если экзогенные оползневые и селевые потоки осваивают эрозионные ложбины, то тектонические глетчеры стекают по линейным прогибам. И, судя по указанным признакам и масштабу явлений, в нашем случае все эти «оползни» образуются безо всякого участия экзогенных процессов, иначе говоря, это коровые оползни.

Очевидно, что все эти гравитационные явления должны были вызываться только очень мощным источником напряжений, и в этом смысле важно отметить одновременность событий новейшей активизации Восточно-Европейской платформы с теми или иными фазами коллизии плит к югу от нее.

Активизация началась в конце палеогена [Гарецкий и др., 1999], когда в позднем эоцене с Евразией столкнулась Индийская плита. В это время началась эпиплатформенная активизация Урала, деформировавшегося при широтном сжатии [Копп, 2005]. «Уральское» давление к западу перекрыло центр и восток Русской плиты, сформировав субмеридиональные структуры сжатия: Вятские дислокации, Окско-Цнинский и Уфимский валы и пр. Однако амплитуда подъема этих структур была тогда невелика: на самом Урале и в соседних прогибах отсутствуют грубые молассы олигоцен-миоценового возраста. Ускорение роста активизированных орогенов, рассчитанное для Тянь-Шаня и Урала [Трифонов и др., 2008; Puchkov, Danukalova, 2009] и к тому же легко заметное по появлению грубых моласс, произошло только в конце миоцена, одновременно с причленением Аравийской плиты к Евразии и созданием условий жесткой коллизии. На самой платформе это выразилось как ее общим поднятием, так и широким распространением к северу «кавказского» поля напряжений с субмеридиональным сжатием/субширотным растяжением [Сим, 2000; Копп, 2004]. В суммарном поле деформаций это проявилось наложением субширотных новейших структур на меридиональные «уральского» происхождения [Копп и др., 2017].

Таким образом, «коровое оползание» на Русской плите синхронно ее вовлечению в орогенические события и, соответственно, его следует рассматривать в терминах гравитационного коллапса орогенических структур. Антеклизы воздымались вместе с остальной частью платформы, но при этом требует ответа вопрос, почему они в этом движении обгоняли синеклизы и гравитационно разрушались более всего. Однако прежде подытожим отмеченные нами для рассматриваемой территории, и вообще очень характерные, структурные результаты «корового оползания».

Индикаторы гравитационного коллапса на платформе. Суммируем характерные для коллапса черты дизъюнктивных структур и линеаментов рельефа: 1) их новейший возраст, но при этом и приуроченность к границам древних структур с противоположным знаком вертикальных движений; 2) формирование при поперечном к ним растяжении, особенно масштабном внутри антеклиз; 3) часто встречающиеся дугообразные очертания в плане с признаками выдвигания материала изнутри дуги; 4) группировка в гирлянды вдоль флексур между антеклизами и синеклизами либо, напротив, в секущие эти флексуры, но приуроченные к линейным прогибам латеральные тектонические потоки; 5) происходящее при растяжении гравитационное перемещение материала от антеклиз к синеклизам тормозится около последних, компенсируясь встречным сжатием той же ориентации; 6) гипертрофическое расхождение между огромной протяженностью в плане и малой (не более первых сотен метров) амплитудой вертикального смещения; 7) подчеркнутая выраженность всех этих структур в новейшем рельефе.

Факторы гравитационного коллапса в условиях платформ. Не требующий обсуждения, единый как для орогенов, так и для платформ фактор коллапса — сжатие территории и увеличение контрастности ее рельефа. По определению запаздывающее (относительно сжатия) начало гравитационного растяжения должно отражаться в возрасте деформаций, и в структурно-геологическом материале для платформы это ощущается в том, что фазы растяжения оказываются более молодыми (статистически полнее охарактеризованными замерами) по сравнению с таковыми сжатия [Копп и др., 2014б; Колодяжный, 2015]. На соседнем с платформой Большом Кавказе присутствие хорошо датированных моласс позволяет четко определить переход от сжатия к коллапсу как рубеж миоцена—плиоцена [Копп, 2017б]. Для платформы столь точную геологическую датировку начала коллапса предоставить сложнее, однако отметим присутствие клиньев акчагыла (верхний плиоцен) в грабенах к западу от Прикаспийской синеклизы.

Сложнее установить степень влияния на коллапс неоднородностей материала платформенной коры, ее линзовидной текстуры. На такую возможность указывает отмеченная выше приуроченность дугообразных флексур и геоморфологических амфитеатров к границам антеклиз и синеклиз. Если иметь в виду, что, согласно общеизвестным фактам, эти границы совпадают с зонами утонения образующих антеклизы линз мощной континентальной коры, можно допустить, что коллапсу подвергались эти линзы: будучи более легкими, они при орогенезе сжимались с боков и всплывали, но на снижение сжатия реагировали гравитационным растеканием вширь. Логично считать, что фактор неоднородности особо важен именно для платформ, где вертикальные градиенты коллизионных деформаций невелики, но зато литосфера изобилует контрастными древними неоднородностями.

Это предположение требует серьезной геофизической проработки, однако уже сейчас можно опереться на важные в данном аспекте результаты моделирования деформации «эффекта клина» [Лукьянов, 1989], которая происходит при гравитационной стабилизации наклонной к горизонту площадки, разделяющей материалы разной плотности (легкий — сверху) (рис. 11). В результате действия силы тяжести, имитируемой включением центрифуги, занимавшая энергетически невыгодную позицию наклонная площадка поворачивалась к горизонтالي, и, таким образом, результаты данного эксперимента подтверждают возможность гравитационного уплощения легких линз. В модели это сопровождалось противоположно направленными течениями материала, с формированием горизонтальной поверхности срыва. Происходили и вертикальные движения, причем особенно активные были направлены вверх модели, к ее свободной верхней границе, что логично сравнивать с деформацией рельефа земной поверхности. Эта важная деталь объясняет упомянутый диссонанс между отчетливой выраженностью гравитационных деформаций в рельефе и не столь очевидной на глубине: движение вниз ограничено сплошной средой.

Вероятность гравитационного растекания линз утолщенной континентальной коры подтверждается и особенностями новейшего рельефа антеклиз. Поскольку это растекание осуществляется в сплошной среде (рис. 12), оно одновременно будет испытывать сопротивление от утолщающегося вниз «корня» линзы, и из-за этого деформация окажется неоднородной: растяжение компенсируется некоторым сжатием на периферии растекающейся линзы, с возникновением опоясывающего ее в плане вала, в центре же линзы разместится компенсационная муфта растяжения.

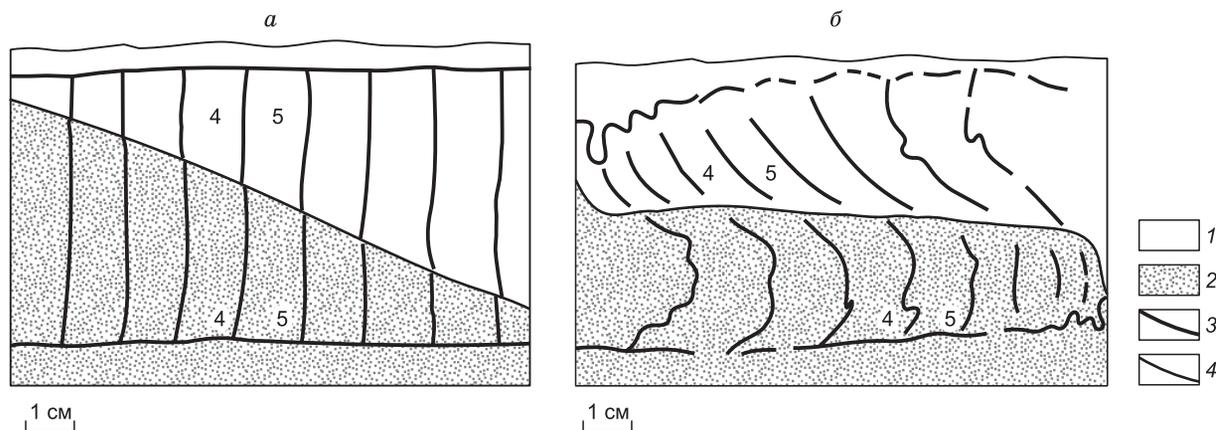


Рис. 11. Модель «эффекта клина» — неоднородной деформации на участке выклинивания линзы (зарисовка модели): исходное (а) и конечное (б) состояние [Лукьянов, 1989].

1, 2 — силикон, с плотностью (ρ , г/см³): 1 — 1.42, 2 — 1.77; 3 — метки из пластилина, 4 — граница легкого и тяжелого силикона. Пояснения см. в тексте.

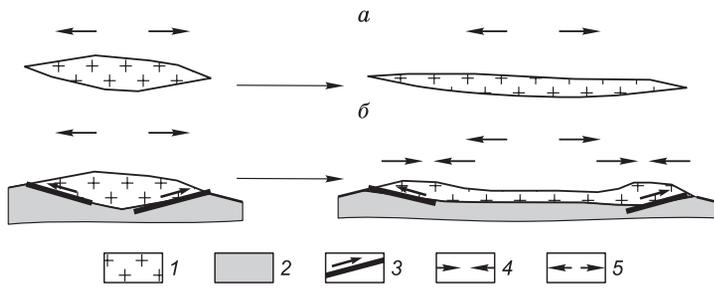


Рис. 12. Геометрия гравитационного уплотнения и растрескивания коровой линзы.

a — однородная деформация линзы: идеализованная схема, не учитывающая сопротивления вмещающей среды (вариант, невозможный в реальной обстановке), *б* — неоднородная деформация линзы, вызванная сопротивлением вмещающей среды. Слева — положение до деформации, справа — после деформации. Пояснения см. в тексте.

1 — легкая (условно «сиалическая») коровая линза, 2 — вмещающая среда, 3 — поверхность срыва и надвигания, 4 — сжатие, 5 — растяжение.

Все эти детали можно найти в реально наблюдаемом рельефе антеклиз. В наиболее общем плане считается, что на новейшем этапе они воздымались, но, по наблюдениям автора, их рельеф имеет более сложную архитектуру: заметнее всего воздымались их края, тогда как в центре они, напротив, проседали. В итоге каждая из них оказывается окруженной внешним неотектоническим валом, круто нависающим над окружающим пространством, но зато полого спускающимся внутрь (рис. 13).

Типичный пример рельефа такого типа показывает Воронежский массив с краевым барьером в виде Приволжского наложенного вала, огибающего массив с восточной и северной сторон, а на западе продолжающийся Среднерусским меридиональным сводом (рис. 14). Место же центральной компенсационной мульды занимает Окско-Донской новейший прогиб. Нечто похожее отмечается и для Волжско-Камской антеклизы, где позицию Окско-Донского прогиба занимает долина Камы, а аналогами Приволжского и Среднерусского поднятий являются новейшие своды Вятско-Камской (на севере) и Бугульминско-Белебеевской (на юге) возвышенностей. При этом уже для обеих антеклиз наиболее высоко приподняты отрезки их периферических валов, соседствующие с Прикаспийской синеклизой: на западе от нее — меридиональный отрезок Приволжского вала, резко обрывающийся к Прикаспийской синеклизе, и на севере — широтный Бугульминско-Сыртовский новейший свод.

ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОТЕКТониКИ ПЛАТФОРМ И ПАССИВНЫХ ОКРАИН

Приведенный материал подтверждает сложность динамики и кинематики формирования новейшей структуры Восточно-Европейской платформы, где трудно найти общую универсальную причину. В аспекте широкого обсуждения разных, а иногда и полярных точек зрения насчет источников новейших стрессов на платформе, обнаружение еще одного — гравитационного — их источника поможет в реальных ситуациях объективнее оценивать связи современного рельефа с неотектоникой, а самой платформенной неотектоникой — с мобилистическими концепциями. (Известно, что эти соотношения не являются линейными: например, высота поднятия орогена бывает не прямо пропорциональна интенсивности и скорости коллизии [Трифонов и др., 2008].) В практическом плане следует иметь в виду, что связанные с коллапсом новейшие структуры и морфоструктуры активно развиваются в настоящее время и могут создавать геологические опасности, а также влиять на структуру месторождений и динамику подземных вод.

Наиболее существенный и подтвержденный фактическим материалом результат настоящего исследования — доказательство латерального перемещения материала от антеклиз к синеклизам и обо-

Рис. 13. Характерный для Русской плиты стиль новейшего рельефа антеклиз.

a — возникшая из-за растяжения коры мульда в центре антеклизы и окаймляющий антеклизу периферический вал, сформировавшийся при участии компенсационного сжатия, *б* — блок-диаграмма, поясняющая динамическую обстановку формирования подобного стиля рельефа, а также соответствующее строение коры под антеклизой; теоретическая схема.

1—3 — элементы строения коры: 1 — линза утолщенной легкой коры под антеклизой, 2 — более тяжелая кора, подстилающая линзу, 3 — осадочный чехол над антеклизой; 4 — новейшая мульда, возникшая в центре антеклизы из-за ее растяжения, 5 — горизонтальное растяжение.

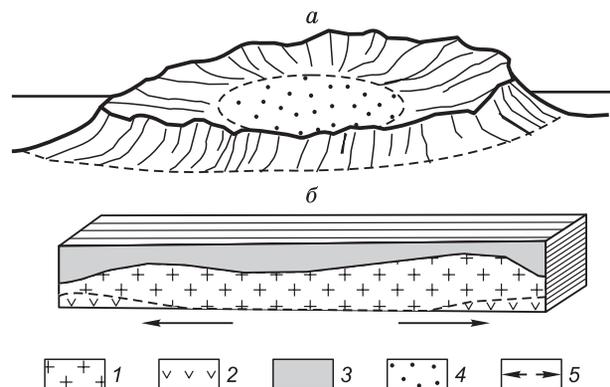
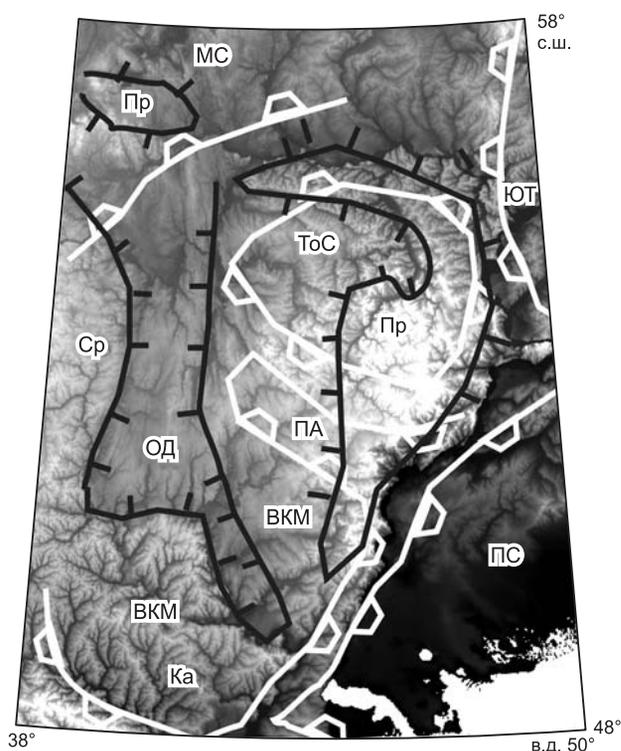


Рис. 14. Новейший рельеф Воронежской антеклизы (DEM — цифровая модель рельефа) и его соотношения с тектоникой.

Белые контуры — древние структуры фундамента: ВКМ — Воронежский кристаллический массив, МС — Московская синеклиза, ПА — Пачелмский авлакоген, ПС — Прикаспийская синеклиза, ТоС — Токмовский свод, ЮТ — Южно-Татарский свод. Черные контуры — выраженные в рельефе новейшие структуры: Ка — Калачское поднятие, ОД — Окско-Донской прогиб, Пр — Приволжский вал, Ср — Среднерусский свод.



снование гравитационного коллапса (действующего в условиях регионального бокового сжатия) как главной причины этого перемещения. В методическом плане важно установление своих особых различий поля напряжений и структур, возникающих на разных дистанциях пути этого перемещения материала: показано, что он аккумулируется (при участии сжатия) около синеклиз. Суммированные в работе диагностические признаки гравитационного коллапса достаточно наглядны, и это позволяет надеяться, что его проявления будут найдены и в других местах, причем не только на Восточно-Европейской платформе.

В теоретическом плане интересен масштаб проявления коллапса в платформенных условиях: если справедливо обосновываемое нами утверждение, что он происходит в форме гравитационного растекания образующих антеклизы линз легкой континентальной коры, то не может ли это происходить и с линзами материкового масштаба? Стоит обратить внимание на приуроченность к пассивным окраинам континентов поясов новейшей активизации с их низкогорным рельефом и коровой сейсмичностью, условно назовем их «орогенами пассивных окраин». По отношению к внутренним, относительно прогнутым частям материков, они занимают ту же позицию, что и новейшие валы вокруг антеклиз (сформировавшиеся, напомним, с некоторым участием сжатия, компенсирующего растекание коры последних). Тогда есть основание предположить, что не составляет исключения в этом плане и северная (пассивная) окраина Евразийской плиты, к которой приурочены заметные неотектонические деформации. Между тем в отношении них (по крайней мере, для европейского их отрезка) имеются убедительные данные о гляциоизостазии как основной причине их образования [Добрецов, Василевский, 2019] и тогда, по мнению автора, возникает интересная проблема соотношений разных факторов новейшей активизации: гляциоизостатического и тектонического. Первый из них вряд ли единственный: иначе, почему территории, освободившиеся ото льда, сразу вовлекались в быстрое поднятие, не потому ли, что предварительно они уже были сильно напряжены тектонически, а в межледниковья возвращали свой прежний статус-кво — расчлененный низкогорный ландшафт?

ВЫВОДЫ

1. Вызванная движениями литосферных плит неотектоническая активизация Восточно-Европейской платформы привела ее к гравитационному коллапсу (до сих пор рассматриваемому только применительно к орогенам). Более всего коллапсу подверглись антеклизы (Воронежская и Волжско-Камская): они растягивались с гравитационным перемещением масс к соседним синеклизам, особенно к глубокой Прикаспийской.

2. Гравитационный коллапс на платформе сопровождается специфическим, легко узнаваемым ансамблем структур и морфоструктур, и это позволяет надеяться, что его проявления обнаружатся шире, и не только в пределах данной платформы.

3. Концентрация гравитационных перемещений около границ антеклиз и синеклиз, где выклиниваются образующие антеклизы линзы утолщенной и легкой континентальной коры, а также привлечение литературных данных моделирования позволяют утверждать, что на платформе коллапс происходил путем гравитационного растекания этих линз: они всплывали при боковом коллизии, а в эпохи снижения его интенсивности — растекались.

4. Обосновываемая модель гравитационного коллапса антеклиз, с растеканием и уплощением образующих их легких коровых линз, обращает внимание на возможность коллапса более крупных — материкового масштаба — линз континентальной коры, с соответственным влиянием этого процесса на неотектонику платформ и пассивных континентальных окраин.

Автор глубоко признателен акад. Ю.Г. Леонову, с которым неоднократно обсуждались направление и результаты исследований по теме статьи. В дискуссиях участвовали В.С. Буртман, Ю.А. Волож, М.Г. Леонов, Ю.Г. Леонов, Л.М. Расцветаев и В.Г. Трифонов. Автор благодарен коллегам за консультации и конструктивную критику.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Тектоноседиментационные системы: строение и развитие» (госзадание № 0135-2019-0071).

ЛИТЕРАТУРА

Бражников Г.А. Тектоника бортовой зоны Прикаспийской впадины в пределах Волгоградской области // Региональные геолого-геофизические исследования в бортовой зоне Прикаспийской впадины. Саратов, Коммунист, 1965, с. 395—407.

Васильев Н.Ю., Мострюков А.О., Сунцов В.А. Условия тектонического нагружения и прогноз перспективных участков месторождения Таловейс // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 15. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2012, с. 77—93.

Гарецкий Р.Г., Айзберг Р.Е., Карабанов А.К., Палиенко В.П., Шляупа А.И. Новейшая тектоника и геодинамика Центральной Европы // Геотектоника, 1999, № 5, с. 3—14.

Горелов С.К. Геоморфология и новейшая тектоника правобережья Нижней Волги М., Изд-во АН СССР, 1957, 139 с. (Тр. Ин-та географии АН СССР, вып. 19).

Гушенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности) // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Материалы Всесоюзной школы-семинара (Апатиты, 20—22 мая 1980). Апатиты, 1982, с. 35—52.

Гушенко О.И. Сейсмотектонический стресс-мониторинг литосферы: структурно-кинематический принцип и основные элементы алгоритма // ДАН, 1996, т. 346, № 3, с. 399—402.

Гушенко О.И. Кинематический принцип относительной хронологии палеонапряжений (основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга литосферы) // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М., Наука, 1999, с. 108—125. (Тр. ГИН РАН, вып. 515).

Добрецов Н.Л., Василевский А.Н. Отражение постгляциальных поднятий в гравитационном поле и неоген-четвертичных структурах // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (12), с. 1661—1691.

Колодяжный С.Ю. Структура и эволюция Сурско-Камской зоны сдвига в кайнозой // Геотектоника, 2015, № 4, с. 30—53.

Копп М.Л. О происхождении поперечных складчатых зон в эпигеосинклиналиных складчатых поясах // Геотектоника, 1979, № 2, с. 84—106.

Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе. М., Научный мир, 1997, 314 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 506).

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М., Наука, 2004, 340 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 552).

Копп М.Л. Новейшая деформация Южного Урала и Мугоджар и ее вероятное происхождение // Геотектоника, 2005, № 5, с. 36—61.

Копп М.Л. Позднеальпийская коллизиионная структура Кавказского региона // Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Ред. Ю.Г. Леонов. М., ГЕОС, 2007, с. 285—315.

Копп М.Л. Денудационные уступы как индикатор региональных неотектонических напряжений // Геотектоника, 2011, № 5, с. 71—90.

Копп М.Л. Роль хрупкого разрушения, пластической деформации и латерального течения в формировании альпийской структуры Северной Евразии // Латеральные тектонические потоки в литосфере Земли. М., ГЕОС, 2013, с. 12—57.

Копп М.Л. Дугообразные структуры растяжения в кинематике региональных и глобальных тектонических обстановок // Геотектоника, 2017а, № 6, с. 18—36.

Копп М.Л. Дугообразные структуры растяжения в региональных и глобальных тектонических обстановках: опыт кинематического анализа / Под ред. Ю.Г. Леонова, Н.Б. Кузнецова. М., ГЕОС, 2017б, 96 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 616).

Копп М.Л., Тверитинова Т.Ю. О происхождении Доно-Медведицких дислокаций // Бюл. МОИП. Отд. геол., 2001, т. 76, вып. 3, с. 19—30.

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, 2014а, № 4, с. 23—43.

Копп М. Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А., Тверитинова Т.Ю., Васильев Н.Ю., Корчемагин В.А., Макарова Н.В., Мострюков А.О., Иоффе А.И. Кайнозойские напряжения востока Русской плиты, Южного и Среднего Урала: методические, теоретические и прикладные аспекты / Под ред. Ю.Г. Леонова, М.Л. Коппа. М., ГЕОС, 2014б, 88 с. + 2 цв. карты. (Тр. ГИН РАН, вып. 610).

Копп М.Л., Колесниченко А.А., Макарова Н.В. Структурно-кинематический анализ рисунков гидросети для реконструкции и датирования новейших палеонапряжений в платформах (восток Русской плиты) // Бюл. МОИП. Отд. геол., 2017, т. 92, вып. 5, с. 33—57.

Латеральные тектонические потоки в литосфере Земли / Ред. М.Г. Леонов. М., ГЕОС, 2013, 318 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 604).

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 обрамлении // Геотектоника, 2001, № 1, с. 36—59.

Лукьянов А.В. Эксперимент в тектонике // Экспериментальная тектоника: методы, результаты и перспективы. М., Наука, 1989, с. 9—30.

Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М., Наука, 1991, 144 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 460).

Новейшая тектоника и геодинамика: область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты / Ред. Ю.К. Щукин. М., Наука, 2006, 206 с.

Орлов Р.А., Трегуб А.И. Отражение в микросейсмических шумах неотектонических структур // ДАН, 2009, т. 426, № 3, с. 393—396.

Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Юго-Восточной Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М., Наука, 2000, с. 326—350.

Тарков А.П., Пацев В.П., Силкин К.Ю. О структурной дисгармонии отложений осадочного чехла Воронежской антеклизы по результатам профильных наблюдений микро-ОГТ // Геофизика, 2002, № 1, с. 68—70.

Трифонов В.Г., Аргюшков Е.В., Додонов А.Е., Бачманов Д.М. Плиоцен-четвертичное горообразование в Центральном Тянь-Шане // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (2), с. 128—145.

Шатский Н.С. Балыклейский грабен и дислокации Южного Поволжья // Вестн. Моск. горн. акад., 1922, т. 1, № 1, с. 13—43.

Delvaux D., Modeys R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhik V., San'kov V. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baykal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting // Tectonophysics, 1997, v. 282, p. 1—38.

Dewey J.F., Cande S., Pitman W.C. Tectonic evolution of the India-Eurasia collision zone // J. Geophys. Res., 1989, v. 82, p. 737—754.

England P., Houseman G. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau // J. Geophys. Res., 1989, v. 94, p. 17561—17579.

Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science, 1975, v. 189 (8), p. 419—426.

Nikishin A.M., Brunet M.-F., Cloetingh S., Ershov A.V. Northern Peri-Tethyan Cenozoic intraplate deformations: influence of the Tethyan collision belt on the Eurasian continent from Paris to Tian-Shan // C.R. Acad. Sci. Paris, 1997, v. 324, série IIa, p. 49—57.

Puchkov V., Danukalova G. The Late Pliocene and Pleistocene history of the Southern Urals region in the light of neotectonic data // Quat. Int., 2009, № 201, p. 4—12.

*Рекомендована к печати 28 августа 2019 г.
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.,
после доработки — 25 апреля 2019 г.*