

УДК 551.248.2

М. КОПП¹, А. КОЛЕСНИЧЕНКО¹, Н. ВАСИЛЬЕВ², А. МОСТРЮКОВ³

¹Геологический институт РАН, Пыжевский пер., Москва, Россия, 119017, 7, эл. почта: mlkopp@mail.ru

²Российский государственный геолого-разведочный университет, ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, Россия, 117873, эл. почта: geostress@mail.ru

³Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, пос. Борок, 142, Ярославль, Россия, 152742, эл. почта: most57@mail.ru

РЕКОНСТРУКЦИЯ КАЙНОЗОЙСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ/ДЕФОРМАЦИЙ ВОСТОКА РУССКОЙ ПЛИТЫ И ПУТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

<https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.046>

Цель исследования – установление динамики и кинематики формирования новейших структур востока Русской плиты и анализ направлений использования этих данных для решения региональных, фундаментальных и прикладных задач. **Методика:** компьютеризированный структурно-кинематический анализ массовых замеров мезоструктурных кинематических индикаторов (зеркал скольжения, жил и т.п.), проводимый в сопоставлении с результатами макроструктурных наблюдений и геолого-геофизическими данными. **Результаты:** основной результат – картографическая реконструкция новейшего поля напряжений Русской плиты и Урала. Ее сопоставление с другими данными о динамике новейших дислокаций на платформе приводит к следующим выводам: 1) пространственные вариации этого поля отражают давление на платформу стрессов, исходящих от коллизионного орогена Кавказа-Копетдага и внутриплитного линейного поднятия новейшего Урала, связанного с Центральноазиатской зоной коллизии; 2) при прохождении через неоднородную кору платформы коллизионные напряжения искажались: в вертикальном разрезе сжатие (особенно в сдвиговом стресс-режиме) снижалось вверх и даже замещалось растяжением над растущими козырьками надвигов и вершинами валов, а в плановой проекции сжатие (в том числе, в сдвиговом режиме) возрастало в авлакогенах; 3) полученные данные показывают гораздо большее, чем это считалось ранее, участие сдвигового стресс-режима в глубинной структуре; кроме того, установлены обширные домены горизонтального растяжения, особенно на границах антеклиз и синеклиз; 4) в методическом плане, результаты реконструкции, сделанной на основе анализа данных разного масштаба и типа – материалов макро-, мезо- и морфоструктурных наблюдений, принципиально не противоречат, но дополняют друг друга. Применяемые в комплексе, они предоставляют наиболее полную картину новейшего напряженного состояния. **Научная новизна** исследования, прежде всего, определяется тем, что осуществленная на основе указанной методики компьютерная реконструкция поля напряжений впервые представляется не только для территории Русской плиты, но и вообще для платформ (которые; в отличие от орогенов, в этом отношении изучены недостаточно). Данная реконструкция – новый информационный документ, который могут использовать специалисты самого разного профиля и теоретических предпочтений. **Практическая значимость:** результаты работы могут применяться в прикладных целях – для уточнения кинематики известных разрывов, особенно выявления сдвиговых смещений и характеристики глубинных структурно-динамических обстановок, а также для определения структурной приуроченности внутриплатформенных землетрясений и оценки геоэкологических опасностей, связанных с современными движениями.

Введение

Предмет статьи – динамика формирования кайнозойской структуры платформенной территории востока Русской плиты и Урала. Развитые здесь пликативные дислокации невелики по амплитуде: наклон слоев редко превышает 10–20°. Однако, именно кайнозойские движения определили рельеф всей этой области, а также современное строение осадочных месторождений полезных ископаемых. Между тем, природа этих

структур до сих пор вызывает активные дискуссии. Неясным остается их вклад в суммарную структуру чехла и фундамента платформы: иногда он вообще игнорируется либо, напротив, неправомерно преувеличивается. Повышенное внимание уделяется надвигам, хотя встречаются также сдвиги и сбросы. Структуры растяжения часто вообще игнорируются, хотя, по нашим наблюдениям, участки растяжения распространены не менее широко.

Особые споры идут по поводу образования дислокаций. Чаще всего, они объясняются горизонтальным сжатием [Гущенко и др., 1999; Казанцев, Казанцева, 2001; Камалетдинов и др., 1979; Копп и др., 2004, 2005; Корчемагин, Емец, 1976; Леонов и др., 2001; Новейшая тектоника..., 2006; Трофимов, 2014; Nikishin et al., 1996; Sim et al., 1999; Sobornov, 1995], но при этом высказываются разные мнения по поводу природы сжимающих напряжений: связаны ли они с движением литосферных плит или же с местными внутриплитными источниками.

Предпочтительно рассматриваются так называемые удаленные стрессы (far fields, far stresses), исходящие от активных границ плит, но при этом высказываются диаметрально противоположные мнения по поводу конкретных источников: их связывают то с коллизией на южной границе Евразийской плиты [Копп, 1997, 2004; Леонов и др., 2001; Nikishin et al., 1999], а то и с давлением от зоны спрединга на севере [Гущенко, 1999; Колодяжный, 2010; Sim et al., 1999]. Одновременно некоторые авторитетные исследователи полагают, что передача напряжений на столь большие (более 1000 км) расстояния от границ плит вообще невозможна физически [Короновский, Демина, 1999, Ю. Л. Ребецкий (устное сообщение)].

Противоречия в существенной мере вызваны недостатком знаний о динамике формирования указанных структур – если не считать единичных, но ярких работ по Тиману, Донбассу и отдельным местам Московской синеклизы [Гущенко и др., 1999; Сим, 1996; Sim et al., 1999]. Между тем, эти работы показали возможность применения в условиях платформенного чехла методик, основанных на фиксации ориентировки кинематических индикаторов мезотектонического масштаба: зеркал и борозд скольжения, жил, стилолитов и т.п. Представительные кинематические индикаторы встречаются повсеместно и, кроме того, как показано нами, широко присутствуют и в слабосцементированных породах верхнего мезозоя-кайнозоя [Копп, 2004, 2005; Копп, Тверитинова, 2001; Копп и др., 2008, 2010] – что позволяет почти напрямую изучать именно кайнозойские деформации.

Как известно, статистический анализ массовых замеров таких мезоструктур позволяет точно оценить основные параметры напряжений: ориентацию и наклон их главных осей, характер стресс-режима (сжатие, растяжение или сдвиг, и др.) и, в итоге, составить карты траекторий напряжений разного знака.

Цель исследований

Таким образом, главной целью проведенных исследований можно назвать создание прежде отсутствовавшей, единой и внутренне согласованной, картины поля кайнозойских напряжений/деформаций. Созданию подобной реконструк-

ции способствовало то, что авторами собран уникальный массив мезоструктурных данных, насчитывающий более 12 000 полевых замеров кинематических маркеров. При этом, что особенно важно для наших целей, значительная часть этого материала касается верхнемезозойских и кайнозойских пород, то есть он большей частью характеризует именно кайнозойское поле напряжений и сопутствующих им деформаций, а замеры в породах неогена-квартера уже напрямую относятся к новейшему этапу.

Эта главная цель работы – создание единой для всей территории картографической реконструкции напряженного состояния – включала следующие задачи: 1) определение местоположения источников действовавших стрессов и проверка представлений об активной роли удаленных стрессов, исходящих от границ литосферных плит, 2) выяснение участия внутриплитных источников напряжений, создаваемых древними структурами ранга антеклиз и синеклиз; 3) установление вертикальных вариаций поля напряжений, его возможных изменений с глубиной и, таким образом, определение признаков динамической слоистости литосферы платформы; 4) разработка направлений использования полученных данных для решения прикладных задач; 5) исследование информативности каждого из использованных методов и возможности их комплексирования.

Применяемые методы

В ходе исследования использовались традиционные структурно-геологические методы, модифицированные нами для специфических условий платформенной геодинамики. Прежде всего, это мезоструктурные подходы, основанные на регистрации элементов залегания наблюдаемых в обнажении кинематических индикаторов разного механического типа: отрывов (предпочтительно заполненных жилами), сколов (зеркал скольжения) и стилолитовых швов. Результаты обработки этого материала дают наиболее точную информацию о параметрах поля напряжений. Учитывалась и кинематика крупных (макро-) структур – при условии, что последняя достоверно доказана.

Геологические условия рассматриваемой платформенной территории позволяют лишь в очень широких пределах датировать время действия напряжений. Наиболее корректно считать их постпалеозойскими или, а в некоторых местах, постмезозойскими – хотя на примере ряда объектов нами было показано, что мезоструктурные парагенезы, установленные для палеозойских пород платформенного чехла, совпадают с таковыми в породах позднего мезозоя и кайнозоя [Копп, 2004; Копп и др., 2008].

Таким образом, если говорить о наиболее узком вероятном временном интервале, то таковым для всего региона в целом оказывается весь кайнозой. При этом, в нашей базе данных

присутствуют результаты, полученные как для пород, испытавших интенсивную ларамийскую (Донбасс) или позднекайнозойскую (палеоген Урала и Донбасса) деформацию, так и деформированных только в конце плиоцена-квартере (отдельные точки выхода пород верхнего плиоцена).

В условиях такого недостатка данных о геологическом возрасте кинематических индикаторов для изучения напряженного состояния позднеплиоцен-четвертичных движений (которые на соседнем Большом Кавказе были как раз наиболее мощными) нами изучались содержащие кинематическую информацию черты рисунков гидросети. Для этого применялось дешифрирование открытых топокарт и цифровых моделей рельефа (DEM).

Все эти методические процедуры проводились в комплексе, и их результаты сравнивались между собой с целью добиться максимальной информативности применяемых методов и, одновременно, определить “разрешающую способность” каждого из них.

Суммарное позднекайнозойское поле напряжений/деформаций по кинематике макроструктур

Результаты динамического анализа макроструктур и образуемых ими сочетаний освещались нами ранее [Копп, 2004], но здесь выделим его положения, необходимые для сравнения с мезоструктурными данными.

Во-первых, это сведения о кинематике известных разрывов. В пределах настоящей территории обнаружены дизъюнктивы всех кинематических типов, что уже позволяет провести пилотное районирование по типу поля напряжений. Для тех же участков, где такие сведения отсутствуют, использовались пространственные соотношения разнонаправленных платформенных валов, флексур и других пликтивных линейных структур, указывающие на их кинематическую сопряженность. Подобные сочетания платформенных структур, как оказалось, часто соответствуют структурным рисункам (по терминологии А. В. Лукьянова [1991]), которые могут дать информацию о согласованных горизонтальных перемещениях, происходящих при стресс-режимах разного типа (сжатия, растяжения или сдвига). Наблюдения такого рода позволяют прогнозировать на платформе возможный характер регионального (и глубинного?) напряженного состояния [Копп, 1997, 2004].

Во-вторых, макроструктурные данные необходимо использовать при попытках экстраполяции мезоструктурных данных (по определению, получаемых только на самой земной поверхности) на глубину. Здесь важно учитывать возможные изменения кинематики структур в вертикальном разрезе и проявления структурной дисгармонии.

Кинематика линейных макроструктур.

Образовавшиеся при сжатии *взбросы и надвиги*, подтвержденные съемкой и бурением, встречаются на поверхности чаще сдвигов и сбросов и, кроме того, имеют наибольшую амплитуду. Это явилось причиной распространенного мнения о том, что разрывы данной категории определяют и главный стиль структуры на глубине [Казанцев, Казанцева, 2001; Трофимов, 2014; и мн. др.].

Большинство надвигов приурочены к границам активизированных поднятий герцинско-киммерийского фундамента, видимо, более мобильного по сравнению с докембрийским: они обнаружены вдоль бортов Урала и Донецкого складчатого сооружения в их новейших границах. В центре же Русской плиты, где на верхний мезозой-эоцен местами надвигается докембрийский фундамент, единичные взбросы – Жигулевский и Саратовский – быстро угасают вверх, замещаясь флексурами. При этом выявленные внутри платформы взбросы никак не связаны ни с планом, ни с контурами или знаком докембрийских структур. Так же сложно обстоит дело с выделением надвигов вдоль бортов новейших складчатых зон, возникших при смятии чехлов авлакогенов. Реально доказанных на поверхности разрывов здесь вообще почти нет, но иногда предполагается возможность глубинного надвигания вдоль более крутых бортов таких складчатых зон.

Однозначно доказанные новейшие *сдвиги* встречаются нечасто, но зато распространены в самых разных обстановках. На Урале (Среднем и Северном) постэоценовые левые сдвиги с амплитудами до 1–2 км картированы в Западной Сибири к востоку от Лозьвинского надвига; они имеют СЗ простирание, свидетельствующее о субширотном сжатии Урала. Новейший возраст имеют и многочисленные сдвиги (амплитуда до 0,5 км) оси Мугоджарской гряды и сопровождающей ее крутой привзбросовой флексуры, где круто наклонены верхнемеловые и палеогеновые слои [Копп, 2005].

В пределах самой Русской плиты сдвиги (правые, СЗ простирания) отчетливо проявлены на юге Прикаспия, где они смещают простиранийшийся широтно Промысловско-Цубукский вал с миоценом в ядре. Рядом послемеловые правые сдвиги той же ориентировки известны на субширотном Сальско-Манычском валу [Копп, 2005] (ссылки там же). Взятые в целом, эти правые сдвиги Прикаспия трассируются на таковые Донбасса [Корчемагин, Емец, 1967; Sim et al., 1999]. На юге весь этот правосдвиговый домен встраивается в область концентрации правых сдвигов СЗ Кавказа [Копп, 2007], что свидетельствует о единстве деформации данной части платформы и этого ороена.

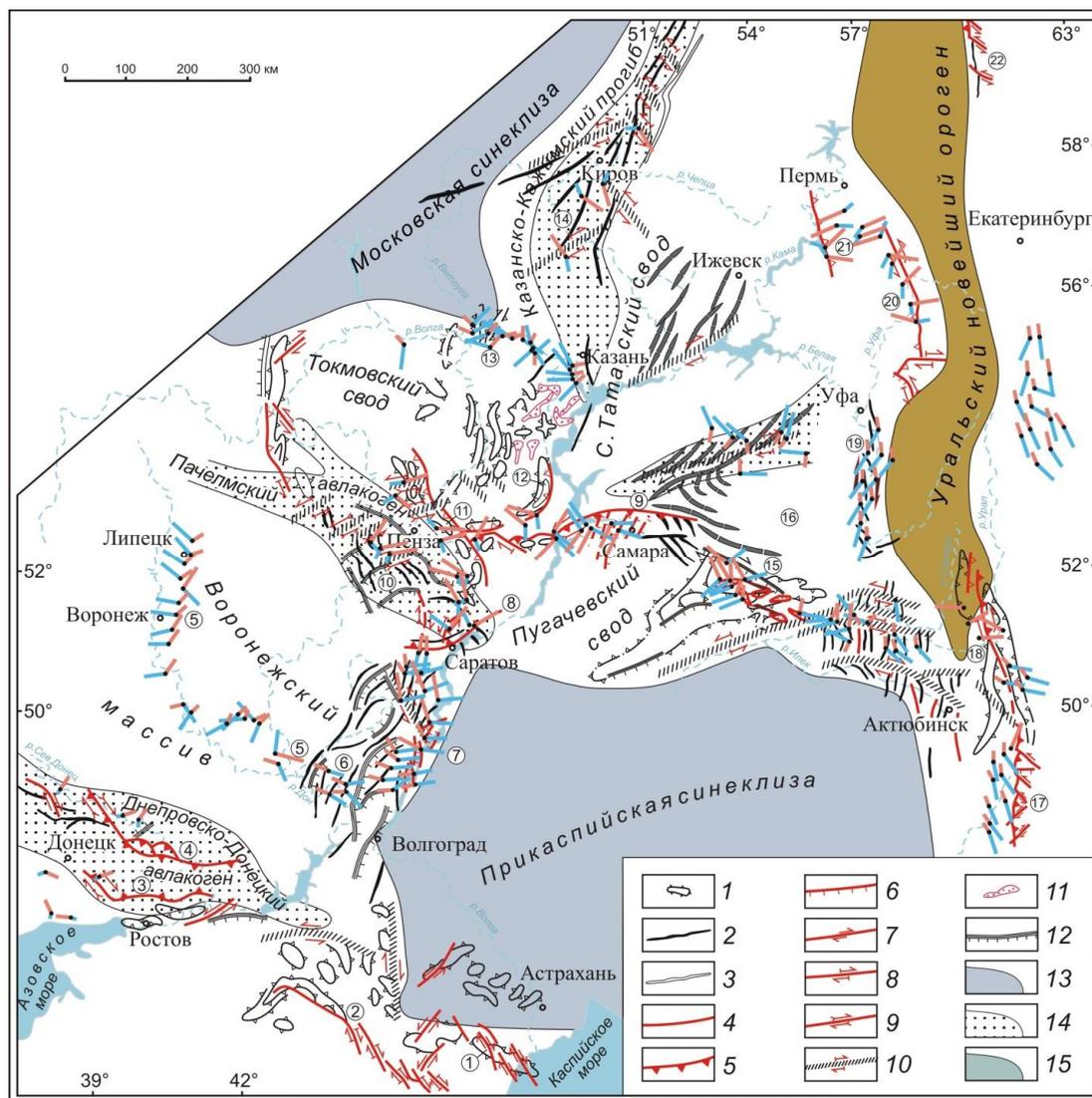


Рис. 1. Карта новейших напряжений востока Русской плиты и Южного Урала

Красными и синими линиями показаны восстановленные с помощью компьютера горизонтальные проекции соответствующих осей сжатия и растяжения. Наклон осей направлен от центральной точки символа, а величина наклона обратно пропорциональна длине штриха:

1–10 – элементы макроструктуры; содержащие информацию о типе стресс-режима: 1–3 – пликативные структуры: 1 – контуры линейных мегавалов и брахиморфных поднятий; замкнутых и незамкнутых; 2 – оси валов и линейных антиклиналей; 3 – оси крупных синклиналей; 4–12 – дизъюнктивные структуры и флексур: 4–7 – откартированные разрывы; в том числе: 4 – разрывы неясной кинематики; 5 – взбросы и надвиги; 6 – сбросы; 7–9 – сдвиги; с кинематикой; 8 – доказанной смещениями структур; 8 – предполагаемой по особенностям структурного рисунка; 9 – то же; с подтверждением по мезоструктурным данным; 10 – горизонтальные флексур и широкие зоны сдвига; 11 – зоны мелких надвиговых деформаций и брекчирования; 12 – вертикальные флексур (штрихи – по падению смыкающего крыла); 13–14 – элементы тектонического районирования: 13 – синеклизы; 14 – авлакогены; 15 – моря. Уральский новейший ороген выделен коричневым цветом. Некоторые новейшие структуры (номера в кружках): 1 – Промысловско-Цубукский вал; 2 – Сальско-Манычский мегавал; 3 – Персиановский взброс; 4 – Северодонецкий взбросо-сдвиг; 5 – Среднедонской новейший уступ; 6 – Доно-Медведицкие дислокации; 7 – Балыклейские грабены; 8 – Саратовские дислокации и Елшанско-Сергиевский взброс; 9 – Жигулевские дислокации и одноименный взбросо-сдвиг; 10 – Керенско-Чембарские дислокации; 11 – Сурско-Мокшинские дислокации; 12 – Борлинский вал; 13 – Окско-Цнинский вал; 14 – Вятские дислокации; 15 – новейший свод Общего Сырта; 16 – складчатые дислокации востока Общего Сырта; 17 – Бугульминско-Белебеевский свод; 18 – Бельские дислокации Предуралья; 20 – Уфимский свод и Суксунский разрыв; 21 – Мугуджары; 22 – Южный Урал; 23 – Средний Урал; 24 – Северный Урал; 25 – Лозьвинские дислокации; 26 – Зауральская структурная терраса.

Fig. 1. Map of recent stresses in the eastern Russian Plate and South Urals

Computer reconstruction of horizontal projections of the principal normal axes of strain ellipsoid: compression axis (red hachures) and extension axis (blue hachures). Inclinations of axes are directed from point in symbol center; inclination value is inversely proportional to hachure length:

1–10 – macrostructural elements bearing in formation on stress regime type: 1–3 – plicative structures: 1 – contour of linear swells and brachyform uplifts; closed and unclosed; 2 – axes of swells and linear anticlines; 3 axis of large synclines; 4–12 – disjunctive structures and flexures: 4–9 – mapped faults: 4 – fault with uncertain kinematics; 5 – reverse and thrust faults; 6 – normal faults; 7–9 – strike-slip faults with kinematics: 7 – proved by offsets of structural elements; 8 – inferred from structural pattern; 9 – the same with corroboration by mesostructural data; 10 – horizontal flexures with strike-slip kinematics inferred from structural pattern; 11 – small thrust deformation and brecciation; 12 – vertical flexures: (ticks are directed down the dip of downthrown limb; 13 – syncline; 14 – aulacogenes; 15 – seas. Recent intraplate Urals orogen is shown by brown colour. Recent structural elements mentioned in text (numerals in circles): 1 – Promyslovsky–Tsubuk swell; 2 – Sal-Manych megaswell; 3 – Persianovka Reverse Fault; 4 – Severodonets reverse fault; 5 – recent Middle Don Scarp; 6 – Don-Medveditsa dislocations; 7 – Balyklei grabens; 8 – Saratov dislocations and Yelshanka–Sergievka reverse fault; 9 – Zhiguli dislocations and eponymous strike-slip fault; 10 – Kerensk–Chembar dislocations; 11 – Sura–Moksha dislocations; 12 – Borlinsky Swell; 13 – Oka–Tsna swell; 14 – Vyatka dislocations; 15 – recent arch of Obshchy Syrt; 16 – fold dislocations in east of Obshchy Syrt; 17 – Bugul'ma–Belebi arch; 18 – Belaya dislocations of Cis-Ural Foredeep; 19 – Ufa swell and Suksun fault; 20; Tulva upland and eponymous fault; 21–24 – recent intraplate Urals orogen: 21 – Mugodzhary; 22 – South Urals; 23 – Central Urals; 24 – North Urals; 25 – Loz'va dislocations; 26 – recent Transurals structural terrace.

Внутри Русской плиты сдвиги также широко выражены, но уже только по особенностям структурного рисунка. Так, симметричные правые и левые сдвиги видны в кулиности структур Доно-Медведицкой зоны, указывая на ее продольное удлинение [Копп, 2004. Копп, Тверитинова, 1999]. Субширотные левосдвиговые изгибы осей валов – существенный элемент строения Керенско-Чембарских и Сурско-Мокшинских дислокаций Мугоджары [Копп, 2011]. Еще севернее левые сдвиги присутствуют в районе сжатой шейки Вятской складчатой виргации [Копп, 2012], где они ступенчато смещают до 1 км ось одноименного мегавала и соседней к востоку синклинали (ссылки см. в [Копп, 2012]). Ориентировка как последнего, так сдвигов соответствует субширотному (ЗСЗ) сжатию, вероятно, уральского происхождения.

Доказанные кайнозойские *наклонные сбросы*, образовавшиеся при растяжении, на поверхности, наиболее немногочисленные и малоамплитудные (до 100–150 м), но зато образуют протяженные домены; особенно широко они обрамляют на СЗ Прикаспийскую синеклизу. Поле постмаастрихтских сбросов амплитудой в десятки м зафиксировано высокоточной сейсморазведкой микроОГТ вдоль южного борта Окско-Донского новейшего прогиба) [Тарков и др., 2002], наложенного на Воронежский массив.

Ориентация растяжения, определенная по простиранию сбросов, конформна (поперечна) таково сжатия, установленного по надвигам и сдвигам. Однако, если структуры сжатия приурочены к участкам активизированного герцинского фундамента и к авлакогенам, то ареалы растяжения развиваются больше на антеклизях и у их границ с синеклизами.

Признаки дисгармонии структур в вертикальном разрезе. Дисгармония проявляется в следующих двух видах.

1) При прямом выражении платформенных валов в разных горизонтах чехла (особенно для участков относительно неглубокого фундамента), амплитуды валов и осложняющих их взбросов одновременно снижаются вверх – причем

настолько постепенно, что исключается какое-либо влияние угловых несогласий.

Это наглядно выражено на сериях многих (до десятка и более) структурных карт, построенных по многочисленным реперам внутри чехла для детально разбуренных Жигулевских, Саратовских дислокаций и других промышленно-нефтеносных районов. Дисгармония такого рода объясняет, почему возникшие при сжатии, с участием взбросов и, возможно, сдвигов, структуры выполаживаются к поверхности и, с другой стороны, связывает это явление с пассивным поведением чехла, под весом которого угасает глубинное сжатие и компенсирующее его воздымание вершин валов.

2) Другой вид автономного поведения чехла по отношению к фундаменту наблюдается в авлакогенах. В отличие от рассмотренной ситуации, в них фундамент сильно прогнут, и соотношения топографии его кровли с зеркалом складчатости в авлакогенах инверсионные. Часть складок чехла там вообще не имеет корней в фундаменте [Копп, 2012] (ссылки см. там же).

В обоих случаях автономное поведение фундамента и чехла при деформации было бы невозможно при действии фиксированного вертикального давления.

Резюме. Напряженное состояние, устанавливаемое по данным о кинематике линейных макроструктур и образуемых ими структурных рисунков, чаще проявляется горизонтальным сжатием, которое, однако, осуществлялось не только в надвиговом, но и в сдвиговом режиме. При этом, судя только по поверхностным данным, последний гораздо шире распространен на площади.

Сдвиги повсеместно развиваются в ассоциации с надвигами, что указывает на общность создавшего их поля напряжений. Особая концентрация сдвиго-надвиговых деформаций около границ платформенной области с новейшими орогенами Кавказа и Урала свидетельствует о том, что стрессы передавались от этих границ. Сжатие, судя по увеличению амплитуды надвигов вниз, передавалось от фундамента платформы, но,

проходя через чехол, затухало к поверхности. Увеличение сжатия вглубь заставляет учитывать это явление при использовании мезоструктурных данных, собираемых на земной поверхности.

Анализируя количественное соотношение разных режимов напряжений по кинематике крупных структур, заметим, что информации о проявлении сдвигов на глубине пока недостаточно. Имеющиеся данные бурения и геофизики показывают только вертикальную амплитуду деформаций. Однако, отчетливое проявление сдвига в структурных рисунках крупных платформенных валов позволяет предположить более существенное проявление сдвиговой деформации на глубине.

Поле напряжений/деформаций по мезоструктурным данным (компьютерная реконструкция)

Особенности методики. Статистический анализ замеров элементов залегания мезоструктурных кинематических индикаторов производился нами с использованием как стереограмм, так и компьютерных операций. В основе обоих способов лежит структурно-кинематический анализ сопряженных сколовых смещений, сформированных в едином поле напряжений (известный как метод Гущенко [Васильев, Мострюков, 2000; Гущенко, 1982, 1999 и др.]. Результаты, полученные с помощью первого из указанных подходов, наиболее точно передают характер исходного материала), и они освещались в наших публикациях. В настоящем исследовании предпочтительно использовались компьютерные методы анализа, результаты применения которых позволяют делать более широкие обобщения и экстраполяции – как в региональном плане, так и на глубину. Отметим основные преимущества и недостатки реконструкций такого рода.

Если стереограммы (даже синоптические обобщающие материал для крупных территорий) дают лишь дискретное представление о характере поля напряжений, то благодаря применению компьютера это поле выглядит более связным и легко может быть сопоставлено с топографической основой. Кроме того, точнее реконструируются параметры поля напряжений: ориентация и наклон главных и касательных осей эллипсоида напряжений, а также типы нагружения (стресс-режимы): сжатие, растяжение или сдвиг), характеризующиеся коэффициентом Лоде-Надаи. Далее, облегчается сепарация интегрального массива данных на группы, соответствующие частным полям напряжений (“фазам нагружения”), действовавшим неодновременно. Наконец, особое преимущество компьютерной обработки – возможность увидеть согласованную картину поля напряжений для крупной территории. С другой стороны, неизбежная при компьютерном анализе генерализация данных автоматически отсеивает важные детали, заметные на стереограммах.

Теоретические основы используемого нами структурно-кинематического анализа изложены в известных трудах В. М. Вировлянского, М. В. Гзовского и О. И. Гущенко, а принципы составления алгоритмов для компьютера – в работах [Васильев Мострюков, 2000; Гущенко, 1982, 1999; Корчемагин, Емец, 1987].

Смена во времени фаз стресс-режимов выражена в “переиндексации” (инверсии) главных осей тензора напряжений. При этом знак и относительная величина какой-либо из осей последнего меняется на 90° (фазы смены: $\sigma_1 \leftrightarrow \sigma_2$, $\sigma_3 \leftrightarrow \sigma_2$ и т.д.), при постоянстве ориентировки каждой оси. В зависимости от качества данных компьютерный анализ позволяет выделить в отдельном обнажении результаты действия от 1–2 до 4–6 сменявшихся стресс-режимов, накопившиеся в виде сочетания мезоструктурных парагенезов разного типа. Разумеется, конкретный возраст этих частных полей напряжений должен решаться геологически, но принципиально учитываются два варианта: 1) эти механизмы принадлежат не связанным тектоническим эпохам, 2) будучи физически разновозрастными, геологически они одновременны и вызваны общим источником напряжений, их же отдельное проявление связано с изменением условий нагружения (например, в результате релаксации какого-либо режима, освобождающей место для накопления стрессов противоположного знака) и отражает частную конкуренцию сопряженных стресс-режимов. Второй вариант предполагает взаимодействие осуществляющихся рядом разных стресс-режимов с подвижной, пульсирующей границей их ареалов, и в рассматриваемых условиях наиболее вероятен. Практически же, наличие нескольких решений стресс-режима для конкретного участка означало для нас необходимость выбора одного из них для включения в сводную картографическую модель – и здесь выбирался режим, более соответствующий динамическим чертам макроструктуры.

Важное позитивное свойство компьютерного анализа – возможность осуществления генерализации данных, позволяющей строить разномасштабные карты поля напряжений. От ее уровня зависит не только степень нагруженности карты символами (существенная в техническом плане), но и сам характер регистрируемых стресс-режимов и, иногда, даже ориентация осей напряжений. Для того, чтобы получить согласованную карту более мелкого масштаба (“региональную”), нужно увеличить радиус палетки осреднения, либо генерализовать сами выборки первичных данных: отсечь векторы, не согласующиеся между собой и с главным стресс-режимом.

По первому пути, генерализация осуществляется методом скользящего окна, и в нашем случае применялись окна с радиусом круга осреднения от $0,3^\circ$ до 3° . В результате поле

векторов выглядит хорошо организованным (“сглаженным”): они выстраиваются параллельно друг другу с одинаковыми интервалами. Итоговая карта легко читается и подчеркивает доминирующий деформационный стиль. Однако, при сильном разбросе данных увеличение окон осреднения приводит к нежелательным результатам: оно требует расширения поля синтезируемых динамических символов на гораздо большую, нежели то было в процессе наблюдений, площадь экстраполяции. Это затрудняет привязку результатов со структурой, а, кроме того, возникает иллюзия однородности поля напряжений. Подобным образом генерализованы данные для южной половины Русской плиты, а также Южного Урала [Копп, 2004, 2005] (там и там обработка О. И. Гуценко).

В публикуемую здесь итоговую карту (см. рис. 1) из этих материалов включены соответствующие результаты только для самых южных районов Русской плиты, поскольку точки наблюдения были здесь расположены равномерно, а поле напряжений оказалось однородным. Соответственно, для этих районов применялись палетки с относительно низким ($0,3-1^\circ$) радиусом осреднения, и искажение топографической привязки получилось невелико.

Зато для Урала и Мугоджар, где материал собирался в узких кайнозойских прогибах, а разброс результатов оказался гораздо большим, данный способ генерализации, с радиусом осреднения 3° , привел к сильному искажению топопривязки векторов: они распространились за пределы площадей маршрутов, широко захватив палеозойское ядро Урала. Поэтому, чтобы добиться большего правдоподобия и информативности карты, для отдельных участков пришлось пересчитывать соответствующие результаты вторым из указанных способов генерализации. Количество замеров в каждой выборке данных для главной карты (см. рис. 1) составляло до 100–150, а для карт большего масштаба – 70–100. Выборки размещались так, чтобы наиболее равномерно охарактеризовать изучаемые структуры, а географические координаты выборок рассчитывались путем интерполяции координат реальных пунктов наблюдений.

Помимо устранения технических погрешностей, связанных с топопривязкой векторов, применение данного способа генерализации позволило выявить важные общие (регионального и, возможно, глубинного ранга) черты напряженного состояния. Так, для Южного Урала и Мугоджар, а также для территорий Воронежского массива, Токмовского и Южно-Татарского сводов установлены отчетливые проявления сдвигового режима, а для севера платформенной территории (Вятские и Керенско-Чембарские дислокации, Приуралье, Бугульминско-Белебеевский новейший свод) выявлена иерархия разноранговых

полей напряжений. Недостаток способа – большой разброс ориентировок динамических символов и, как следствие, – их скученность, местами затрудняющая чтение карты.

Результаты реконструкции

На генерализованной карте (см. рис. 1) показаны горизонтальные проекции двух главных нормальных осей эллипсоида напряжений – оси наибольшего сжатия σ_3 (иногда вместо нее промежуточная, ось σ_2 , при сбросовом режиме играющая роль оси укорочения), и оси наибольшего растяжения σ_1 , которая при надвиговом режиме замещается осью удлинения. Эта основная тектодинамическая нагрузка карты совмещена с элементами макроструктуры, содержащими информацию о кайнозойском напряженном состоянии.

Результаты для разных регионов рассмотрим по трем линиям: 1) тип поля напряжений (стресс-режима), 2) ориентация осей нормальных напряжений, 3) наклон этих осей.

На карте наклон каждой оси направлен от центральной точки динамического символа, а длина горизонтальной проекции оси (условно, “вектора”) обратно пропорциональна величине наклона. Тип стресс-режима читатель может самостоятельно вычитать по геометрической конфигурации динамического символа: при надвиговом режиме гипертрофированно увеличена ось сжатия, находящаяся на простирании оси растяжения, тогда как последняя короткая либо вообще отсутствует; при сбросовом, напротив, увеличена ось растяжения; при сдвиговом – проекции обеих осей почти равновелики, но взаимно перпендикулярны; наконец, при “взрезовом” режиме (обстановке вертикальных перемещений) – обе оси также равновелики, но опять продолжают одна другую, будучи наклонены в противоположные стороны.

В районе *Донбасса* установлено послемеловое продольное (субширное) удлинение Донецкого складчатого сооружения (ДСС) в сбросовом и сдвиговом режимах со сжатием, направленным поперек или по диагонали к ДСС [Копп и др., 2010]. Косая по отношению к ДСС ориентировка напряжений подтверждает установленный прежде правый сдвиг вдоль Северодонецкого разрыва СЗ-ЮВ простирания [Корчемагин, Емец, 1987]. Массовые замеры в третичных породах на крыльях поперечного к ДСС Волновахского новейшего вала, СВ простирания, выявили постэоценовое поперечное сжатие последнего в направлении СЗ-ЮВ во взбросовом режиме и продольное растяжение – в сбросовом. К востоку же, в Тузловской впадине, сжатие сменяется растяжением вдоль того же, северо-западного, направления, и это позволяет предположить, что сжатие новейшего вала компенсировало правый сдвиг ДСС по Северодонецкому разрыву, тогда

как Тузловская впадина возникла при растяжении в тылу сдвинутого блока [Копп и др., 2010]. Правосдвиговый режим установлен также в соседних к востоку от Донбасса Промысловско-Цубукском и Сальско-Маньчском валах [Копп, 2004]. Правые сдвиги преобладают и в структуре соседнего СЗ Кавказа [Копп, 1997, 2007].

В центре *Воронежского массива*, вдоль западного борта наложенного на него Окско-Донского меридионального новейшего прогиба, повсюду фиксируется растяжение З-В (на севере – до СЗ-ЮВ) в сдвиговом и кое-где – сбросовом стресс-режимах [Копп, 2004; Копп и др., 2014]. На западе Воронежского массива ось растяжения наклонена к соседней Московской синеклизе, а ось сжатия погружается в С–СВ румбах. Сложенный мелом крутой уступ южного борта Окско-Донского прогиба возник при сжатии во взбросовом и взрезовом стресс-режимах.

В *Ульяновско-Саратовской синеклизе*, исследовались породы юры-эоцена, валы Доно-Медведицких дислокаций, вытянутые вдоль борта Прикаспийской синеклизы, демонстрируют яркий пример взрезового режима, с противоречивым сочетанием поперечных дислокациям укорочения и удлинения [Копп Тверитинова, 2001]. При этом ось укорочения погружается от Прикаспийской синеклизы к западу, а равновеликая ось удлинения – наоборот, к синеклизе. Крупнейшие складчатые пакеты приурочены к бровкам обращенных к синеклизе флексур ССВ простирания (см. рис. 1), и все это вместе позволило считать рассматриваемые дислокации присбросовыми – компенсирующими широтное новейшее растяжение борта Прикаспийской синеклизы. То, что она растягивалась именно широтно, подтверждается присутствием в ее западном борту меридиональных Балыклейских грабенов, а в мезоструктуре – замераами в обнажениях волжского берега в интервале от Камышина до Саратова [Копп, 2004].

С субширотным новейшим растяжением в Прикаспийской синеклизе согласуется и субмеридиональное сжатие Жигулевских и Саратовских дислокаций, наложенных на ее меридиональную границу с Воронежским массивом. Слагающие их осадки деформировались при сжатии от Ю-С до ЮЗ-СВ и растяжении от З-В до СЗ-ЮВ. При этом ось сжатия повсюду наклонена в северных румбах, согласно с поддвигом плит в Кавказском регионе Альпийского пояса, а ось растяжения, как и в Доно-Медведицких дислокациях погружается к Прикаспийской синеклизе. Интересная индивидуальная черта мезоструктурных парагенезов этого района – широкое присутствие настоящих сдвиговых зеркал скольжения с пологой, ниже 45° , штриховкой (что вообще-то не так уж и характерно для данной части Русской плиты, где гораздо чаще встречаются смешанные: взбросо- и сбросо-сдвиговые, зеркала скольжения с косой

штриховкой). С другой стороны, так же неожиданным и даже противоречащим данным бурения оказалась для обеих зон дислокаций плохая выраженность настоящего взбросового режима по мезоструктуре. Возможно, это частично связано с недостаточной обнаженностью линии Жигулевского разрыва, перекрытой аллювием Волги, однако то же самое отмечается и для Саратовского взброса, где эта причина отсутствует.

При этом, напротив, к северу, внутри *Пачелмского авлакогена* (Керенско-Чембарские и Сурско-Мокшинские дислокации) сдвиги, хотя и ярко проявлены в макроструктурном рисунке, в мезоструктуре выражены существенно хуже – только смешанными, взбросо- и сбросо-сдвиговыми, штриховками. Правда, по результатам компьютерной генерализации режим сдвигового сжатия становится доминирующим, а конфигурация осей напряжений показывает левые сдвиги по широтным горизонтальным флексурам. При анализе причин систематически ухудшающейся здесь выраженности сдвига в мезоструктуре, следует иметь в виду общее ослабление сжатия к северу, вызванное удалением от Кавказа. Однако могла сказаться и большая глубина фундамента в Пачелмском авлакогене по сравнению с Пугачевским сводом, где находятся Жигулевские дислокации: сдвиговый режим с его горизонтальным положением главных осей напряжений всегда развивается на больших глубинах по сравнению с надвиговым, где ось растяжения вертикальна и сбросовым, где вертикальна ось сжатия. Иначе говоря, сдвиги реализуются при более тяжелой кровле, затрудняющей движение по вертикали.

Общая к северу смена условий сдвигового сжатия взбросовым и растяжением продолжается в пределах *Токмовского свода* и *Казанско-Кажимского авлакогена* (с Вятскими дислокациями) [Копп, 2012].

При этом на большем пространстве Токмовского свода все еще сохраняется та же, субширотная до СЗ-ЮВ, ориентация оси растяжения, устанавливаемая для более южных районов, подвергавшихся давлению со стороны Кавказа. Одновременно на самом севере свода начинает систематически меняться и ориентация напряжений с разворотом: оси растяжения: к субмеридиональному (ССЗ–ЮЮВ) положению, а оси сжатия (здесь – укорочения) от субмеридиональной на юге до почти широтной (ЮВ–ВЮВ). Логичнее всего это можно объяснить усилившимся здесь давлением новейшего Урала.

Во всей этой области, кроме Пачелмского включающей и Казанско-Кажимский авлакоген с его *Вятскими дислокациями*, больше заметна зависимость определений стресс-режима от уровня генерализации данных (см. ниже в “Обсуждении результатов”). Так, для *Вятских дислокаций* выборки с небольшим (70–80)

количеством замеров показывают два конкурирующих вида сбросового режима, с растяжениями: поперечным к дислокациям, ЗСЗ-ВЮВ (преобладает), и продольным (ЮЮЗ-ССВ) [Копп, 2012]. Однако повышение генерализации до 120–150 замеров усилило разброс сбросовых зеркал скольжения, но при этом – согласованность взбросовых, а затем и сдвиговых. Ось сжатия, восстановленная этим путем, ориентирована от СЗ-ЮВ до ССЗ-ЮЮВ – поперек и по диагонали к дислокациям. Такое решение больше соответствует их складчатому строению и участию левого сдвига, заметному по структурному рисунку [Копп, 2012] (см. также рис. 1); поэтому именно взбросовый режим (к тому же находящийся в середине ряда генерализаций) включен в итоговую карту (см. рис. 1). В этой связи показательна большая устойчивость ориентации и наклона оси сжатия, при этом чаще она наклонена к ЮВ вместе с более крутым восточным бортом мегавала.

Разноплановые поля напряжений отмечаются и для новейших поднятий, осложняющих *Волжско-Камскую антеклизу* между Вятскими дислокациями и Уралом. Так, для новейшего свода Общего Сырта выделены сдвиговый и сбросовый режимы с растяжением З-В – ЮЗ-СВ; его ось наклонена разнообразно, но ось сжатия – повсюду к северу, как и на территории востока Воронежского массива. Такие ориентация и наклон осей подтверждают, что на юге этой обширной области все-таки проявляется меридиональное (до ССЗ) “кавказское” сжатие с направленным к северу поддвигом масс. Сжатие такой же ориентировки угадывается здесь и для глубинных горизонтов – по особенностям структурного рисунка глубинных валов в Бузулукской впадине [Копп, 2004] (ссылка см. там же). Однако оно прямо противоречит системе развитых на поверхности широтных новейших грабенов с верхним мелом внутри поля триаса. Все это позволяет сделать аргументированный вывод об очередном проявлении динамической расчлененности коры

В Кунгурской ячее *Предуральского прогиба*, в зоне осложняющего Уфимский вал меридионального Суксунского разрыва (вертикального сброса, по бурению), обнаружили многочисленные параллельные ему мезоструктурные взбросы и взбросо-сдвиги [Копп и др., 2008]. Они указывают на возникновение разрыва при субширотном (“уральском”) сжатии с осью, воздымающейся к востоку. Субширотное укорочение, но с растяжением в своде, установлено и для меридионального Тулвинского новейшего поднятия [Копп и др., 2008]. В самой южной – Бельской – ячее прогиба, находящейся напротив особо поднятого Южного Урала, образовались мелкие складки неогеновых слоев. Мезоструктурная характеристика этих деформаций из-за

интенсивного диапиризма в кунгурских эвапоритах неоднородна, однако компьютерная генерализация установила меридиональное растяжение, характерное для Уральского новейшего орогена [Копп, 2005].

В мезозойско-кайнозойских прогибах *Южного Урала – Мугоджар* наиболее яркие поверхностные проявления режимов сжатия – взбросового и сдвигового – отмечаются около фронтального взброса Мугоджар. Ось сжатия, воздымающаяся к взбросу, ориентирована поперек или по диагонали к нему, свидетельствуя об участии сдвига: на юге – правого, а на севере – левого [Копп, 2005]. По удалении от взброса к западу, в сторону палеогеновой моноклинали, сжатие уступает место растяжению с осью вдоль Мугоджар, которая наклонена к югу – по общему погружению Урала и Мугоджар.

Обращает внимание узкая – на западе не выходящая за пределы Предуральского прогиба – локализация устанавливаемого по мезоструктуре субширотного (“уральского”) новейшего сжатия. (Правда, гораздо шире к западу, вплоть до Токмовского свода и Казанско-Кажимского авлакогена, здесь прошло субмеридиональное растяжение, ассоциируемое с давлением Урала). В этом отношении налицо существенное отличие от зоны динамического влияния Кавказа, где сжатие распространилось от Предкавказья к северу на громадное (>1000 км) расстояние, вплоть до всего Токмовского свода и юга Волжско-Камской антеклизы (Общий Сырт). Возможные причины таких различий обсудим ниже.

Латеральные вариации поля напряжений. Приведенные факты демонстрируют закономерные изменения напряженного состояния, проявляющиеся в ориентации осей напряжений и характере стресс-режима. По этим признакам выделяются три динамических домена.

В первом из них (“южном” – Донбасс, Воронежский массив, Прикаспий) преобладают субмеридиональное, до ЮЗ-СВ, сжатие и ассоциирующее с ним субширотное растяжение (то и другое – преимущественно в сдвиговом стресс-режиме). По сопоставлениям с полем напряжений Большого Кавказа [Копп, 2007] указанный стиль поля напряжений уверенно увязывается с коллизионными процессами в Кавказском сегменте Альпийско-Гималайского пояса. Другой домен (“восточный”) включает Южный Урал и Мугоджары (вместе с соседними к ним участками платформы), где районы мезоструктурных наблюдений были ограничены узкими прогибами с мезозойско-кайнозойскими осадками. Ось растяжения там повсюду направлена субмеридионально – вдоль Урала, тогда как ось сжатия (или укорочения) ориентирована более разнообразно – от З-В до СВ и СЗ, но при этом субмеридиональное ее простираение (при пологом наклоне) полностью отсутствует. Меридиональная

ориентация растягивающих напряжений отмечается и в кайнозойских прогибах Зауралья; соответственно, логично считать, что она повсюду отражает общее продольное удлинение новейшего Урала.

Рассматриваемый домен поля напряжений находится дальше от южной границы Евразийской плиты по сравнению с южным доменом и сжат субширотно, но, как мы обосновываем [Копп, 2005], это является результатом преломления коллизионного давления от Центрально-Азиатского сегмента Альпийско-Гималайского пояса у меридионального восточного края Восточно-Европейского кратона – жесткого включения внутри Евразийской плиты.

Следовательно, данные о параметрах напряжений подтверждают активную роль южной и восточной границ Восточно-Европейской платформы как передатчиков напряжений от коллизионной области на южном краю Евразийской плиты. Эти границы либо непосредственно соприкасались с зоной коллизии (на Кавказе), либо являлись внутриплитными барьерами, определявшими конкретную ориентировку напряжений (Урал). К этому необходимо добавить, что внутри обоих рассмотренных доменов снижается наблюдаемый в ряде точек дисбаланс определений типа стресс-режима, сделанных разными (макро- и мезоструктурными) методами, отмечается также и наибольший параллелизм простирания линейных валов на платформе и краев соседних орогенов.

“Северо-западному” домену внутри угла между широтным южным и меридиональным восточным доменами присущ особый стиль структуры и ориентации напряжений, прежде всего определяемый приоритетом растяжения. Попутно возрастает дисбаланс определений параметров напряжений (их ориентировки и типа стресс-режима), полученных разными – макро- и мезотектоническим методами, а выраженный на земной поверхности сбросовый режим доминирует даже на тех структурах, которые сложно объяснить без горизонтального сжатия (Вятские и Керенско-Чембарские складчатые дислокации [Копп, 2012]). В рельефе домен выражен областью широких депрессий – наложенных новейших прогибов: Окско-Донского, Заволжского, Волжско-Ветлужского и Закамского, вдоль краев которых сосредоточены все известные сбросы и грабены. Границы домена с прочими постепенные и сопровождаются следами наложения присущих им стилей деформаций.

Растяжение в северо-западном домене, как будто несовместимое с общим коллизионным сжатием, между тем как раз ожидаемо, если его связывать с удаленными стрессами на периферии области индентации: этим объясняют, например, происхождение Байкальского и Рейнского рифтов [Tarronpiet, Molnar, 1976]. В рассматриваемой здесь Периаравийской области главное

коллизионное растяжение проявилось в Южном Каспии [Копп, 1997], но можно предположить, что к северу оно продлилось образованием упомянутых пологих депрессий. По нашим данным, на юге ареала растяжения (южнее Самары и Липецка), ближе к зоне давления Кавказа, растяжение ориентировано широтно, а севернее (Нижний Новгород, Киров) оно становится меридиональным. Это может быть объяснено как обычным для крайней периферии области индентации явлением инверсии, где компенсационное растяжение принимает ориентировку вызвавшего его первичного сжатия [Копп, 1997], или одновременно возросшим здесь влиянием уральского давления.

Сжатие, проявившееся в северо-западном домене, слабо выражено на поверхности: здесь неизвестны достигающие кромки земли крупные надвижки фундамента, а встречающиеся мелкие надвижки и зоны брекчирования чехла – бескорневые (Карлинские дислокации) и др.). Кроме того, структуры сжатия не выдержаны по простиранию: здесь перекрещиваются валы широтного и меридионального направлений. При этом остается очевидным, по мезоструктурным наблюдениям, что и в таких случаях валы образовались при поперечном к ним сжатию [Копп, 2011], и, следовательно, их такая сложная ориентировка – следствие рассеяния региональных сжимающих напряжений.

Следует отметить, что снижение сжатия платформы к северу противоречит попыткам объяснить позднекайнозойские внутриплитные деформации давлением со стороны зоны спрединга в Арктике [Гущенко, 1999; Колодзяжный, 2010; Sim et al., 1999].

Интересными оказались латеральные вариации наклона осей деформации к горизонту: как выяснилось, они весьма информативны в отношении кинематики движений и притом увязываются с особенностями региональной структуры и рельефа. Особенно это относится к оси растяжения: обнаружилось, что она часто погружается вместе с тектоническим и топографическим рельефом. Так, в Мугоджарах и на Южном Урале эта ось повсюду падает к югу – согласно общему погружению шарнира Уральского новейшего орогена; около же Прикаспийской и Московской синеклиз эта ось наклонена к ним от Воронежской и Волжско-Камской антеклиз. Иными словами, компенсационное удлинение растягиваемого материала наклонено (и направлено по латерали) в сторону соседних впадин. Здесь уместна аналогия с тектоникой латерального выжимания в условиях сжатия, где движение блоков ускоряется к соседним “геодинамическим убежищам” [Копп, 1997] – участкам снижения сжатия и/или погружению тектонического рельефа. Для новейших сдвигов рассматриваемой платформенной области это проявляется в том, что из двух

сопряженных систем сдвигов разной кинематики (левых или правых) реализуется та, смещение по которой обеспечивает наикратчайший путь движущихся блоков к соседней синеклизе [Копп и др., 2014_{1,2}].

Наклон осей сжатия более разнообразен, но напомним, что в южном домене, при меридиональном сжатии, отчетливо преобладает северный наклон, согласный с поддвигом аравийской и кавказской литосферы к северу. Похоже, то же самое имеет место и в восточном домене (особенно для Предуралья, где оси сжатия систематически погружаются к западу, также внутрь платформы). Однако здесь, из-за недостаточности соответствующего материала по палеозойскому ядру Урала, говорить о мезотектонически доказанном подвиге западносибирской литосферы под Восточно-Европейскую платформу преждевременно. Вместе с тем, по макроструктуре такой подвиг предполагается по присутствию Лозьвинских дислокаций в Зауралье [Копп, 2007] (ссылки см. там же).

Помимо охарактеризованных латеральных вариаций регионального поля напряжений, наши структурные наблюдения позволили существенно уточнить вертикальную динамическую расчлененность этого поля. Выше это уже указывалось при рассмотрении фактического материала по дислокациям в авлакогенах – Керенско-Чембарских, Сурско-Мокшинских и Вятских, но мы еще к этому вернемся в заключительном разделе при анализе направлений практического применения результатов реконструкции поля напряжений.

Четвертичное поле напряжений – по данным тектоно-кинематического анализа рисунков гидросети

Методические принципы. В рисунке гидросети и во взаимном расположении крупных морфоструктур присутствуют черты, позволяющие прогнозировать кинематику горизонтальных тектонических перемещений. Несмотря на некоторую провизорность такого подхода (из-за недостатка данных о прямых смещениях геоморфологических объектов) соответствующие сведения важны для сопоставления с другими, более совершенными – макро- и мезоструктурными – методами. Данные такого рода имеют и свои несомненные преимущества: они обеспечивают полное покрытие всей территории, не зависящее от наличия обнажений или участков буровых работ; кроме того, в отличие от геологических структур в рассматриваемой области, они имеют очень четкую возрастную привязку, точно соответствующую этапу оформления гидросети – поздний плиоцен–квартер. Соответственно, в условиях неразработанной датировки отдельных фаз деформаций внутри новейшего этапа они позволяют воедино рассмотреть напряженно-деформированное состояние узкого и к тому же близкого к современному интервалу времени.

Приемы этого – тектоно-кинематического (как мы его называем) – анализа четвертичных напряжений “по гидросети” неоднократно освещались [Копп, 2004, 2011; Копп и др., 2014₂]. Однако кратко перечислим главные из них: 1) кулисные системы отрезков долин, фиксирующие сдвиг в направлении, согласном знаку кулис (“по шерсти”); 2) иногда точки кулисного сопряжения сопровождаются расширениями долин типа pull apart, указывающими на условия трансензии (сдвига с растяжением); 3) для обстановки полного растяжения – ритмично повторяющиеся расширенные участки субпараллельных долин определенного направления, часто – зигзагообразного вида в плане, характерного для трещин отрыва; 4) также о растяжении, но только кинематически асимметричном [Копп, 2016], свидетельствуют почти идеально дугообразные в плане выемки высоких крутых берегов рек (особенно Волги). Подобная морфология характерна и для цирковых оползней, однако огромная протяженность рассматриваемых уступов (десятки и даже первые сотни км) однозначно свидетельствует об их тектонической природе [Копп, 2011]. Для сравнения, точно такую же форму в плане (и при этом размеры) имеют серповидные полуграбены в рифтах с вогнутостью, направленной по движению сброшенных блоков. В наиболее общем плане направление вогнутости структур растяжения (как сбросов, так и отрывов) указывает на предпочтительную латеральную компоненту смещения блоков [Копп, 2011, 2016]; 5) напротив, берега, формировавшиеся при поперечном сжатии и некотором надвигании (например, Дона и Северского Донца в их средних течениях), часто выгибаются не от долины, а к ней.

Действительное соответствие всех этих особенностей рисунка гидросети тем или иным из указанных динамических обстановок проверялось независимыми структурными наблюдениями [Копп, 2004, 2011; Копп и др., 2014]

Здесь мы представляем схематическую карту ориентации напряжений “по гидросети” (рис. 2), которую можно сравнивать с результатами применения других методов картографирования напряжений (ср. рис. 1 и рис. 2). Необходимо, однако, сразу оговориться, что изображенные на данной карте структурные линии, имеющие огромную протяженность, никоим образом нельзя идентифицировать с разрывами, пусть даже погребенными или предполагаемыми. Точно так же сомнительно считать их и выраженными в рельефе зонами трещиноватости: хотя бы потому, что здесь никто не картировал эти зоны и не замерял среднестатистический “шаг” – расстояние между соседними из них. (Конечно, это не исключает того, что в частных случаях около линий такого рода локально могут быть обнаружены зоны трещиноватости и малоамплитудные разрывы.) Вряд ли также правомочно считать эти прихотливо изогнутые линии тектоническими линеаментами, которые, по определению прямолинейны.

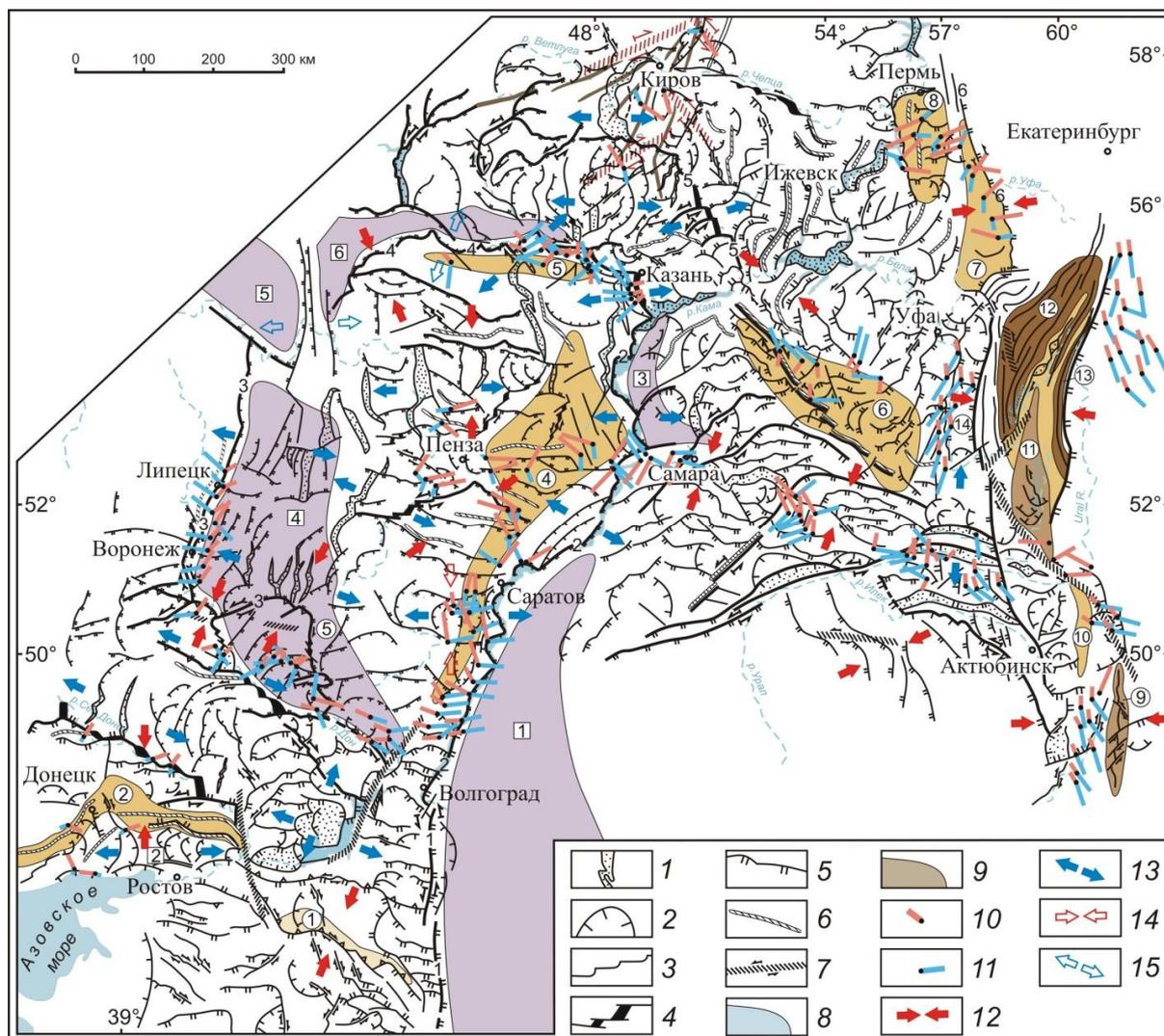


Рис. 2. Четвертичные напряжения востока Русской плиты и Урала, по данным анализа морфоструктурных рисунков

1–7 – элементы гидросети с выраженными в их геометрии и взаимном расположении признаками тектонических смещений: 1 – аномально расширенные и часто зигзагообразные в плане долины; маркирующие раздвиговый тип смещения; 2 – дугообразные неотектонические уступы (штрихи – по погружению); вогнутые к соседней депрессии рельефа и маркирующие сбросовый тип смещения; 3 – кулисные участки долин; связанные со сдвигом; 4 – кулисные расширения долин – возможные структуры pull apart в зоне сдвига; 5 – прямолинейные в плане; синусоидально изогнутые или выпуклые к соседней депрессии неотектонические эскарпы (двойные штрихи – по погружению); маркирующие взбросовый тип смещения; 6 – гребни некоторых сильно асимметричных водоразделов; 7 – широкие сдвиговые зоны; выраженные в кулисном расположении крупных элементов гидросети и/или линейных водоразделов; 8–9 – элементы неотектонического районирования: 8 – прогибы; 9 – поднятия; 10–15 – горизонтальные проекции осей нормальных напряжений: 10–11 – по результатам мезотектонических наблюдений (см. рис. 1): 10 – сжатия; 11 – растяжения; 12–15 – по морфоструктурным данным: 12 – сжатия; 13 – то же; неуверенно; 14 – растяжения; 15 – то же; неуверенно.

Новейшие структуры: поднятия (цифры в кружках: 1 – Сальско-Маньчский мегавал; 2–3 – Донецко-Волновихский мегавал (3 – его Волновихский отрезок); 4 – Приволжский сложный мегасвод; 5 – Нижегородско-Чебоксарский вал (северная часть Приволжского поднятия); 6 – Бугульминско-Белебеевский мегасвод; 7 – Уфимский асимметричный горст; 8 – Тулвинский мегавал; 9 – Мугоджарский мегавал; 10 – Эмбенский вал; 11–13 – сложный мегасвод внутриплитного орогена Южного Урала: 11 – древнее ядро; 12–13 – взброшенные прибортовые блоки: 12 – Ямантауский; 13 – Ирендыкский новейшие прогибы (цифры в квадратах): 1 – Заволжский; 2 – Тузловский; 3 – Окско-Донской; 4 – Мещерский; 5 – Волжско-Ветлужский

Fig. 2. Quaternary stresses in the eastern Russian Plate and Urals deduced from analysis of morphostructural patterns:

1–7 – elements of drainage patterns with attributes of tectonic offsets expressed in their geometry and mutual arrangement: 1 – anomalously widened and often zigzag-like in plain view valleys that mark break away offset type;

2 – arcuate neotectonic escarpments (ticks are directed downslope) concave to neighboring depression of topography and indicating normal fault displacement; 3 – echelon arranged segments of valleys related to strike-slip faulting; 4 – echeloned widening of valleys as evidence for pull-apart structure in strike-slip fault zone; 5 – neotectonic scarps rectilinear in plain view; sinusoidal; or convex toward neighboring depression (double ticks are directed downslope) indicating thrust fault type of displacement; 6 – crests of some sharply asymmetric drainage divides; 7 – wide strike-slip fault zones expressed in echeloned large segments of drainage pattern and/or linear drainage divides; 8–9 – elements of neotectonic zonation: 8 – rises; 9 – troughs; 10–15 – horizontal projections of normal stress axes trajectories: 10–11 – from results of mesotectonic observations: 10 – compression; 11 – extension; 12–15 – from morphostructural data: 12 – compression; 13 – the same; uncertain; 14 – extension; 15 – the same; uncertain

Вместе с тем, присутствие единственного, но чрезвычайно важного признака, объединяющего эти линии, все же заставляет их связывать с проявлением тектонического хрупкого разрушения: все они по своей геометрии в плане напоминают известную форму линий разрывов той или иной кинематики или их привычные сочетания.

Руководствуясь перечисленными принципами, мы обосновываем положение, согласно которому подобные рисунки гидросети вызваны тем, что в ходе эрозии тектонически напряженного горного (породного) массива происходит релаксация законсервированных тектонических напряжений, и поэтому на моделировку борта долины влияют простирание и кинематический знак образующихся при такой релаксации мелких трещин разгрузки напряжений (термин, принятый в горной механике). Тектонические напряжения являются проникающими, то есть они равномерно распределены во всей области своего действия, и поэтому участки вскрывшихся эрозией трещин разгрузки указывают не на концентрацию напряжений в узких дискретных зонах, а только на участки их расконсервации, вызванной действием экзогенных процессов. При этом трещины разгрузки, по определению, наследуют ориентацию осей тектонических напряжений в данной точке и, следовательно, берег реки тоже принимает соответствующее направление.

Использование этой теоретической платформы способствует осуществлению широкого картографирования новейших (синхронных формированию рек) напряжений и, что очень важно, при этом позволяет отказаться от трудоемких и часто неблагоприятных попыток доказывать наличие разрывов огромной протяженности, до сих пор не известных по геологическим данным.

Более специально методические принципы и результаты реконструкции напряжений “по гидросети” освещаются в работах [Копп, 2004, 2011; Копп и др., 2014₂]), здесь же ограничимся кратким перечислением основных результатов этой работы в сравнении с результатами применения других методов.

Результаты реконструкции

На самом юге охарактеризованного южного домена поля напряжений с его “кавказским” стилем напряженного состояния, последний отчетливо проявляется в структурно-геологических особенностях, так что анализ рисунков

гидросети здесь, вообще говоря, не обязателен. Однако в методическом плане отметим, что присущие данному полю черты проявляются и в строении долин: в правых сдвигах северо-западного простирания, заметных для долин Сала и Северского Донца (для последнего этот сдвиг, с широким растяжением, выражен эффектной системой пулл-апартов), а также в регулярных расширениях меридиональных притоков Северского Донца, указывающих на субширотную ориентацию растяжения.

На севере же этого домена, в Воронежском массиве, где крупных макроструктур типа Донецкой или Сальско-Маньчской мегантиклиналей, с их продольными надвигами, нет, анализ рисунков гидросети становится уже более необходимым, и здесь его использование, особенно вместе с мезоструктурными данными, также показывает сохранение поля “кавказского” субширотного растяжения с укорочением в меридиональном, до СВ, направлении.

Так, укорочение отчетливо фиксируется сдвиговыми рисунками (с пулл-апартами в долине среднего Дона), а растяжение – как проявляющейся повсюду расширенностью только меридиональных долин (Цны, Савалы и др.), часто зигзагообразной формы в плане, так и широким распространением дугообразных геоморфологических уступов. Вогнутость последних направлена к востоку, в сторону Прикаспийской синеклизы – куда, видимо, было направлено удлинение и движение масс. Индивидуальное отличие данной, северной, части южного домена – доминирующее значение левых, а не правых как на юге, сдвигов, однако эта особенность коррелируется с главенствующей ролью макроструктурных левых сдвигов на востоке Воронежского массива около Прикаспийской синеклизы.

В целом же, можно констатировать, что здесь анализ рисунков гидросети позволяет на широкой площади Воронежского массива проследить те вариации поля напряжений, которые независимо были установлены путем более узко локализованных структурных наблюдений в зонах складчатых дислокаций.

Таким образом, если рассматривать только южную половину рассматриваемой территории, то глубина проникновения к северу, внутрь платформы, кавказского давления здесь очень велика, составляя, по меньшей мере, 700–800 км (и это пока без учета того, что имеет место в северо-западном домене, см. дальше). При этом влияние

“кавказского” поля напряжений прослеживается по результатам применения уже всех трех использованных методов, включая анализ рисунков гидросети.

Для восточного (уральского) домена совпадение данных уже не столь полное. Если ориентироваться на особенности макроструктуры чехла, то ареал давления новейшего Урала на западе тоже чрезвычайно глубок: меридиональные структуры уральского плана включают такие удаленные от Урала новейшие объекты, как Вятские дислокации и даже Окско-Цнинский вал на южном борту Московской синеклизы. Однако если принимать в расчет исключительно воздействие только на гидросеть, то давление Урала распространилось лишь до Предуральского прогиба и ближайшего склона платформы, где оно выразилось в аномальной расширенности широтных отрезков долин Сакмары, Урала, Илека и др. в районе Оренбурга, а также участков соответствующего простирания долин Белой и Камы между Пермью и Ижевском. Пулл-апартового типа широтные отрезки Камы подчеркнуты приуроченностью к ним водохранилищ, образующих правосдвиговой кулисный ряд СВ простирания (см. рис. 2). Таким образом, глубина проникновения взятой в целом зоны уральского давления “по гидросети” не превышает всего 200–300 км, далеко уступая в этом отношении таковой “по макроструктуре”, проявившейся вплоть до южного края Московской синеклизы. Что же касается мезоструктурного материала по данной части территории, то выше мы отмечали его противоречивость.

В этой сложной ситуации с ареалами распространения напряжений от соседних с платформой новейших орогенов, оказалось, что недостающее звено для понимания природы противоречий способны предоставить наблюдения рисунков гидросети в “северо-западном” домене. Как выше отмечалось по структурным данным, здесь снижается и рассеивается сжатие и имеются признаки наложения напряжений разного знака.

Эти наблюдения показали, что суммарный рисунок гидросети северо-западного домена полностью аналогичен таковому южного и, следовательно, формировался под воздействием “кавказского” стиля поля напряжений – с субширотным растяжением и ассоциирующим меридиональным укорочением: при этом то и другое – с участием сдвига, особенно правого. Как на Токмовском своде и Воронежском массиве, здесь также по-прежнему расширены все меридиональные отрезки долин: здесь – северных притоков Волги и Ветлуги, а также ряд участков Вятки в ее среднем и нижнем течении. Особенно наглядный пример режима правосдвиговой трансформации (с многочисленными пулл-апартовыми расширениями) демонстрирует кулисная долина Вятки.

Резюме. Сравнивая в целом тектоно-кинематический анализ рисунков гидросети с остальными методами регистрации кайнозойских напряжений, можно сказать, что он также подтверждает существенное участие горизонтальной компоненты напряжений. Однако подчеркнуто выглядит уже сдвиговый режим – очевидно, в связи со спецификой метода, основанного на анализе черт, выраженных в плане и, к тому же, на обширной площади.

Далее, подтверждается участие двух конкурирующих типов полей напряжений (с субмеридиональным и субширотным сжатием – “кавказского” и “уральского”), но ареалы их действия и значимость подверглись “корректировке”. Если по макроструктуре область Вятских дислокаций принадлежит сфере влияния новейшего Урала, то по морфоструктуре, на нее наложилось субмеридиональное “кавказское” сжатие. Область же “уральского” давления сократилась до территории собственно Урала-Мугоджар, с захватом близкого Приуралья.

Таким образом, обнаруживается произошедшая в квартере направленная к северу эскалация субмеридионального сжатия, и мы это связываем с более поздней (конец раннего миоцена) “жесткой” коллизией Евразийской плиты с Аравией, по сравнению с таковой – с Индией (олигоцен).

Обсуждение результатов и анализ направлений их практического использования

Основной результат исследований – картографическая модель кайнозойского поля напряжений/деформаций рассматриваемой платформенной территории, составленная по результатам анализа обширной базы данных мезотектонических замеров, осуществленного на основе компьютеризированного структурно-кинематического метода. Компьютерные модели сопоставлялись со сведениями о кинематике известных разломов и других макроструктур, а также с результатами анализа рисунков гидросети, содержащих информацию о кинематике горизонтальной компоненты новейших напряжений. Все это позволило существенно расширить информативность представляемой реконструкции, а также уточнить возможности каждого из применяемых методов. Результаты, полученные при использовании данных разного масштаба и типа – макро-, мезо-, и морфоструктурных, а также обработанные разными способами статистического анализа (при лидирующем использовании компьютерных программ) принципиально не противоречат, а только дополняют друг друга. Применяемые в комплексе, они могут эффективно использоваться для изучения новейшего напряженного состояния платформенных территорий. Хотелось бы отметить ценность проведенного исследования как методического эксперимента – что тем более предполагает необходимость

всесторонней проверки и обсуждения его результатов

Представляемая картографическая модель поля кайнозойских напряжений (в оригинале сопровождаемая серией моделей для отдельных параметров напряженного состояния) составлена впервые для крупной платформенной территории. Комплект этих материалов сам по себе – новый информационный документ, который может анализироваться специалистами разного профиля и теоретических взглядов и при этом – для решения как фундаментальных, так и чисто прикладных задач.

Наметим следующие направления практического использования результатов исследования

1) Уточнение кинематики известных разрывов. Методически это делается путем сопоставления ориентации осей напряжений с простираем исследуемого разрыва. Например, для надвигов и

взбросов горизонтальная проекция оси сжатия перпендикулярна его линии, для сдвигов она диагональна, а для сбросов – параллельна (тогда как поперечной им является горизонтальная проекция оси растяжения). Так, в Донбассе была установлена [Корчемагин, Емец, 1987] и затем подтверждена [Копп и др., 2010] правосдвиговая кинематика Северодонецкого разрыва, считающегося надвигом. Находящийся в промышленно нефтеносном районе Жигулевский разрыв, также определявшийся как надвиг, оказался левым сдвигом транспрессионного типа, с некоторым сжатием поперек него (рис. 3) [Копп, Тверитинова, 1999]. Существенную левосдвиговую компоненту имеет и соседний Саратовский (Елшанско-Сергиевский) взброс [Копп, 2004]. Впоследствии левосдвиговые смещения структур на участках обоих этих разрывов были обнаружены бурением и геофизикой [Обрядчиков, 2014].

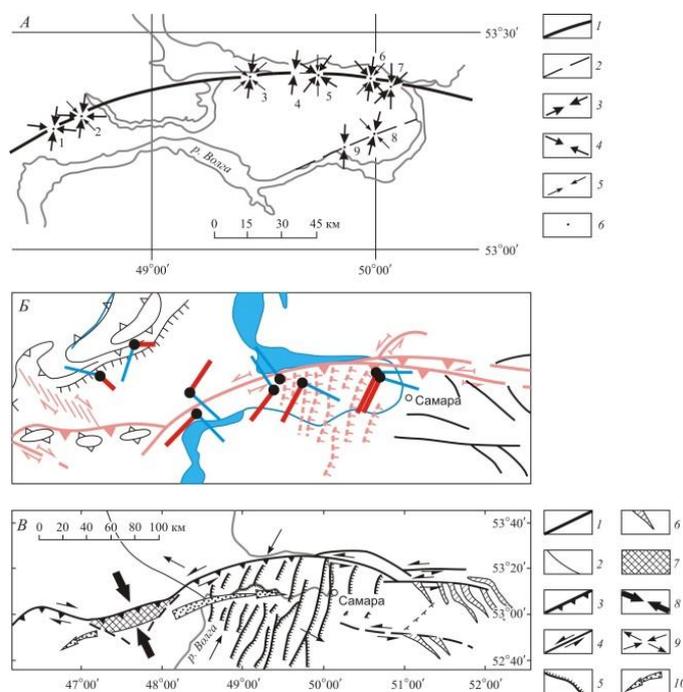


Рис. 3. Левосдвиговая кинематика Жигулевского разрыва; выраженная:

А; Б – по диагональной к линии разрыва ориентировке главных осей напряжений; по мезоструктурным данным: А – по результатам обработки стереограмм [Копп; Тверитинова; 1999]: 1 – Жигулевский разрыв; 2 – предполагаемые разрывы; 3–4 – горизонтальные проекции оси укорочения: 3–1^{то} порядка; 4–2^{то} порядка; 5–3^{то} порядка; 6 – точки наблюдения. Б – по результатам компьютерной реконструкции [Копп и др.; 2014]: красные линии – ось сжатия; синие линии – ось растяжения; наклон оси направлен от центра символа (см. также рис. 1). В – Жигулевский сдвиг; выраженный в особенностях макроструктурного рисунка [Копп; 2004]: 1 – Жигулевский разрыв; 2 – остальные нарушения; 3 – взбросы и надвиги; 4 – сдвиги; 5 – сбросы; 6 – складки и флексуры; компенсирующие горизонтальные перемещения по сдвигам; 7 – область наибольшего подъема платформенного фундамента; 8 – участок и направление пережима (деформационной шейки) Жигулевской виргации;

9 – ориентация укорочения (сходящиеся стрелки) и удлинения (расходящиеся стрелки) в наиболее выдвинувшейся к северу части Жигулевского вала; 10 – направление латерального выжимания масс из деформационной шейки

Fig. 3. Sinistral kinematics of the Zhigouli fault:

A, B – based on oblique orientation of normal stress trajectories to the fault line inferred from mesotectonic data: A – according to analysis of stereograms [Kopp; Tveritinova; 2001]: 1 – Zhigouli fault; 2 – supposed faults; 3–5 – compression (shortening) axis: 3 – of the 1st order; 4 – of the 2nd order; 5 – of the 3rd order; 6 – observation points; B – according to computerized reconstruction [Kopp et al.; 2014]: compression axes are shown by red hachures; extension axes – by blue hachures (see fig. 1).

C – Zhigouli strike-slip fault expressed in the structural pattern [Kopp; 2004]: 1 – Zhigouli fault; 2 – other faults; 3 – thrust and reverse faults; 4 – strike-slip faults; 5 – normal faults; 6 – folds and flexures formed under compression compensating strike-slip displacement; 7 – area of the maximal platform basement uplift; 8 – area and orientation of narrowing (a probable deformation neck) of the Zhigouli virgation; 9 – orientation of shortening and lengthening (converging and diverging arrows accordingly) most advanced in the north part of the Zhigouli swell; 10 – direction of the lateral escape of material from the deformation neck.

Аналогичным образом выяснилось, что почти полными сдвигами являются и уральские новейшие разрывы, около которых также известны надвиговые перекрытия: Новокиевский и Лозьвинский [Копп, 2005, 2007]. Полным (“чистым”) надвигом, похоже, остается только Мугоджарский новейший разрыв, но и он неоднократно смещен опережающими сдвигами разного знака наподобие структур “коленчатый вал” [Копп, 2005].

2) Второе направление – прогноз напряженного состояния и, соответственно, структурного стиля на глубине. Существует вопрос относительно того, как объяснить расхождение между широким (доминирующим) проявлением сдвига в региональных макроструктурных ансамблях и рисунках гидросети и, с другой стороны, – преобладанием взбросовых и сбросовых зеркал скольжения (хотя и с компонентой сдвига), наблюдаемых в обнажениях на поверхности. Разобраться в этом помогает учет уровня генерализации исходных мезоструктурных данных.

Так, для Вятских дислокаций первичный материал мезоструктурных замеров, слегка генерализованный с выборками из порядка 50–70 замеров, зафиксировал обстановку субширотного (поперек валам дислокаций) растяжения. Более же высокий уровень генерализации (150–180 замеров в выборке) зарегистрировал обстановку сдвиговой транспрессии со сжатием поперек или по диагонали к валам [Копп и др., 2014₂]. Такое решение больше соответствует складчатому строению Вятских дислокаций и участию левого сдвига, заметному по структурному рисунку [Копп, 2012]. Широтное же растяжение на поверхности (да еще имеющее и более хаотичную ориентацию) следует относить на счет распирающего воздействия вершин растущих валов на их кровлю; тот же эффект ранее был рассмотрен и для Саратовских дислокаций [Копп, 2004].

В некоторых случаях установление ориентации и типа стресс-режима с использованием процедуры генерализации позволило “оживить” кинематикой даже очень пологие на дневной поверхности структуры. Например, слабо выраженные, не более первых градусов на крыльях, флексуры и валы внутри Керенско-Чембарских и Сурско-Мокшинских дислокаций Пачелмского авлакогена, в зависимости от их простираения, оказались связанными с зонами деформаций разного кинематического типа. В том числе, более крутые вертикальные и горизонтальные флексуры субширотного простираения возникли над левыми сдвигами, валы меридионального простираения – над структурами сжатия, а наиболее пологие флексуры ВСВ простираения оказались надсбросовыми [Копп, 2011]. Данный случай интересен тем, что исследование напряжений позволяет здесь не только в общем плане высказаться о характере напряженного состояния на глубине, но и откартировать глубинные структуры разного простираения и кинематики.

В целом, если проанализировать всю сумму данных об относительной роли тех или иных стресс-режимов в глубинной деформации рассматриваемой платформенной территории – возникает впечатление, что сжатие в глубинных горизонтах платформы, которое теперь мало кто отрицает, реализуется формированием не надвигов, как это чаще всего представляют Камалетдинов и др., 1979; Казанцев, Казанцева, 2002; Трофимов, 2014, и мн. др.), а сдвигов. Наблюдаемые же реально надвиговые перекрытия являются результатом транспрессии, которая еще и усиливается по мере приближения к свободной земной поверхности, где подчеркиваются направленные вверх вертикальные, а точнее – сбросовые, взрезовые и надвиговые смещения по падению/восстанию плоскостей разрывов.

3) Изучение современных движений как возможного фактора геоэкологической опасности. Обобщение литературных материалов по новейшим и современным вертикальным движениям в рассматриваемой территории показывает общее совпадение знака тех и других. Однако из-за отсутствия данных GPS-геодезии эту закономерность пока трудно проверить для горизонтальных движений. С другой стороны, имеются серьезные основания распространять на современность результаты определения параметров напряженного состояния. Так, для новейшего Урала это можно сказать совершенно определенно: поперечное Уралу новейшее сжатие совпадает по направлению с современным, установленным по замерам напряжений в горных выработках (ссылки см. в [Копп, 2005]). То же самое, хотя и не для совсем современных, но все-таки позднечетвертичных напряжений, отмечается и при их сопоставлении с новейшими деформациями в поднадвиговом крыле фронтального разлома Мугоджар, где сформировались многочисленные активные разрывы (надвиги, сдвиги, сбросы), выраженные в смещениях молодой овражной сети. Совокупность этих разрывов показывает субширотное позднечетвертичное сжатие поперек Мугоджарской мегантиклинали [Копп, 2005].

Факты такого рода позволяют иметь в виду, что современные горизонтальные смещения по разрывам, в том числе, и сдвиговые, могут проявиться и на большем удалении от таких активных орогенов, как Урал и Мугоджарская гряда. В этом плане интересны проявления современных деформаций в зоне Жигулевского разлома [Копп, 2004; Копп, Гверитинова, 1999].

4) Привязка эпицентров платформенных землетрясений к новейшим структурам разной кинематики. Сопоставление эпицентров Вятских землетрясений, по материалам А. А. Никонова, с данными об ориентации напряжений показало (рис. 4), что вытянутые в плане эпицентрально-зона тяготеют к структурным линейам, кинематика которых определена по решениям характера поля напряжений [Копп и др., 2012] (см. рис. 4).

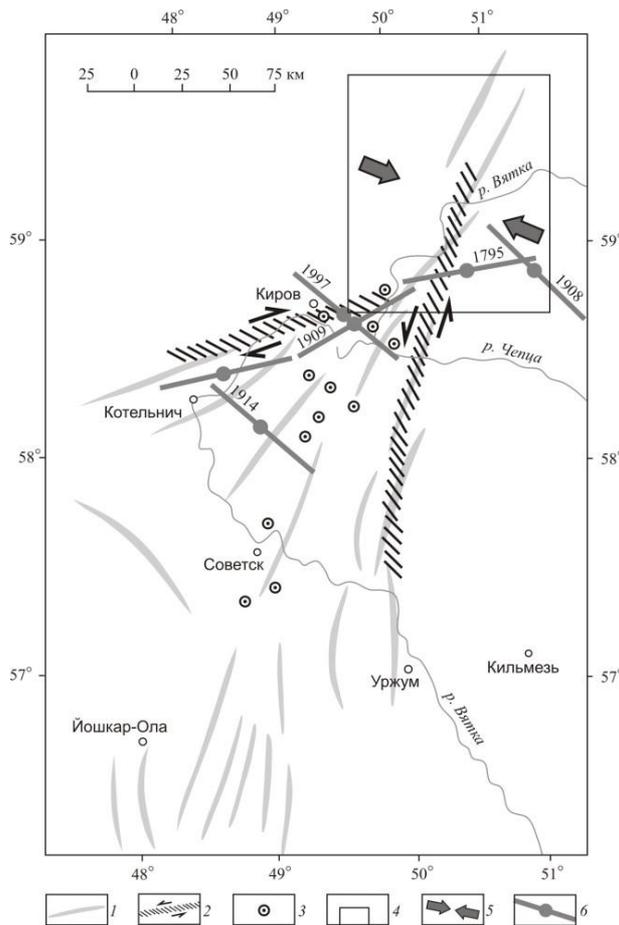


Рис. 4. Сопоставление сейсмических событий со структурно-кинематической схемой Вятской виргации [Копп, Никонов, Колесниченко, 2012]:

1 – оси валов; 2 – сдвиговые зоны; по данным анализа структурного рисунка; 3 – точки мезотектонических наблюдений; 4 – контур участка; где в структурном рисунке особенно четко проявлены диагональные левые сдвиги; 5 – установленное по ним направление сжатия; 6 – сейсмические линейменты: простирания и эпицентры очаговых зон исторических землетрясений; с обозначением года события.

Fig. 4. Correlation of seismic events with structural elements of Vyatka virgation [Kopp, Nikonov, Kolesnichehko, 2012]

1 – swell axes; 2 – strike-slip fault zones; 3 – points of mesotectonic observations; 4 – contour of site; where diagonal sinistral strike-slip faults are expressed in structural pattern [Kopp; 2012]; 5 – direction of compression established from diagonal sinistral strike-slip faults; 6 – epicenters of historical earthquakes and strike of their sources; year of seismic event is indicated.

Так, группа наиболее вытянутых эпицентральных зон приурочена к крайнему северному отрезку дислокаций, где образующие их субпараллельные валы сильно сближены в шейке одноименной виргации и, кроме того, для этого же участка имеются наиболее достоверные определения поперечного к валам сжатия и диагонального левого сдвига. Остальные эпицентральные зоны расположены вдоль СЗ края Вятской виргации, в зоне концентрации правых сдвигов, ВСВ простирания, а остальные – к поперечным по отношению к Вятским дислокациям линейментам ЗСЗ простирания. Таковы долины рр. Чепцы и Быстрицы, которые в поле напряжений с ЗСЗ сжатием должны развиваться при растяжении.

Повышенная приуроченность эпицентров к линиям зон деформаций определенной кинематики, ранее была показана для Воронежского массива [Копп и др., 2002].

Выводы

Представленная картографическая реконструкция поля кайнозойских напряжений/деформаций позволяет сделать следующие выводы регионального, фундаментального и прикладного характера:

1) На новом фактическом материале подтверждено широкое участие в образовании кайнозойской структуры платформы горизонтальных напряжений.

2) Показано возрастание к южному и восточному краям платформы горизонтального сжатия в надвиговом и сдвиговом стресс-режимах, тогда как в ее центральной части (по крайней мере, на поверхности) доминирует сбросовый режим. Кроме того, у краев лучше всего выражена поперечная к новейшим орогенам Урала и Кавказа ориентация оси сжатия и продольная к ним – оси растяжения. Такие латеральные вариации поля напряжения подтверждают давление на платформу новейших коллизионных областей Кавказа и Центральной Азии, но противоречат точке зрения, согласно которой давление создавалось зоной спрединга на севере. На подвиг под древнюю и жесткую кору Восточно-Европейского кратона относительно молодой (герцинской, активизированной на новейшем этапе) литосферы окружающих ВЕП молодых платформ указывает регулярный наклон оси сжатия, направленный от южного и восточного краев платформы внутрь нее.

3) Установлены ориентация и систематический наклон оси растяжения по погружению тектонического рельефа: например, вдоль Урала к его южной периклинали, от антеклиз к синеклизам и т.п. Фиксируемое таким образом направление движения материала может быть вызвано как явлениями его латерального выжимания к участкам меньшего сжатия, так и чисто гравитационной

неустойчивостью утолщенной коры в орогенах и антеклизях (для последних более очевиден второй вариант).

4) Подтверждена вертикальная динамическая раслоенность поля напряжений платформы с увеличением сжатия вниз. Однако глубинное сжатие больше реализовалось не в надвиговом режиме, как это часто считается, а в сдвиговом. Об этом свидетельствуют универсальная роль сдвиговых деформаций, устанавливаемая всеми использованными методами, а также увеличение выраженности сдвигового стресс-режима при повышении уровня генерализации данных, подчеркивающей региональные особенности. Влияние надвиговых и сбросовых смещений возрастает на локальных структурах, а также в целом вверх, особенно по мере приближения к дневной поверхности.

5) Обоснованы направления практического использования методов и результатов исследования новейшего напряженного состояния платформы: а) уточнение кинематического знака известных разрывов, особенно в части обнаружения их сдвиговой компоненты, б) прогноз глубинного напряженного состояния и кинематики слабо выраженных на поверхности структур; в) изучение современных тектонических движений как фактора геоэкологической опасности и г) привязка зон концентрации землетрясений к структурным линейам разной кинематики.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках государственной темы Геологического института РАН “Тектоно-седиментационные системы: строение и развитие” (государственное задание № 0135-2018-0034), при поддержке Программы № 6 ОНЗ РАН, и государственной темы ОИФЗ РАН “Геофизические поля средних широт: мониторинг и моделирование” (номер гос. регистрации АААА-А17-117040610184-3По вопросам неотектоники, сейсмичности, глубинного строения и методики анализа поля напряжений мы консультировались с А. И. Кожуриным, В. И. Макаровым, Н. В. Макаровой, А. А. Никоновым и Ю. К. Щукиным.

Список литературы

Васильев Н. Ю., Мострюков А. О. Тектоно-физическая реконструкция условий размещения благородных металлов в дунитах расслоенного массива // М. В. Гзовский и развитие тектонофизики. – М.: Наука, 2000. – С. 281–295

Гущенко О. И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности). Природа и методол. опред. тектон. напряж. в верх. части земн. коры. Мат-лы Всес. школы-семинара, Апатиты, 20–22 мая 1980. Апатиты, 1982. – С. 35–52.

Гущенко 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)

Гущенко О. И., Мострюков А. О., Гущенко Н. Ю., Сергеев А. А. Палеонапряжения центральных районов Русской плиты (по геологическим и геоморфологическим данным). Докл. РАН. – 1999. – Т. 368. – № 2. – С. 230–235

Казанцев Ю. В., Казанцева Т. Т. Структурная геология юго-востока Восточно-Европейской платформы. – Уфа: Гилем, 2001. – 234 с.

Камалетдинов М. А., Казанцев Ю. В., Казанцева Т. Т. Происхождение нефтегазоносных платформенных структур. Уфа, Ин-т геологии Башкирского филиала АН СССР. – 1979. – 64 с.

Колодяжный С. Ю. Структурно-кинематические парагенезы в осадках фанерозойского чехла Среднерусской зоны дислокаций. Геотектоника. – 2010. – № 2. – С. 56–76.

Копп М. Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном 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. Лозьвинские дислокации Северного Зауралья как результат неотектонического поддвига коры Западно-Сибирской платформы под Урал // Доклады РАН. Т. 417. – 2007. – № 6. – С. 1020–1023

Копп М. Л. Коллизионная структура Кавказского региона // Большой Кавказ в альпийскую эпоху (под ред. Ю. Г. Леонова). – М.: ГЕОС, 2007. – С. 285–314

Копп М. Л. Денудационные уступы как индикатор региональных неотектонических напряжений // Геотектоника. – 2011. – № 5. – С. 71–90.

Копп М. Л. Наложение разноориентированных кайнозойских напряжений в центре Русской плиты / Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриплитных орогенов. Мат-лы 5-го Межд. симпозиума. г. Бишкек, 19–24 июня Т. 2 // – Бишкек: Научная станция РАН, 2011. – С. 37–41.

Копп М. Л. Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре. Геотектоника. – 2012. – № 6. – С. 55–77.

Копп М. Л. Кинематическая асимметрия как универсальная причина дугообразного изгиба структур горизонтального растяжения // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2016. – С. 256–263.

- Копп М. Л., Тверитинова Т. Ю. Кинематика Жигулевского новейшего разлома. Бюлл. МОИП, отд. геол. 1999. Т. 74. Вып. 5. С. 18–29.
- Копп М. Л., Тверитинова Т. Ю. О происхождении Доно-Медведицких дислокаций. Бюлл. МОИП. Отд. геол. – 2001. – Т. 76. – Вып. 3. – С. 19–30.
- Копп М. Л., Никонов А. А., Егоров Е. Ю. Кинематика новейшей структуры и сейсмичность Окско-Донского миоцен-четвертичного прогиба. ДАН. – 2002. – Т. 385. – № 3. – С. 387–392.
- Копп М. Л., Вержбицкий В. А., Колесниченко А. А. Новейшая динамика и вероятное происхождение Тулвинской возвышенности Пермского Приуралья. Геотектоника. – 2008. – № 6. – С. 45–69.
- Копп М. Л., Корчемагин В. А., Колесниченко А. А. Альпийские деформации Донбасса: периодичность, характер напряжений и их вероятные источники. Геотектоника. – 2010. – № 5. – С. 41–60
- Копп М. Л., Никонов А. А., Колесниченко А. А. Структура, геодинамика и сейсмичность района Вятских дислокаций (Казанско-Кажимский авлакоген северо-востока ВЕП) // Геологическая среда, минерагенические и сейсмодетектонические процессы. Мат-лы XVIII междунар. конф., 24–29 сентября 2012. – Воронеж: Научная книга, 2012. – С. 153–157.
- 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 / Колл. авторов; отв. ред. Ю.Г. Леонов, М. Л. Копп. – М.: ГЕОС, 2014. 88 с. + 2 цв. вкладки с картами. (Тр. ГИН; вып. 610)
- Короновский Н. В., Демина Л. И. Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм. Геотектоника. – 1999. – № 2. – С. 17–36.
- Леонов Ю. Г., Гущенко О. И., Копп М. Л., Корчемагин В. А., Емец В. С. Особенности развития тектонической структуры и поля напряжений Донбасса и Восточного Приазовья // Геотектоника. – 1987. – № 3. – С. 49–55.
- Расцветаев Л. М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении. Там же. – 2001. – №1. – С. 36–59
- Новейшая тектоника и геодинамика: область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты / В. И. Макаров, Н. В. Макарова, С. А. Несмеянов и др.; отв. редактор Ю. К. Щукин; Ин-т геоэкологии РАН. – М.: Наука, 2006. – 206 с.
- Обрядчиков О. С. Молодые сдвиги и ротационные подвижки на юго-востоке Русской платформы. Каспийский регион: геологическое строение и нефтегазоносность. Тр. 2 Международной геологической конференции “АтырауГео-2013”. Атырау, Казахстан, апрель 2013 года. – Алматы: Color Media, 2014. – С. 53–62.
- Сим Л. А. Неотектонические поля напряжений Восточно-Европейской плиты и соседних структур. Автореф. дис. докт. геол.-минер. Наук. – М.: МГУ, 1996. – 41 с.
- Тарков А. П., Пацев В. П., Силкин К. Ю. О структурной дисгармонии осадочного чехла Воронежской антеклизы по результатам профильных наблюдений микро-ОГТ. Геофизика. – 2002. – С. 68–70.
- Трофимов В. А. Глубинные региональные сейсморазведочные исследования МОГТ нефтегазоносных территорий. – М.: ГЕОС, 2014. – 302 с.
- Nikishin A. M., Brunet M. F., Cloetingh S. & Ershov A. V. Northern Peri-Tethyan Cenozoic intraplate deformation: influence of the Tethyan collisional belt on the Eurasian continent from Paris to Tien-Shan. C.r.Acad.Sci. – 1999. T. 329, Ser. II, pp. 49–57.
- Sim L. A., Korčemagin V. A., Frischbutter A., Bankwitz P. The neotectonic stress field pattern of the East European platform. Z. geol. wiss. 1999. Bd. 27 (3/4), 161–181.
- Sobornov K. Structural evolution of the Karpinskiy swell, Russia. C. R. Acad. Sci. 1995, T. 321, ser. II, pp. 161–169.
- Tarponnier P., Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. Nature. 1976. Vol. 264, N 5584. pp. 319–324.

М. КОПП¹, А. КОЛЕСНИЧЕНКО¹, Н. ВАСИЛЬСВ², А. МОСТРЮКОВ³

¹Геологічний інститут РАН, Пижевський пров., 7, Москва, Росія, 119017, ел. пошта: mlkopp@mail.ru

²Російський державний геолого-разведувальний університет, вул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, Росія, 117873, ел. пошта: geostress@mail.ru

³Інститут фізики Землі РАН, вул Б. Грузинская, 10, Москва, Росія, 123995, ел. пошта: most57@mail.ru

РЕКОНСТРУКЦІЯ КАЙНОЗОЙСЬКИХ НАПРУГ/ДЕФОРМАЦІЇ СХОДУ РОСІЙСЬКОЇ ПЛИТИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ І ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ

Мета дослідження – встановлення динаміки і кінематики формування нових структур сходу Російської плити і аналіз напрямів використання цих даних для вирішення регіональних,

фундаментальних і прикладних задач. Методика: комп'ютеризований структурно-кінематичний аналіз масових вимірів мезоструктурних кінематичних індикаторів (дзеркал ковзання, жил тощо), що проводиться в зіставленні з результатами макроструктурних спостережень і геолого-геофізичними даними. Результати: основний результат – картографічна реконструкція новітнього поля напружень Російської плити і Уралу. Її зіставлення з іншими даними про динаміку новітніх дислокацій на платформі приводить до таких висновків: 1) просторові варіації цього поля відображають тиск на платформу стресів, що виходять від колізійного орогена Кавказу-Копетдага і внутрішньоплитного лінійного підняття новітнього Уралу, пов'язаного з Центральноазіатською зоною колізії; 2) при проходженні через неоднорідну кору платформи колізійні напруги спотворювалися: у вертикальному розрізі стиснення (особливо в зсувному стрес-режимі) знижувалося вгору і навіть заміщалося розтягуванням над зростаючими козирками надвигів і вершинами валів, а в плановій проекції стиснення (зокрема, в зсувному режимі) зростало в авлакогені; 3) отримані дані показують набагато більше, ніж це вважалося раніше, участь зсувного стрес-режиму в глибинній структурі; крім того, встановлено великі домени горизонтального розтягування, особливо на кордонах антеклиз і синеклиз; 4) в методичному плані, результати реконструкції, зробленої на основі аналізу даних різного масштабу і типу – матеріалів макро-, мезо- і морфоструктурних спостережень, принципово не суперечать, але доповнюють один одного. Застосовувані в комплексі, вони надають найповнішу картину новітнього напруженого стану. Наукова новизна дослідження, перш за все, визначена тим, що здійснена на основі зазначеної методики комп'ютерна реконструкція поля напружень вперше представляється не тільки для території Російської плити, але і взагалі для платформ (які, на відміну від орогенів, в цьому відношенні вивчені недостатньо). Ця реконструкція – новий інформаційний документ, який можуть використовувати фахівці різного спрямування. Практична значущість: результати роботи можна застосовувати в прикладних цілях – для уточнення кінематики відомих розривів, особливо виявлення зсувних зміщень і характеристики глибинних структурно-динамічних ситуацій, а також для визначення структурної приуроченості внутрішньоплатформених землетрусів і оцінки геоекологічної небезпеки, пов'язаної зі сучасними рухами.

Ключові слова: внутрішньопластові дислокації, морфоструктура, неотектоніка, поле стресу.

M. KOPP¹, A. KOLESNICHENKO¹, A. MOSTRYUKOV², N. VASILEV³

¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7, Pyzhevskii per., Moscow, Russia, 119017, email: mkopp@mail.ru

²Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10, Bol'shaya Gruzinskaya str., Moscow, Russia, 123995

³Russian State Geological Prospecting University, 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russia, 117873

RECONSTRUCTION OF CENOZOIC STRESS AND DEFORMATIONS IN THE EASTERN EAST EUROPEAN PLATFORM WITH ITS REGIONAL AND PRACTICAL APPLICATION

The aim of this research is to elucidate dynamics and kinematics formation in recent structures in the eastern East European platform, and an analysis of usage of these data for regional, fundamental and applied task decisions. **Used method** is based on a computerized structural kinematic analysis of mass measurements of mesotectonic kinematic indicators such as slickensides and veins. A main **result** is a cartographic reconstruction of the recent stress field for the southeastern Russian Plate and the adjacent Urals. Its comparison to other data on the dynamics of recent dislocations at the platform leads to the following conclusions: (1) spatial variations of the stress field reflect the pressure onto the platform directed from the Caucasus–Kopet Dagh collisional orogen and the intraplate linear rise of the recent Urals, related to the Central Asian collision zone; (2) when passing through the heterogeneous crust of the platform, the collision stresses were distorted: in the vertical section, compression (especially in strike-slip stress regime) decreased upward and even gave way to extension above uplifting hanging walls of thrust faults and crests of swells, and in plain view the compression (including in the strike-slip regime) increased at aulacogenes; (3) the collected data show (a more than expected) participation of the strike-slip regime in deep-seated structure formation; and wide domains of horizontal extension have been found, especially at anticline-syncline borders; (4) with regard to methodic, parallel reconstructions based on data variable in scale and type (results of macro-, meso- or morphostructural observations) results do not contradict but rather supplement one another. Taken together, they represent complete a pattern of the recent stress state. **Originality** of the results is mostly determined by the stress reconstruction made up of the above methods which are first represented in the studied area. It is equally important for other extensive platform areas which, in contrast to orogens, have been insufficiently investigated in a such manner. **The practical significance.** Our results can be used for applied purposes to introduce clarity into kinematics of the known faults, especially for revealing strike-slip offsets and to refine characteristics of dynamic formation regimes for deep-seated structures. A very important direction for practical usage is how the intraplate earthquakes relate to

faults and flexures of certain kinematics and for a conservative estimate of geocological hazards related to current tectonic movements.

Key words: intraplate dislocations, morphostructure, neotectonics, stress field, the East European plate, the Urals.

REFERENCES

- Vasil'ev N. Yu. and Mostryukov A. O. *Tectonofizicheskaya rekonstruktsiya uslovij razmeschniya blagorodnykh metallov v dunitah rassloennogo massiva* [Tectonophysical reconstruction conditions of noble metals localization in dunites in stratiform massifs] *M. V. Gzovskyi I razsvitie tektonofiziki. [M. V. Gzovsky and Progress in Tectonophysics]* Moscow. Nauka, 2000, pp. 281–295 (In Russian).
- Gushchenko O. I. *Opredeleniye tektonicheskikh polei napryazhenij metodom kinematicheskogo analiza struktur razrusheniya (v svyazi s prognozom seismicheskoi opasnosti)* [Determination of tectonic stress fields with kinematic analysis of failure structures in connection with prediction of seismic hazard] *Priroda I metodologiya opredeleniya tektonicheskikh stressov v verkhnei kore* [Nature and Methodology of Tectonic Stress Determination in the Upper Earth's Crust] (Kola Branch, USSR. Acad. Sci., Apatity, 1982), pp. 35–52 (In Russian).
- Guschenko O. I. *Kinematicheskij princip odnositennoj khronologiiypaleonapryazhenij* (osnovnoij algoritm tetonicheskogo stress-monitoringa litosfery) [Kinematic principle of relative chronology of paleostresses (basic algorithm of tectonic stress_monitoring of the lithosphere)]. *Teoreticheskie I regionalnyye problem geodinamiki*. Moscow, Nauka. 1999. pp. 108–125 (GIN RAN Trans.; is. 515) (In Russian).
- Gushchenko O. I., Mostryukov A. O., Gushchenko N. Yu., and Sergeev A. A. Paleostresses in central regions of the Russian Plate (from geological and geomorphological data), *Dokady. Akademi nauk USSRi* [Reports of USSR Academy of Sciences. Earth Sci.] 1999. 368 (7), pp.894–898 (In Russian translated into English).
- Kazantsev Yu. V., Kazanceva T. T. *Struktur'naya geologiya yugo-vostoka Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Structural Geology in Southeast of the East European Platform]. Ufa: Gilem, 2001, 234 p. (In Russian).
- Kamaletdinov M. A., Kazatsev Yu. V., Kazantseva T. T. *Proishozhdeniye neftegazonosnykh platformnykh struktur* [Origin of Petroliiferous Platform Structures]. (Inst. Geol., Bashkir Branch, USSR Acad. Sci., Ufa, 1979) m, 64 p. (in Russian).
- Kolodyazhnyj S. Yu..Structural kinematic paragenesyses in Phanerozoic plaform cover of the Middle Russian dislocations.*Geotectonics*. 2010. No. 2. pp. 56–76 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L. *Structure lateral'nogo vyzhimaniya v Alpijsko-Gimalajskom kollizionnom poyase* [Lateral escape structures in the Alpine Himalayan collisional belt] Moscow: *Nauchnyj Mir*, 1997, 314 pp.(GIN RAN Trans., vol.506) (in Russian).
- Kopp M. L. *Mobilisticheskaya neotektonika platform Yugo-Vostochnoj Evropy* [Mobilistic neotectonics of platforms in Southeastern Europe]. Moscow: *Nauka*, 2004 (GIN RAN Trans., vol. 552) (in Russian).
- Kopp M. L. Recent deformation of the southern Urals and the Mugodzhary Mountains and its possible origin, *Geotectonics* 2005. 39 (5), pp. 364–388 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L. Loz'va dislocations of the North Transurals region: A response to neotectonic underthrusting of the West Siberian Platform beneath the Urals. *Dokady. Akademi nauk USSR* [Reports of USSR Academy of Sciences. Earth Sci.]2007. 417A (9), pp. 1342–1347 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L. *Kollizionnaya struktura Kavkazskogo regiona* [Collisional structure of the Caucasus region]. The Greater Caucasus in the Alpine Epoch, Ed. by Yu. G. Leonov. Moscow: *GEOS*, 2007, pp. 285–314 (in Russian).
- Kopp M. L. Denudation scarps as indicators of regional tectonic stresses. *Geotectonics* 45 (5). 2011, pp. 314–410. (in Russian translated into English).
- Kopp M. L. Nalozhenie raznoorientirovannykh kajnozojskikh napryazhenij v tsentre Russkoj plity [Superposition of variously oriented Cenozoic stresses in central Russian Plate]. *Sovremennyye problem geodinamiki I geiaekologii vnutriplitnykh orogenov* [Current Problems of geodynamics and geocology of intraplate orogens] (Sci. Station, RAS, Bishkek, 2011, Vol. 2, pp. 37–41 (in Russian).
- Kopp M. L. The Vyatka deformations in the East European Platform: formation dynamics and expression in recent structure. *Geotectonics*. 46 (6). 2012. pp. 435–454 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L. *Kinematicheskaya asimmetriya kak universal'naya prichina dugoobraznoj formy struktur rastyazheniya*[Kinematic asymmetry as an universal cause of arcuate geometry of extension structures]. *Tektonika, geodinamika I rudoobrazovanie v skladchatykh poyasakh I platformah* [Tectonics, geodynamics and ore formation in foldbelts and platforms]. T. 1. Moscow.: *GEOS*. 2016. pp. 256–263 (in Russian).
- Kopp M. L. and Tveritinova T. Yu. *Kinematika Zhigulevskogo novejshego razloma* [Kinematics of the recent Zhiguli fault]. *Byull. MOIP, Otdelenie geologii*. Geol. 1999. 74 (5), pp. 18–29 (in Russian).
- Kopp M. L. and Tveritinova T. Yu.. Origin of the Don–Medveditsa dislocations. *Byull. MOIP, Otdelenie geologii*. 2001. 76 (3), pp. 19–30 (in Russian).
- Kopp M. L. Nikonov A. A. and Egorov E. Yu. Kinematics of the recent structure and seismicity of the Miocene–Quaternary Oka–Don Depression. *Dokady. Akademi i* [Reports of Academy of Sciences. Earth Sci.] 2002. 385A (6), pp. 623–626 (in Russian translated into English).

- Kopp M. L., V. A. Verzhbitsky, and A. A. Kolesnichenko. Recent dynamics and probable origin of the Tulva Upland in the Perm Foreurals. *Geotectonics*. 2008. 42 (6), pp. 448–468 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L., Korchemagin V. A. and Kolesnichenko A. A. Alpine deformations in Donbass: periodicity, character of stresses, and their probable sources. *Geotectonics* 44 (5). 2010, pp. 405–423 (in Russian translated into English).
- Kopp M. L., Nikonov A. A. and Kolesnichenko A. A. *Struktura, geodinamika i seismichnost Vyatskih dislokatsij (Kazansko-Kazhimskij avlakogen)* [Structure, geodynamic, and seismicity of Vyatka dislocations, the Kazan–Kazhim aulacogen in the northeastern East European platform] *Geologicheskaya sreda, mineragenicheskie i seismotektonicheskie protsessy* [Geological Medium, Mineragenic and Seismotectonic Processes] Voronezh: *Nauchnaya Kniga*. 2012, pp. 153–157 (in Russian).
- Kopp M. L., Verzhbitsky V. E., Kolesnichenko A. A., Tveritinova T. Yu, Vasil'ev N. Yu., Korchemagin V. A., Mostryukov A. O., Ioffe A. I. Recent stress field in the east of the Russian plate and the Urals from macro- and mesostructural evidence, *Geotectonics*. 2014, 48(4), pp. 273–291 (in Russian translated into English).
- Kopp M.L., Verzhbitsky V.E., Kolesnichenko A. A., Tveritinova T. Yu, Vasil'ev N. Yu., Korchemagin V. A., Mostryukov A. O., Ioffe A. I. *Kajnozijskie napryaheniya vostoka Russyoy plity. Yuzhnogo i Srednego Urala: metodicheskie. teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Cenozoic stresses in the east of the Russian plate, the Southern and Middle Urals: methodical, theoretic and applied aspects] Ed. by Yu. G. Leonov and M. L. Kopp. Moscow: *GEOS*. 2014, 88 pp. (GIN RAN Trans.; issue 610) (in Russian).
- Koronovsky N. V. and Demina L. B. Collisional etape in development of Caucasus sector of the Alpine belt: geodynamics and magmatism. 1999. 33(5), pp. 17–36 (in Russian translated into English).
- Korchemagin V. A., Emets V. S. *Osobennosti razviniya tektonicheskoi struktury i polya napryazhenij Donbassa i Vostochnogo Priazovya* [Evolution of tectonic structure and stress field in Donbass and Eastern Azov region]. *Geotektonika*. 1983, no. 3, pp. 49–55 (in Russian).
- Leonov Yu. G., Gushchenko O. I., Kopp M. L. and Rastsvetaev L. M. Relationship between the Late Cenozoic stresses and deformations in the Caucasus sector of the Alpine Belt and its northern foreland, *Geotectonics* 35 (1). 2001, pp.30–50 (in Russian translated into English).
- Makarov V. I., Makarova N. V., Nesmeyanov S. A. *Neotektonika i geodinamika oblasti cochleneniya Vostochno-Evropейsskoj platformy i Skifskoi plity* [Neotectonics and Geodynamics: junction of the East European Platform and the Scythian Plate]. Ed. by Yu. K. Shchukin. Moscow. *Nauka*. 2006. 206 p. (in Russian).
- Obryadchikov O. S. *Molodye sdvigi i rotatsionnye podvizhki na yugo-vostoke Russkoj platformy* [Recent strike-slip faults and rotational movements in the southeastrn Russian platform]: *Kaspijskij region: geologicheskoe stroimie i neftegazonocnost* [Caspian region: geological structure and oil and gaz prosperity]. *Almaaty*. Color Media, 2014, pp. 53–62 (in Russian).
- Sim L. A. *Neotektonicheskie polya napryazhenij Vostochno-Evropейsskoj plity i sosednih struktur* [Neotectonic stress fields in the East European plate and adjacent sytructures]. *Avtoreferat dissertatsii*. Doctor Sci. (Geol.–Mineral.) Dissertation. Moscow: Moscow State Univ., 1996. 41 pp. (in Russian).
- Tarkov A. P., Patsev V. P. and Silkin K. Yu. *O strukturalah disgarmonii osadochnogo chehla Voronezhskoj anteklizy po rezultatam profil'nyh nablyudenij mikro-OGT* [“Structural disharmony in sedimentary cover of the Voronezh anteklise from results of micro CMP profiling, *Geofizika*. 2002, pp. 68–70 (in Russian).
- Trofimov V. A. *Glubinnye regional'nye seismorazvedochnye issedovaniya MOGT neftegazonosnyh territorij* [Deep regional seismic exploration CMP of oil and gas-bearing territories] Moscow: *GEOS*. 2014. 30 pp. (in Russian)
- Nikishin A. M., Brunet M.-F., Cloetingh S. & Ershov A. V. Northern Peri-Tethyan Cenozoic intraplate deformation: influence of the Tethyan collisional belt on the Eurasian continent from Paris to Tien-Shan. *C.r.Acad.Sci*. 1999. t.329, Ser. IIa, pp. 49–57.
- Sim L. A., Korčemagin V. A., Frischbutter A., Bankwitz P. The neotectonic stress field pattern of the East European platform. *Z. geol. wiss*. 1999. Bd. 27 (3/4), pp. 16–181.
- Sobornov K. Structural evolution of the Karpinskiy swell, Russia. *C. R. Acad.Sci*. 1995, T. 321, ser. II, pp. 161–169.
- Tapponnier P., Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*. 1976. Vol. 264, No. 5584, 319–324.

Надійшла 12.10.2017 p.