

УДК 551.248.2(470)

СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РИСУНКОВ ГИДРОСЕТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ И ДАТИРОВАНИЯ НОВЕЙШИХ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАТФОРМАХ (ВОСТОК РУССКОЙ ПЛИТЫ)

М.Л. Копп¹, А.А. Колесниченко¹, Н.В. Макарова²

¹Геологический институт РАН, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 03.06.17

Структурно-кинематический анализ рисунков гидросети платформы, проводимый в целях реконструкции палеонапряжений, позволяет диагностировать все типы стресс-режима: сжатие, растяжение и сдвиг, но наиболее уверенно выделяются два последних. Корреляция осуществленных с помощью такого подхода определений ориентировки напряжений с данными, полученными более точными структурно-геологическими методами, подтверждает высокую достоверность результатов его использования для реконструкций напряженного состояния или, по крайней мере, для его прогноза на территориях, где применять структурно-геологические методы почему-либо трудно. Исследование рисунков гидросети позволило существенно уточнить ареалы действия, возраст и конкретные источники коллизионных новейших напряжений, действовавших на литосферу Восточно-Европейской платформы в позднем кайнозое. Так, установлена произошедшая в плиоцене эскалация к северу поля напряжений «кавказского» происхождения с наложением его широкого ареала на более древнее «уральское» поле напряжений. Новейший ороген Урала при его сильном влиянии на структурный рисунок платформы в олигоцене–миоцене в плиоцене уже почти не оказывал на нее горизонтального давления (хотя именно в это время он особенно интенсивно поднялся). Северная часть собственно Русской плиты в плиоцене–квартере находилась под исключительным динамическим влиянием Кавказа. Кроме того, впервые выявлены и методически охарактеризованы признаки проявления в позднем плиоцене–квартере гравитационной деструкции литосферы антеклиз с компенсационным перемещением материала к соседним синеклизам.

Ключевые слова: неотектоника, геоморфология, новейшие палеострессы, рисунок гидросети, Восточно-Европейская платформа, Русская плита.

Kopp M.L., Kolesnichenko A.A., Makarova N.V. Structural kinematic analysis of erosional drainage patterns for reconstruction and dating of recent paleostresses in platforms (eastern Russian Plate). Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2017. Volume 92, part 5. P. 33–49.

Structural kinematic analysis of the erosional drainage patterns in the East European Platform allowed us to find out all types of the tectonic stress regime: compression, extension and strike-slip types, with the last two proved most confidently. Correlation of the paleostress orientations obtained in this way with the data supplied by more precise structural geological methods confirms a high reliability use of the results to reconstruct the recent stress state for areas where it is difficult to apply other methodics. The study of the drainage patterns made it possible to significantly refine the areas of the action, age as well as specific sources of collisional stresses that affected the East European Platform lithosphere during the late Cenozoic. For example, the Pliocene escalation to the north of the stress field of “Caucasian” origin, which imposed onto an older «Uralian» stress field, was established. On the other hand, recent orogen of the Urals actively affecting the East European intraplate structure during the Oligocene–Miocene, almost did not exert horizontal pressure on the platform at the Pliocene–Quaternary stage (although it was at this time that the Urals itself intensively uplifted). The northern part of the platform at the Pliocene–Quaternary was affected exclusively by “Caucasian” stress field widely spreading to the north. In addition, manifestations of gravitational destruction of the anteklises were discovered for the first time. Their gravitational destruction was compensated by displacement of the material to adjacent synclises.

Key words: neotectonics, geomorphology, recent paleostresses, drainage pattern, East European Platform, Russian Plate.

Морфология современного рельефа используется для изучения тектонических напряжений давно: достаточно вспомнить рождение рифтовой концепции, когда происхождение щелевидных топографических впадин стало связываться с обстановкой

горизонтального растяжения. Однако если для подвижных поясов можно широко использовать более точные методы оценки напряжений – разнообразные структурно-геологические, а также сейсмологический и геодезический, то для конти-

ментальных платформ с их пологой структурой, низкой сейсмичностью и рыхлым покровом, маскирующим медленно растущие структурные формы, все обстоит принципиально иначе и геоморфологический подход иногда становится чуть ли не единственно возможным. К сожалению, на изучавшейся нами территории Русской плиты настоящие дизъюнктивные смещения форм рельефа (тальвегов оврагов, террас) крайне редки и встречаются лишь около отдельных, особо активных, новейших разломов вроде Жигулевского или Мугоджарского (Копп, 2004; Копп, Тверитинова, 1999), причем все такие участки приурочены только к аридной зоне, где сухой климат позволяет сохраниться в ювенильном виде тонким эскарпам и рвам вдоль линий разрывов. Кроме того, особенно сложно на платформе оценивать горизонтальную компоненту смещений (как и ее определение по результатам изучения геологических структур).

В условиях недостатка прямых данных приобретают важное значение признаки, выраженные в особенностях рисунка хорошо развитой речной сети. Это, например, проявления систематической аномальной расширенности долин определенного простирания (признак их формирования при поперечном растяжении), кулидность прямолинейных отрезков долин (обстановка горизонтального сдвига), иногда — наличие у долин формы в плане, повторяющей таковую разрывов разного кинематического типа и т.п. Разумеется, анализ такого рода в определенной степени провизорный, приближенный, так как он основан на использовании не прямых признаков (коими в данном случае могут быть только разрывные смещения элементов рельефа), а косвенных — геометрических, морфологических черт линий дизъюнктивных нарушений. Вместе с тем результаты его применения могут быть проверены путем сопоставления с данными использования независимых способов исследования напряжений — структурно-геологических (Копп, 2004; Копп и др., 2014а, б), что и является одной из главных целей настоящей статьи. Кроме того, особо ценно еще и то, что при неясной датированности отдельных фаз внутри новейшего этапа и связанных с ними специфических вариаций напряженного состояния хорошо установленное время формирования речной сети (в целом плиоцен—квартер) позволяет вычлнить из позднекайнозойской суммарной деформации ее самую молодую часть.

Тот факт, что гидросеть Русской равнины чутко реагирует на изменения напряженного состояния, неоднократно отмечался в литературе (Копп, 2004; Новейшая..., 2006; Сим, 1996; Sim et al., 1999). Ранее у нас на возможность установления по рисунку линеаментов типа новейших напряжений обратила внимание Л.А. Сим (1996; Sim et al., 1999), которая на этой основе сделала интересные реконструкции напряженного состояния, преимущественно касающиеся более северной части Восточно-Европейской платформы, а также Полярного Урала и

Западной Сибири. С этим автором наши методические подходы к рассматриваемой проблеме в деталях различны, однако сравнивать и обсуждать их нет смысла, так как каждый из них по-своему субъективен, ибо использует, как указывалось, косвенные признаки из разряда линеаментного анализа. Вместе с тем мы полагаем, что, поскольку исследование рисунка гидросети для реконструкции новейших напряжений в платформах только начинает развиваться и, кроме того, уже сейчас оно дает интересную информацию, то на данном этапе важна методическая диверсификация. Соответственно, авторы настоящей статьи считают гораздо более полезным продемонстрировать результаты обобщения собственного опыта исследований в данном направлении.

Предлагаемая статья включает обоснование используемых нами методических приемов и необходимые сведения об источниках и знаке новейших напряжений на Русской плите, а также о периодичности ее кайнозойской деформации. В основной части работы проведено сопоставление определенных знака новейших напряжений по рисункам гидросети с таковыми по структурно-геологическим данным, обсуждаются результаты этого сопоставления, уточняются сравнительная информативность морфоструктурных («по гидросети») и структурно-геологических данных, а также характер плиоцен-четвертичного вклада в суммарное поле кайнозойских деформаций.

Обоснование применяемой методики

В основе применяемого нами методического подхода находится использование наблюдаемого сходства плановой конфигурации линейных элементов гидросети с широко известной геометрией линий разрывов того или иного кинематического типа, а также для более сложных рисунков гидросети — с закономерными пространственными сочетаниями групп разрывов разного кинематического типа («структурными рисунками», по А.В. Лукьянову (1991)). Однако данный подход, хотя он в целом понятен, требует уточнения по той причине, что наличие многих протяженных разрывов, которые иногда могут быть предположены по особенностям такой геометрии, не подтверждается при более детальном геологическом изучении.

В этой связи напомним ситуацию с Ергенинским субмеридиональным геоморфологическим уступом Прикаспия. По его характерной для сбросов дугообразной форме в плане и присутствию сопровождающей гирлянды более мелких уступов той же формы Н.С. Шатский (1922) предположил, что все они соответствуют серии крупных сбросов, ограничивающих на западе Прикаспийскую синеклизу. По этому поводу долго шла известная дискуссия, но ни буровые, ни геофизические данные существования столь протяженной (более 700 км) линии разрывов не подтвердили. В результате Ергенин-

скому уступу стали приписывать не тектоническое, а исключительно экзогенное, абразионное происхождение. Основания для этого вывода действительно имелись, так как бровка уступа и на самом деле определяла западный край Акчагыльского бассейна Палео-Каспия. Однако и это вполне реалистичное объяснение небезупречно.

Во-первых, Ергенинский уступ образовался только к западу от Прикаспийской синеклизы, тогда как на юге и востоке, около поднятых орогенов Урала и Большого Кавказа (где как раз и должны были формироваться особенно крутые берега плиоценовых бассейнов), ничего подобного нет. С другой стороны, такие же дугообразные и обращенные к Прикаспийской впадине уступы рельефа, аналогичные Ергенинскому, присутствуют на значительном удалении от нее, в пределах водораздела Дона и Северского Донца, где плиоценовые трансгрессии не происходили.

Во-вторых, как для данного водораздельного участка (Новейшая..., 2006), так и в зоне самого Ергенинского уступа (Горелов, 1963; Копп, 2004) установлены неотектонические деформации, выраженные в антитетических (в данном случае направленных от долин) наклонах соответственно поверхностей выравнивания и волжских террас.

В-третьих, еще Н.С. Шатским (1922) и другими исследователями вокруг западного и северного бортов Прикаспийской синеклизы были зафиксированы зоны малоамплитудных (десятки-первые сотни метров) сбросов и грабенов новейшего возраста. Одна из этих зон — Балыклейские грабены — приурочена непосредственно к упомянутому Ергенинскому дугообразному уступу, а вторая — к уступам аналогичной формы рек Самарки, Кинели, Бузулука и других на северном борту Прикаспийской синеклизы.

Наконец, в-четвертых, проведенные нами в породах палеоцена—эоцена структурно-геологические наблюдения напряженного состояния в районе линии Ергенинского уступа между Балыклеем и Саратовом показали концентрацию поперечных к нему сбросовых зеркал скольжения и трещин отрыва, следовательно, он образовался в обстановке поперечного к нему субширотного неотектонического растяжения (Копп, 2004). При этом на тех участках, где этот дугообразный уступ осложнен более короткими, но круто изогнутыми выемками-амфитеатрами, на флангах последних растягивающая деформация сочетается со сдвиговой, как это часто бывает с дугообразными сбросами (Rosendahl, 1987). В целом же субширотное растяжение поперек Ергенинского уступа конформно доминирующему в данной области платформе «кавказскому» типу поля коллизионных напряжений (см. ниже) с субширотным растяжением и ассоциирующим меридиональным сжатием. Пример последнего — находящиеся по соседству Жигулевские и Саратовские складчато-надвиговые дислокации широтного простиранья (Копп, 2004).

Таким образом, к зонам выраженных в рельефе Ергенинского и прочих дугообразных геоморфологических уступов вместо одного протяженного разрыва (как полагал Н.С. Шатский) приурочены зоны релаксации сбросо-раздвиговых напряжений и деформаций, выраженные формированием малоамплитудных сбросов и грабенов, а также трещин соответствующей кинематики.

Этот результат имеет принципиальное методическое значение для изучения динамики формирования платформ, так как он демонстрирует возможность (для территорий с невыразительными тектоническими деформациями) картирования горизонтальных новейших напряжений по особенностям эрозионного ландшафта, причем, что существенно, позволяет это делать, невзирая на отсутствие крупных разрывов и не прибегая к искусственной необходимости их непременно найти. Отсюда, конечно, не следует, что какая-либо зона релаксации напряжений того или иного знака не может где-либо оказаться выраженной более заметными деформациями на глубине, но это требует своего отдельного доказательства.

Опираясь на эти базовые положения, можно перейти к характеристике наиболее очевидных признаков проявления новейших напряжений разного знака в особенностях рисунка гидросети и в других чертах эрозионного рельефа. Оказалось, что разные стресс-режимы (сжатие, растяжение или горизонтальный сдвиг) не только имеют свои отличительные черты, но и проявляются в рельефе в неодинаковой степени.

Признаки горизонтального растяжения. В рельефе они выражены лучше таковых сдвига и сжатия, причем, по нашим наблюдениям, не только для платформ, но и для орогенов. Это связано с большей (по сравнению с новейшими надвигами и взбросами) дезинтегрированностью и рыхлостью сбросовых брекчий и, по данной причине, лучшей препарировкой поверхностей сбросов. Напротив, характерный для надвигов режим поперечного сжатия приводит к большей уплотненности и притертости принадвиговых зон брекчирования, и поэтому они лучше сопротивляются денудации. Так, в сирийских Пальмирадах (возникший из авлакогена внутриплитный ороген молодого, плиоцен-четверичного, возраста) самые широкие и глубокие долины проходят по линиям поперечных сбросов (Копп, Леонов, 2000). Кроме того, сдвиговые и особенно сбросовые тектонические контакты хорошо обнажены и там же идеально зачищены, а иногда образуют очень крупные (десятки и даже первые сотни метров) зеркала скольжения. Напротив, параллельные надвигам продольные долины, хотя они гораздо длиннее поперечных, нигде не следуют непосредственно вдоль надвигов, а развиваются на удалении от них, разрабатывая рыхлые конгломератовые толщи неогена в ядрах синклиналей. Надвиговые зеркала скольжения можно увидеть лишь после тщательной расчистки.

Все эти наблюдения позволила сделать идеальная обнаженность геологических структур в условиях аридного климата Аравийского полуострова.

На Русской равнине среди морфоструктурных рисунков, связанных с предполагаемым растяжением, можно выделить три их разновидности, которые являются наиболее характерными.

К первой группе относятся в целом прямолинейные, но при этом часто имеющие зигзагообразную («рваную») форму в плане долины – предполагаемое выражение зарождающихся мегатрещин отрыва (рис. 1): их противоположные склоны могут быть графически совмещены наподобие бортов рифтовых трогов. Разумеется, это не подразумевает никакого действительного раздвижения краев долины на уровне земной поверхности, тем более с амплитудой, сопоставимой с шириной ее днища, однако возможно облекание глубинных впадин раздвигового типа, либо релаксация в области бортов долины растягивающих стрессов, которые способны со временем привести к некоторому раздвижению бортов. При этом форма в плане таких долин коренным образом отличается от плавной извилистости свободно меандрирующих рек на ровных участках: в данном случае изгибы образованы прямолинейными отрезками, сочленяющимися под резким углом или кулисно. Долины такого рода

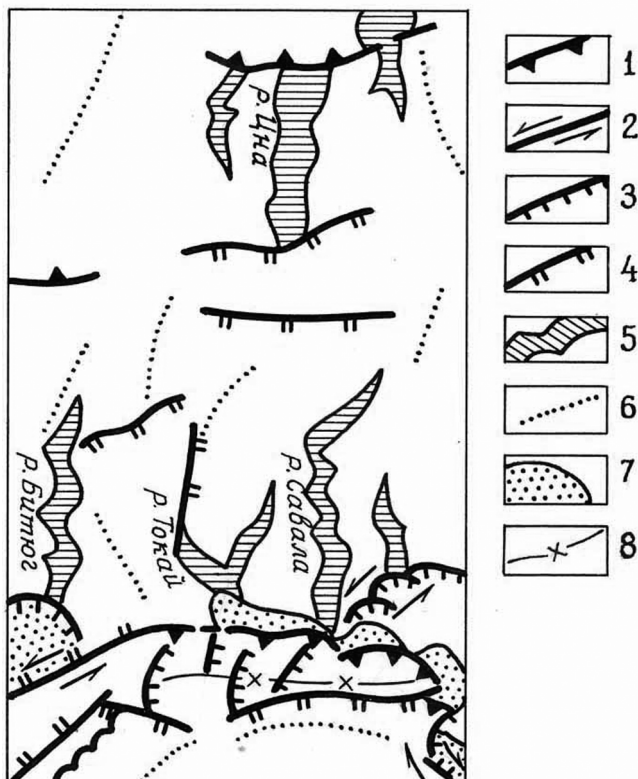


Рис. 1. Долины предполагаемого раздвигового происхождения в осевой полосе Окско-Донского новейшего прогиба (Копп, 2004), схема дешифрирования: 1–5 – линии долин с признаками горизонтальных смещений: 1 – взбросовых, 2 – сдвиговых, 3 – сбросовых, 4 – со смещением по падению сместителя, без спецификации, 5 – раздвигового (отрывного) типа; 6 – прочие линеаменты; 7 – позднечетвертичные впадины; 8 – оси водоразделов

обычно аномально расширены (по сравнению с долинами других простираний), а в поперечном профиле чаще бывают симметричными и корытообразными. Обычна группировка множества таких расширенных субпараллельных долин в «рои», указывающие на распределение одних и тех же растягивающих напряжений на широкой площади. Характерный пример – осевая зона Окско-Донского меридионального новейшего прогиба с долинами рек Битюг, Савала, Токай, Цна и др. (рис. 1). Субмеридиональное простирание самих рек и их вытянутого роя увязывается здесь и с другими (структурно-геологическими) признаками субширотного растяжения в рассматриваемом прогибе (Копп, 2004; Копп и др., 2000).

Вторую группу рисунков гидросети, связанных с растяжением, составляют также в целом прямолинейные и группирующиеся в рои (параллельного внутреннего строения) долины, однако они принципиально отличаются от долин первого вида непрямой резкой асимметрией в поперечном сечении. При этом асимметричны и сопряженные с долинами водоразделы. В итоге возникает пилообразный топографический профиль с одинаковой (например, восточной на западном борту Окско-Донского прогиба) экспозицией крутых склонов. С одного края такие долины сопровождаются эрозионными уступами с часто обнаженным цоколем коренных пород и со слабо развитыми и оползающими террасами, а с противоположного – расширенным ложем и хорошо развитой серией аккумулятивных и цокольных террас. Группы дробно чередующихся долин и водораздельных гряд, с общим знаком поперечной асимметрии, напоминают домены субпараллельных наклонных блоков в рифтовых областях, где такая асимметрия вызывается общим скашиванием (деформацией простого сдвига) структур в вертикальной плоскости, сопряженным с растяжением. В рифтах это бывает вызвано или направленным в одну сторону региональным движением масс фундамента, или действием гравитации, усиливающейся на склонах рифтовых грабенов. В рассматриваемом районе группы типичных морфоструктур такого рода, похожих на системы рифтовых наклонных блоков, развиты в пределах западного борта Окско-Донского прогиба (меридиональные долины Верхнего Дона, Воронежа и др.), где поперечное к ним субширотное растяжение доказано и мезоструктурными наблюдениями (Копп, 2004; Копп и др., 2000). Системы таких же морфоструктур, но только уже субширотного простирания, встречаются и на северном борту Прикаспийской синеклизы (долины рек Самарки, Бузулука, Кинели и пр.). В геологической структуре этот борт также был сформирован при участии поперечного к нему новейшего растяжения (Копп, 2004).

Наконец, к особой третьей категории морфоструктур предполагаемого растяжения принадлежат крупные тектоно-денудационные (эрозионные и

абразионные) уступы типа упомянутого выше Ергенинского, по всей длине изогнутые в виде правильных дуг (рис. 2). При этом экспозиция и вогнутость этих геоморфологических амфитеатров обращены по уклону рельефа. По этим признакам данные амфитеатры напоминают стенки отрыва цирковых оползней, но их колоссальные размеры (до нескольких сотен километров) полностью исключают возможность их отнесения к обычным экзогенным оползням (подробнее см. в (Копп, 2011)). С другой стороны, именно такие размеры характерны для дугообразных сбросов, часто встречающихся в рифтах, и, со всеми сделанными выше оговорками относительно редкой встречаемости разрывов на платформе, это позволяет прийти к выводу о том, что в рассматриваемых нами условиях такие геоморфологические амфитеатры являются индикаторами зон релаксации сбросовых растягивающих напряжений.

Поскольку при растяжении могут возникать как прямолинейные, так и дугообразные разрывы, возникновение и условия пространственного обособления тех и других требуют своего объяснения. В литературе рассматривались разные модели: осложнение обстановки растяжения сдвиговой деформацией, концентрирующейся на окончаниях дугообразных разрывов (Rosendahl, 1987), или, уже без участия сдвигов, первичное искривление траекторий растягивающих напряжений после начального возникновения разрыва (Гзовский, 1953; McGill et al., 1979). Согласованная точка зрения на этот счет отсутствует, однако имеются факты, позволяющие предположить наличие более общей причины возникновения дугообразного изгиба (Копп, 2004, 2011, 2017; McGill et al., 1979): осложнение горизонтального растяжения однонаправленным движением масс, либо — что в конечном итоге то же самое — возникновение самого растяжения в результате такого движения. В таком случае дугообразные линейные структуры растяжения обращены вогнутой стороной в сторону общего движения, и это может быть использовано при кинематическом анализе региональных тектонических обстановок (Копп, 2017).

В пределах рассматриваемой платформенной территории дугообразные амфитеатры распространены широко, но самые крупные их ареалы приурочены к границам антеклиз и соседних синеклиз, особенно если на эти границы наложены крупные новейшие прогибы: Западно-Прикаспийский и Волжско-Ветлужский. В заключительных разделах мы назовем возможные причины их такой приуроченности.

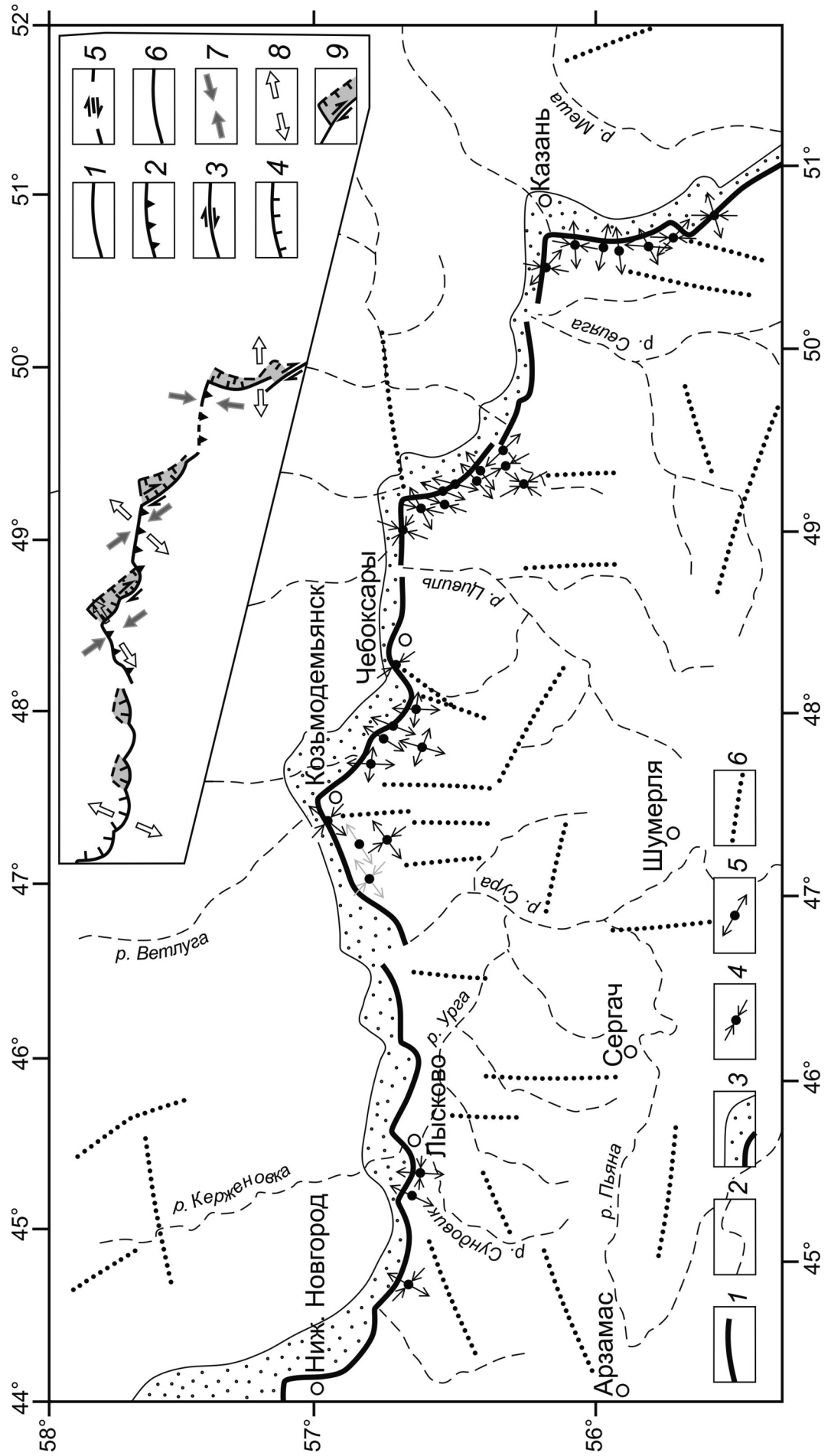
Признаки обстановки горизонтального сдвига. Доказанные геологическими данными сдвиги единичны в рассматриваемой платформенной области, но, судя по многим особенностям структурного рисунка платформенного чехла (частое проявление кулисности в расположении валов, резкие искривления их осевых линий, сопровождающиеся

изменением знака поперечной асимметрии — своего рода «вергентностью»), можно полагать, что сдвигов на глубине должно быть гораздо больше.

В строении долин сдвиговая деформация часто проявляется в кулисной ступенчатости их отрезков (рис. 3), которая по направлению «занозистости» помогает определить знак сдвига: лево- или правосторонний. На сочленениях кулис вдоль зоны предполагаемого по рельефу сдвига в ряде мест встречаются ритмично расположенные расширения долины, напоминающие впадины “pull apart” (рис. 3). Яркие примеры кулисности долин и связанных с ней пулл-апартовых расширений показывают долины таких крупных рек, как Северский Донец, Дон в его среднем течении (между Воронежем и Лискамаи), Вятка в нижнем течении.

Еще один способ установить проявление сдвиговой деформации и при этом уверенно определить ее знак предоставляют наблюдения рисунков разветвления рек: некоторые из них напоминают характерное расщепление магистрального сдвига (так называемый сдвиговый веер). Одним из авторов показано, что конкретный знак изгиба оперяющих ветвей затухающего сдвига зависит от их принадлежности к квадранту сжатия либо растяжения (в соседних крыльях противоположен), но в обоих случаях эти ветви плавно выгибаются по ходу смещения соответствующего крыла магистрального сдвига (рис. 4); подробнее см. в (Копп, 1997, рис. 42–44 и объяснения к ним). На рассматриваемой территории подобные веера угадываются в разветвлениях многих долин, но особенно эффективный сдвиговый веер демонстрируют истоки р. Урал (Илек, Сакмара и др.). Выраженная таким способом региональная неотектоническая левосдвиговая деформация, сосредоточенная в узкой широтной зоне вдоль всего северного края Прикаспийской синеклизы, наглядно проявляется и в структуре платформенного чехла образованием серии субмеридиональных валов, компенсирующих сжатием общее смещение масс к востоку в южном крыле субширотного мегасдвига (подробнее см. в (Копп, 2004; Копп и др., 2014б)).

Признаки горизонтального сжатия. В строении гидросети Русской плиты признаки сжатия устанавливаются с наибольшим трудом, несмотря на то, что геологически доказанные новейшие структуры сжатия (складки и взбросо-надвиги) известны давно, а некоторые авторы считают даже, что к глубине надвиговый режим еще и усиливается (что, однако, совсем не бесспорно). Отдельные случаи четкого выражения в рельефе разрывов с надвиговой составляющей, как это имеет место с Жигулевским взбросом (взбросо-сдвигом, на самом деле (Копп, 2004; Копп, Тверитинова, 1999)), следует считать исключительными. Центральная часть этого разрыва резко выражена в рельефе только потому, что прямолинейный обрыв берега Волги в южном крыле разрыва создается крепкими палеозойскими известняками, тектонически кон-



тактирующими с рыхлыми породами юры. Известны также случаи, когда зоны сжатия секутся развивающимися по трещиноватости и сбросам поперечными долинами (например, р. Вятка неоднократно прорезает одноименные дислокации сжатия).

Можно полагать, что такая слабая выразительность надвигов в рельефе хотя бы отчасти вызвана указанной выше причиной – большей стойкостью зон надвигов к эрозии по сравнению с зонами сдвигов и особенно сбросов. Кроме того, следует ожидать, что надвиговая деформация с ее направленным по вертикали растяжением гораздо уже локализована в горизонтальном срезе, нежели широко распространяющаяся в разные стороны по горизонтали сдвиговая (где как сжатие, так и растяжение осуществляются одновременно по двум горизонтальным осям эллипсоида напряжений). Однако вполне вероятно наличие и еще одной, гораздо более фундаментальной причины: коллизионное сжатие в фундаменте платформы проявляется не в надвиговом, а в сдвиговом режиме (Копп и др., 2014а, б). Иначе говоря, надвиговое поле напряжений в сравнении со сдвиговым занимает меньший объем литосферы по вертикали, проявляясь выше.

Вместе с тем сжатие в надвиговом стресс-режиме (или, во всяком случае, меньшее растяжение) все-таки угадывается по некоторым признакам: обязательному присутствию значительной поперечной асимметрии долин, крутизне их высоких склонов, большей сглаженности линий эрозионных уступов, а особенно по отсутствию рассмотренных выше дугообразных геоморфологических выемок-амфитеатров, столь характерных для берегов, формирующихся в обстановке растяжения (Копп и др., 2000). Вместо этого, напротив, часто присутствует обратная (в сторону долины) выпуклость локальных дугообразных изгибов берега. Такова, например, геометрия в плане высокого южного берега субширотной долины Дона на южном борту Окско-Донского прогиба (рис. 5), а также на ряде участков южного отрезка долины Вятки: и там, и там наблюдаются гирлянды нависающих над долиной, выпуклых к ней участков крутого берега. Подобная фестончатость с выгибанием drobных сегментов линии надвига к поднадвиговому крылу была замечена и М.В. Гзовским (1953).

Некоторые рекомендации по поводу конкретного использования рассмотренных методических приемов.

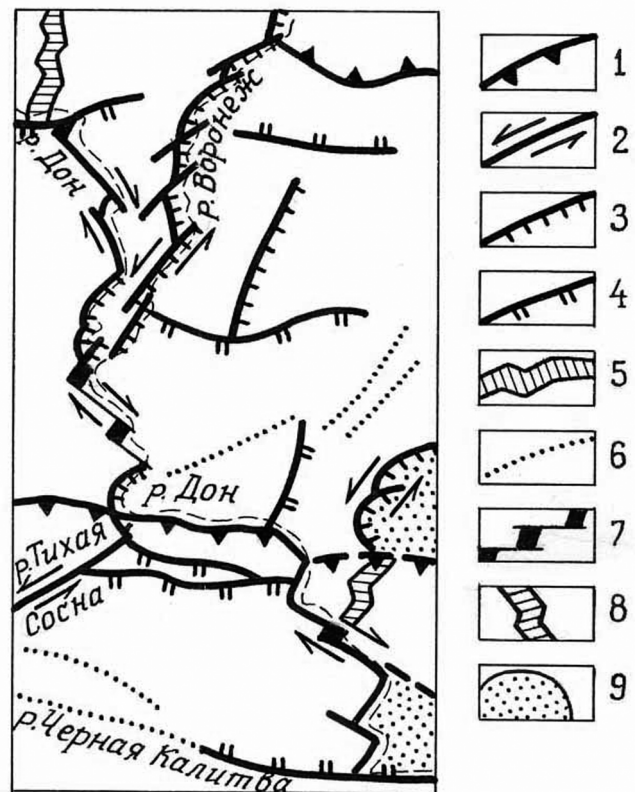


Рис. 3. Новейшие сдвиги в юго-западном углу Окско-Донского новейшего прогиба, схема дешифрирования (Копп, 2004): 1–6 – см. объяснения на рис. 1; 7 – пулл-апартовой (?) природы присдвиговые расширения долин; 8 – участки подпруживания долин поперечными линеаментами; 9 – позднечетвертичные впадины

Охарактеризованные выше главные признаки проявления в рисунке гидросети различных стресс-режимов основаны на реальных свойствах геометрии разрывов соответствующего типа и, как мы уже попытались показать, подтверждаются независимыми методами (ниже это будет рассмотрено подробнее). Однако напомним еще раз, что в данном случае мы имеем дело не с прямыми, а с косвенными признаками проявления напряженного состояния разного вида и что методические процедуры основаны на применении результатов дешифрирования, которое особенно при использовании косвенных признаков бывает субъективным. К сожалению, избежать этого при обращении к такому в общем вполне полезному методу невозможно, поэтому повышается ответствен-

← Рис 2. Огромного (десятки-первые сотни километров) размера округлые выемки-амфитеатры крутого правого борта долины Волги между Нижним Новгородом и Казанью, их кинематическая интерпретация (Копп и др., 2014б). На врезке – уступ Волги как зона правосдвиговой трансформации, состоящая из парагенетически сопряженных трещин и малоамплитудных разрывов разной кинематики: 1 – уступ высокого правого берега Волги; 2 – крупнейшие притоки Волги; 3 – нижний (пойма и 1-я терраса) этаж долины Волги; 4, 5 – точки мезоструктурных наблюдений и горизонтальные проекции осей деформации (черные – установленные по замерам в породах перми, серые – то же, в плиоцен-нижнечетвертичных породах); кинематика осей: 4 – укорочение, 5 – удлинение; 6 – некоторые линеаменты. Условные обозначения к врезке: 1 – южный борт долины, представленный в виде зоны концентрации новейших малоамплитудных нарушений; 2–4 – кинематика нарушений, установленная по результатам мезотектонических замеров, дополненных анализом геометрии линии уступа: 2 – взброс, 3 – сдвиг, 4 – сброс или отрыв; 5 – кинематика определена предположительно; 6 – нарушения неустановленной кинематики; 7, 8 – обобщенные горизонтальные проекции осей деформации: 7 – укорочения, 8 – удлинения; 9 – позднечетвертичные впадины пулл-апартовой (?) природы

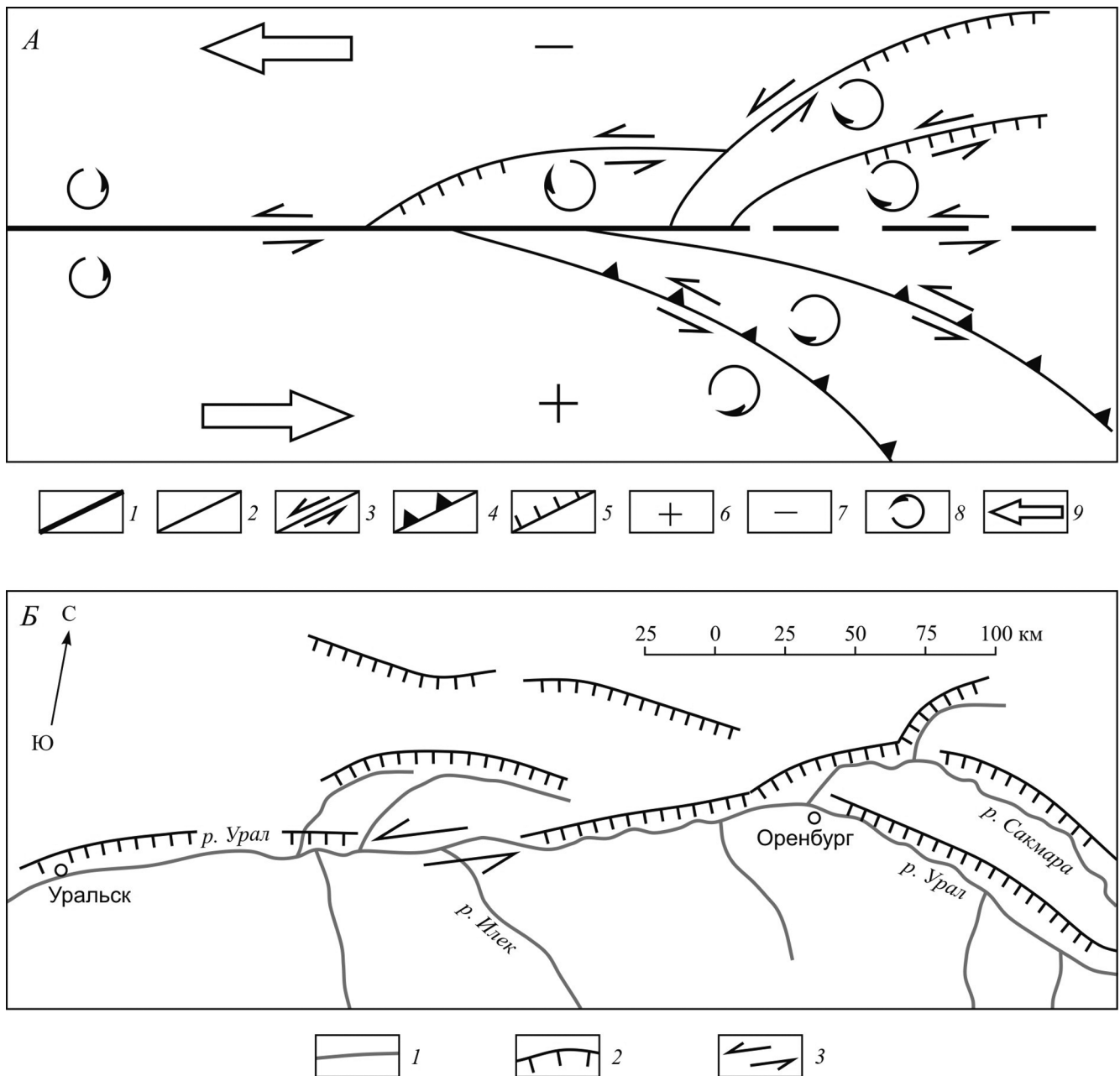


Рис. 4. Рисунок разветвления долин как один из индикаторов сдвига. А – структурный рисунок области веерообразного расщепления сдвига (принципиальная схема, план) (Копп, 1997). Ветви веера дугообразно изогнуты, но в разных крыльях сдвига – в противоположные стороны по отношению к его линии: выпуклость изгиба направлена по смещению его соответствующего крыла – более подробное объяснение см. в работе (Копп, 1997, с. 105–108). 1 – разрывы 1-го порядка; 2 – разрывы 2-го порядка; 3 – сдвиги; 4 – надвиги (вершины треугольников – по падению сместителей); 5 – сбросы (бергштрихи – по падению сместителей); 6 – квадрант сжатия; 7 – квадрант растяжения; 8 – направление поворота блоков вокруг вертикальной оси; 9 – направление смещения крыла основного сдвига. Б – разветвление притоков р. Урал и субширотный левый сдвиг вдоль ее долины, выраженный в структурных признаках и одновременно угадывающийся в разных направлениях выпуклости дугообразных левых и правых притоков р. Урал (Копп и др., 2014б): 1 – реки; 2 – эрозионно-тектонические уступы (бергштрихи – по экспозиции уступа); 3 – направление сдвига

ность за соблюдение известной корректности при оценке его результатов.

Необходимо учитывать следующее: 1) хотя рисунки гидросети позволяют определить участки разгрузки напряжений того или иного знака и простирания, а также на этой основе аргументированно прогнозировать возможность присутствия структур соответствующего кинематического типа (пусть хотя бы малоамплитудных), не следует ориентиро-

ваться на обязательное обнаружение неизвестных ранее, выраженных на поверхности протяженных разрывов значительной амплитуды; 2) при использовании (кроме имеющих определенное простирание зон релаксации напряжений разного знака) более сложных рисунков таких зон, где могут сочетаться элементы разного простирания и кинематики, необходимо иметь в виду, что если остается неохарактеризованным кинематический знак част-

ных элементов, составляющих сложные и пусть даже предположительно согласованные геометрические рисунки, последние могут оказаться конвергентными и, соответственно, могут интерпретироваться неоднозначно. Густота и протяженность долин зависят от характера климата, а их местоположение и простирание часто определяются топографией местности, а не только влиянием тектонических напряжений, и если перечислять только геологические условия формирования рисунка гидросети, то можно назвать литологию пород, планетарную трещиноватость и разного рода сопутствующие экзогенные процессы. Поэтому особое значение для геодинамического и структурно-кинематического анализа приобретает обоснование кинематического знака если не всех, то хотя бы главных элементов интегрального рисунка. И только если такие реальные данные для частных элементов находятся и при этом складываются в единый, кинематически согласованный ансамбль, то это как раз и будет наиболее убедительным вариантом, в свою очередь позволяющим дополнительно проверить кинематику и самих частных элементов рисунка; 3) необходимо соблюдать универсальный принцип проверяемости результатов работы, для чего в этом случае следует хотя бы показывать саму исходную основу дешифрирования – цифровую модель DEM, космический снимок, открытую топографическую карту и т.п. При этом лучше всего оригинальную, первоначальную (не нагруженную дополнительными знаками автором интерпретации) основу, поместив ее рядом со схемой дешифрирования; 4) наиболее убедительна интерпретация, когда она подкреплена данными независимых структурных наблюдений.

Таковы рекомендуемые нами основные принципы методики структурно-кинематического анализа рисунков гидросети для восстановления новейших напряжений платформ, а более подробно ее детали и примеры применения освещены в предыдущих работах (Копп, 2004, 2011; Копп и др., 2000, 2014б). Здесь же мы делаем основной акцент именно на сопоставлении результатов ее применения с другими данными о новейшем напряженном состоянии востока Русской плиты.

Новейшее поле напряжений востока Русской плиты по структурно-геологическим данным

Рассматриваемая часть Русской плиты в кайнозойе подверглась деформациям, которые в настоящее время большинством исследователей связываются с теми или иными перестройками системы литосферных плит. Наиболее древние (ларамийские) движения, произошедшие между концом мела и средним эоценом (Донбасс, Приазовье, некоторые участки в Прибалтике), чаще всего связываются с коллизией Апулийского субконтинента с западноевропейской частью Лавразии. Однако массовые деформации именно Восточно-Европейской

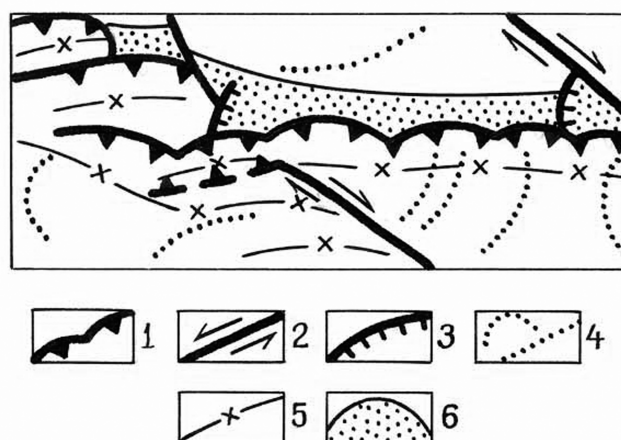


Рис. 5. Признаки поперечного сжатия в строении высокого левого борта долины среднего Дона в районе Вешенской, схема дешифрирования (Копп, 2004): 1–3 – см. объяснения на рис. 1; 4 – линейменты и кольцевые структуры; 5 – оси линейных водоразделов; 6 – позднечетвертичная впадина (участок долины среднего Дона в районе Вешенской)

платформы в целом, определившие ее современную структуру и рельеф, начались лишь в конце эоцена – олигоцене, и по времени они уверенно коррелируются с коллизиями Индийской и Аравийской литосферных плит с Евразийской. Таким образом, восточная часть Русской плиты подвергалась давлению с юга и востока, и это сказалось на простирании ее новейших структур, местами образующих перекрестный структурный план (рис. 6). При этом, судя по указанным особенностям структурного рисунка и отчасти по мезоструктурным данным, зону динамического воздействия Кавказа на севере можно уверенно проследить только до широт Самары (Жигулевских и Сурско-Мокшинских дислокаций), тогда как непосредственно к северу зона влияния Уральского орогена пространственно перекрывала область «кавказского» давления, распространяясь далеко на запад до меридиана Нижнего Новгорода (Окско-Цнинский меридиональный вал). Сложность соотношений этих двух зон динамического влияния дополнительно усиливается из-за различий в интенсивности их воздействия и возрасте образуемых структур (Копп, 2004, 2005). Новейший Урал начал поставлять осадки уже в конце эоцена, тогда как Большой Кавказ вошел в конденудационную стадию развития только в среднем миоцене, а в конэрозионную – не ранее конца позднего миоцена (Копп, 2004, 2005). При этом в плиоцен-четвертичное время оба орогена почти одинаково активно воздымались (Кавказ сильнее), но их относительные вклады в горизонтальное давление, а соответственно, и участие в новейшем структурообразовании на платформе не выяснены.

Можно полагать, таким образом, что использование охарактеризованных выше приемов определения ориентации напряжений по особенностям рисунка гидросети, с ее известным плиоцен-чет-

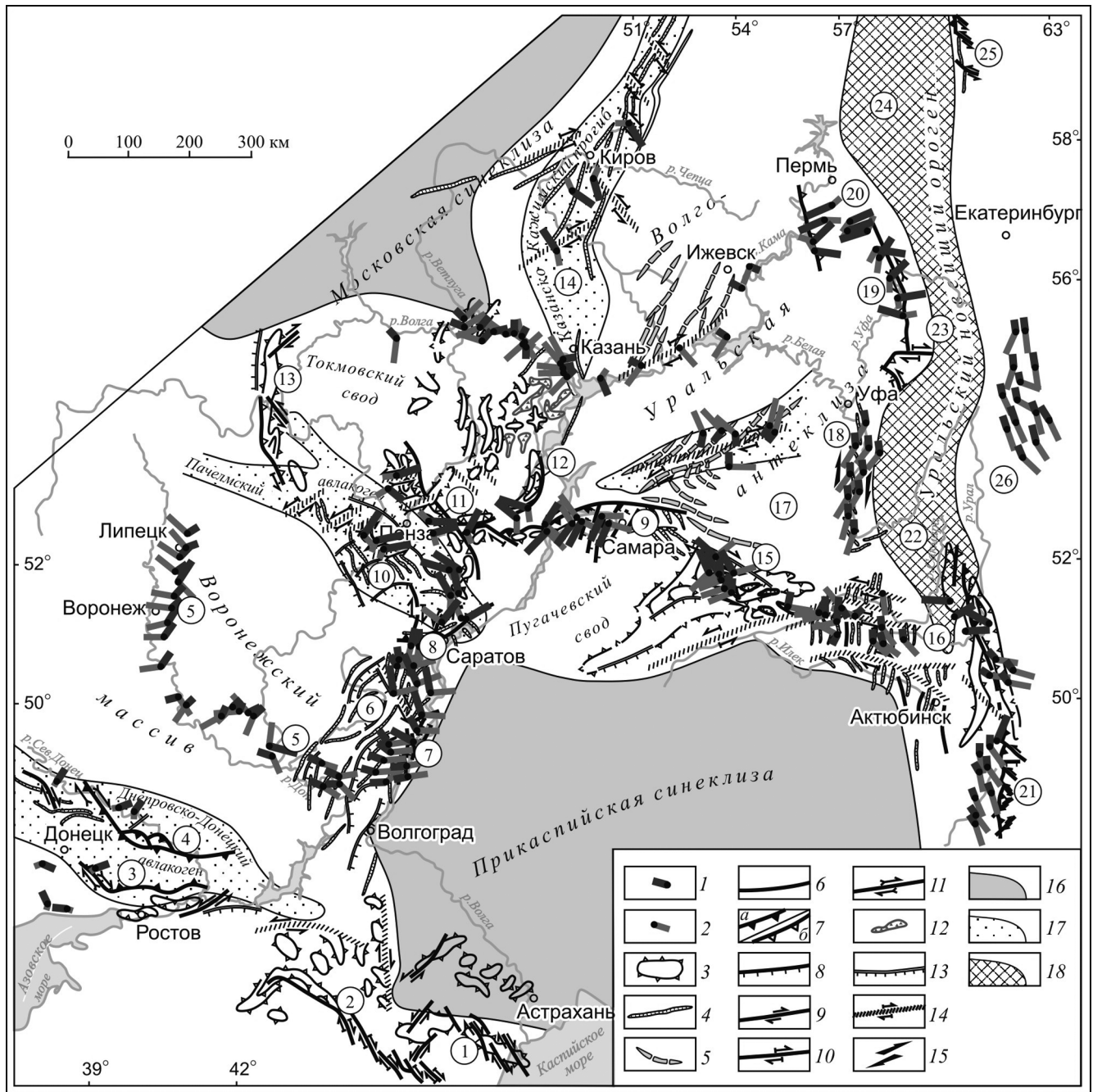


Рис. 6. Схематическая карта новейших структур и напряжений востока Русской плиты и Урала (Копп и др., 2014б): 1, 2 – горизонтальные проекции главных нормальных осей эллипсоида напряжений (компьютерная реконструкция по данным мезоструктурных наблюдений). Наклоны осей к горизонту направлены от точки в центре символа, величина наклона обратно пропорциональна длине штриха: 1 – ось сжатия, 2 – ось растяжения; 3–16 – новейшие макроструктуры: 3–5 – пликативные: 3 – обширные валы и брахиморфные поднятия, 4 – оси линейных валов и антиклиналей, 5 – валы предположительно новейшего возраста; 6–14 – дизъюнктивные (в том числе флексуры): 6–11 – откартированные разрывы: 6 – неустановленной кинематики, 7 – взбросы и надвиги (а – установленные, б – предполагаемые по мезоструктурным данным), 8 – сбросы; 9–11 – сдвиги, с кинематикой: 9 – по смещениям структур, 10 – предполагаемой по особенностям структурного рисунка, 11 – то же, с подтверждением по мезоструктурным данным; 12 – зоны мелких надвиговых деформаций; 13, 14 – флексуры: 13 – вертикальные (штрихи – по падению смыкающего крыла), 14 – горизонтальные, с кинематикой сдвига, предполагаемой по структурному рисунку; 15 – выделенные по знаку кулисности зоны сдвига; 16–18 – элементы тектонического районирования: 16 – синеклизы, 17 – авлакогены, 18 – Уральский новейший внутриплитный ороген. Упоминаемые в тексте новейшие структуры (цифры в кружках): 1 – Промышленно-Цубукский вал, 2 – Сальско-Манычский вал, 3 – Персиановский взброс, 4 – Северодонецкий взброс, 5 – уступ южного борта Окско-Донского новейшего прогиба, 6 – Доно-Медведицкие дислокации, 7 – Балыклейские грабены, 8 – Саратовские дислокации, 9 – Жигулевские дислокации и одноименный взброс, 10 – Керенско-Чембарские дислокации, 11 – Сурско-Мокшинские дислокации, 12 – Борлинский вал, 13 – Окско-Цнинский вал, 14 – Вятские дислокации, 15 – новейший свод Общего Сырта, 16 – присдвиговые складчатые дислокации востока Общего Сырта, 17 – Бугульминско-Белебеевское поднятие, 18 – Бельские дислокации Предуральского прогиба, 19 – Уфимское новейшее поднятие и Суксунский разрыв, 20 – Тулвинское поднятие; 21–24 – Уральский новейший внутриплитный ороген, сегменты: 21 – Мугоджарский, 22 – Южноуральский, 23 – Среднеуральский, 24 – Североуральский; 25 – Лозьвинские дислокации; 26 – Зауральская новейшая структурная терраса

вертикальным возрастом, позволит прояснить эти вопросы. Другую область применения данного подхода мы видим в установлении неизученного влияния, которое оказывали на суммарное напряженное состояние платформы древние неоднородности ее литосферы: антеклизы и соседние синеклизы. Известно, что эти неоднородности проявились в противоположных режимах вертикальных новейших движений (активизировалось поднятие прежде всего антеклиз), но влияние этих неоднородностей на горизонтальные движения почти не изучалось. Между тем оно видно уже в разном сопротивлении литосферы коллизионному сжатию и короблению: ему подверглись только чехлы узких авлакогенов, тогда как разделяющие их массивы фундамента вели себя как жесткие включения, «обтекаемые» сжимающими напряжениями и разрушались только посредством растяжения с образованием малоамплитудных сбросов и зон трещиноватости. Именно на этих древних поднятиях коллизионные напряжения гораздо в большей степени участвовали в моделировке рельефа, а зоны релаксации напряжений разного знака ярче всего проявились в строении речных долин образованием линеаментов соответствующей кинематики.

Сопоставление результатов анализа рисунков гидросети со структурно-геологическими данными о новейших напряжениях

Отдешифрированные на цифровых моделях DEM и топокартах масштаба 1:2500 000 элементы гидросети и другие формы рельефа, указывающие на релаксацию позднеплиоцен-четвертичных напряжений разного знака (рис. 7), сопоставлялись нами с картографической моделью поля суммарных (за кайнозой) палеонапряжений, синтезированной на компьютере по данным полевых замеров мезоструктурных кинематических индикаторов (зеркал и борозд скольжения, жил, стилолитов и т.п.) (рис. 6). Кроме того, для реконструкции суммарных палеонапряжений использовался анализ региональных структурных рисунков деформированных мезозойско-кайнозойских слоев (Копп, 2004; Копп и др., 2014б). Нагляднее всего результаты дешифрирования и их сопоставление со структурно-геологическими данными иллюстрируются на снабженных топографической основой картах настольного формата в монографии (Копп и др. 2014б); там же приведено и подробное описание. Здесь же мы рассмотрим лишь главные результаты этого сопоставления, опираясь также на данные о характере напряжений, создавших соседние с платформой орогены Кавказа и Урала (Копп, 2005; Расцветаев и др., 2010).

Как оказалось в результате, позднеплиоцен-четвертичные напряжения «по гидросети» лучше всего и на наиболее широком пространстве коррелируются с теми определениями ориентации суммарных деформаций/напряжений кайнозоя, которые соответствуют «кавказскому» типу поля напряже-

ний с субмеридиональным сжатием—субширотным растяжением. Однако степень корреляции снижается по мере удаления от Большого Кавказа к северу.

Так, в районе Донецкого внутриплитного орогена, в его новейшем выражении, и находящихся на его восточном продолжении среднемиоцен-четвертичных Сальско-Маньчского и Промысловско-Цубукского мегавалов каждая из этих крупных структур, прямо выраженных в новейшем рельефе, содержит все элементы структурного ансамбля запада Большого Кавказа: южновергентные складки и надвиги запад-северо-западного простирания, правые сдвиги (ССЗ — ЮЮВ простирания), а также субмеридиональные сбросо-раздвиговые структуры, представленные здесь Ергенинским эрозионно-тектоническим уступом. Эти же элементы присутствуют и в тонких особенностях рисунка гидросети: например, правый сдвиг ССЗ простирания и растяжение ЗСЗ-ВЮВ ощущаются в систематической внутренней кулисности линии долины Северского Донца и в приуроченных к сочленениям кулис пулл-апартовым расширениям северных притоков этой реки. Можно заметить, правда, что в этом случае, поскольку крупные и прямо выраженные в рельефе новейшие структуры сами по себе информативны в отношении создавшего их поля напряжений, анализ рисунков гидросети для тех же целей необязателен и добавляет немного. Однако для Тузловской впадины к югу от Донбасса с ее невыразительной внутренней структурой без использования таких приемов уже не обойтись. Например, по присутствию системы мелких дугообразно изогнутых балок меридионального простирания устанавливается участие в ее формировании продольного (широтного) растяжения, а направление вогнутости этих дуг указывает на то, что материал при растяжении симметрично удалялся в обе стороны от поперечной меридиональной кульминации новейшего поднятия Донбасса: на западе — к Азово-Кубанской впадине, а на востоке — к западному краю Прикаспийской синеклизы.

Воронежский массив к северу от Донбасса — обширная область с уже почти сплошным горизонтальным залеганием слоев. Определить характер поля напряжений по морфологии и простиранию крупных структур уже невозможно, но зато именно здесь как раз предоставляется возможность проверить пригодность использования для этой цели структурно-кинематического анализа рисунков гидросети, который здесь, таким образом, уже почти незаменим (если не считать никак не связанных с изучением новейшего рельефа мезоструктурных наблюдений в породах платформенного чехла). Высокая эффективность для этой территории комплексного применения обоих методов — мезо- и морфоструктурного — нами уже была продемонстрирована (Копп, 2004; Копп и др., 2000), и оба они (независимо один от другого) показали перво-степенное участие «кавказского» типа поля напряже-

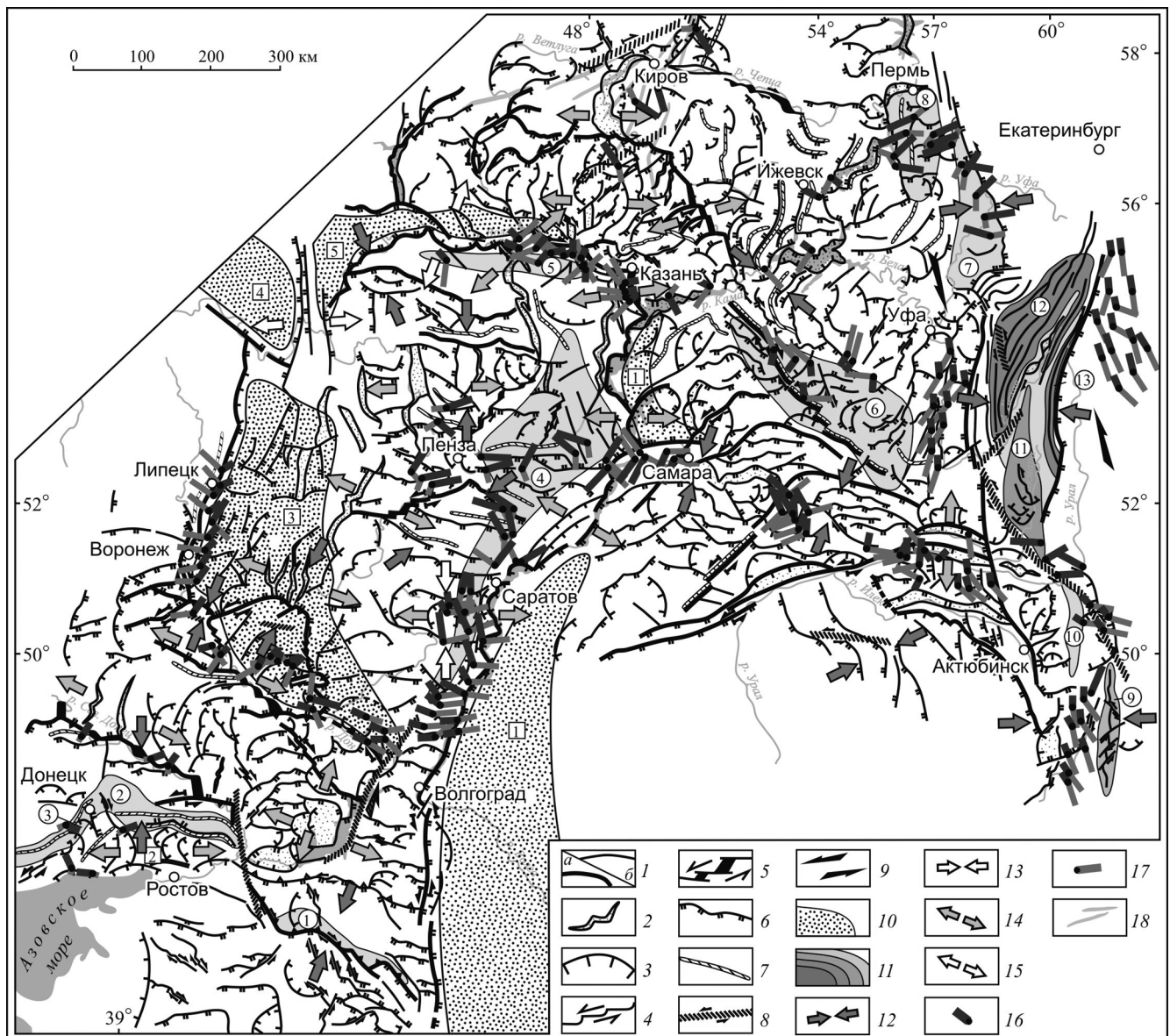


Рис. 7. Плиоцен-четвертичные напряжения востока Русской плиты и Урала, по данным структурно-кинематического анализа рисунков гидросети (Копп и др., 2014б): 1–6 – элементы гидросети с признаками горизонтальных смещений: 1 – элементы первого порядка (а), остальные (б), 2 – anomalно расширенные и часто зигзагообразные в плане долины, указывающие на раздвиговый тип смещения, 3 – правильно дугообразные неотектонические уступы, вогнутые к соседней депрессии рельефа и указывающие на сбросовый тип смещения; штрихи – по погружению стенки уступа, 4 – кулисные сочленения участков долин, указывающие на сдвиг, 5 – кулисные расширения долин – возможные структуры типа pull apart в зоне сдвига, 6 – прямолинейные в плане, синусоидально изогнутые или выпуклые к соседней депрессии неотектонические уступы, указывающие на предположительно взбросовый тип смещения, двойные штрихи – по погружению стенки уступа; 7 – гребни некоторых сильно асимметричных водоразделов; 8 – сдвиговые зоны, выраженные в кулисном расположении элементов гидросети; 9 – то же, с неясными ограничениями; 10, 11 – элементы неотектонического районирования: 10 – новейшие прогибы и участки увеличенной мощности плиоцен-четвертичных отложений (цифры в квадратах): 1 – Заволжский, 2 – Тузловский, 3 – Окско-Донской, 4 – Мещерский, 5 – Волжско-Ветлужский; 11 – новейшие поднятия (цифры в кружках); степень воздымания условно градуирована яркостью тона: 1 – Сальско-Маньчский мегавал, 2, 3 – Донецко-Волновахский мегавал, 3 – его Волновахский отрезок; 4 – Приволжский сложный новейший мегасвод; 5 – Нижегородско-Чебоксарский мегавал (СЗ часть Приволжского мегасвода); 6 – Бугульминско-Белебеевский новейший мегасвод; 7 – Уфимский асимметричный горст; 8 – Тулвинский свод; 9 – Мугоджарский новейший мегавал; 10 – Кокпектинско-Кемпирсайский новейший вал; 11–13 – сложный мегасвод внутриплитного орогена Южного Урала: 11 – древнее ядро, 12, 13 – взброшенные прибортовые блоки: 12 – Ямантауский, 13 – Ирландынский; 12–17 – ориентация векторов нормальных напряжений: 12–15 – по данным анализа рисунков гидросети: 12 – сжатия, 13 – то же, менее уверенно, 14 – растяжения, 15 – то же, менее уверенно; 16, 17 – по результатам компьютерной обработки мезотектонических наблюдений: 16 – сжатия, 17 – растяжения; 18 – оси валов некоторых складчатых дислокаций

жений в новейшей деформации Воронежского массива.

При этом если применение первого подхода было понятным образом ограничено узкой приурочен-

ностью серии представительных обнажений верхнего мела к обрывам рек на южном борту Окско-Донского новейшего прогиба, то второй подход благодаря независимости от степени обнаженности

и возможности рассматривать большие пространства под общим углом зрения подтвердил гораздо более широкое, по сути, непрерывное распространение этого поля на всей территории уже не только собственно Воронежского массива, но и в пределах Пачелмского авлакогена и Токмовского свода, а также зоны сочленения этих структур с Прикаспийской синеклизой.

Кроме того, анализ гидросети обнаружил и некоторые систематические изменения этого поля, затронувшие, однако, только конкретные формы его реализации: например, смену преобладающего на юге, около Кавказа, правого сдвига СЗ-ССЗ простирания доминирующим левым, СВ-широтного простирания, а определяемое по вогнутости дугообразных уступов, образовавшихся при растяжении, симметричное удаление масс к западу и востоку здесь уступило место целиком восточному, направленному уже только к Прикаспийской синеклизе. И еще одно важное отличие: в пределах Воронежского массива в рисунке гидросети гораздо ярче, чем на юге (по сравнению со сдвигом), подчеркнута горизонтальное растяжение — здесь, как и около Кавказа, — субширотное. В таком случае это можно связывать со следующими причинами: меньшим сжатием в связи с гораздо большей удаленностью от Кавказского орогена, присутствием наложенного на Воронежский массив Окско-Донского новейшего прогиба, образовавшегося при растяжении, и, наконец, с самой общей из них — жесткостью литосферы массива, ограничивающей действие сколько-нибудь заметного сжатия. При этом преобладающее растяжение остается субширотным (до СЗ) — подтверждающим, что давление Кавказского орогена достигало и этих мест.

В порядке сопоставления необходимо отметить также, что четко устанавливаемое по особенностям гидросети возрастание к северу роли левосдвиговой деформации совпадает с особенностями структуры наложенных на Воронежский массив и Токмовский свод зон складчатых дислокаций, приуроченных к авлакогенам: Саратовских, Жигулевских, Керенско-Чембарских и Сурско-Мокшинских (Копп, 2004; Копп и др., 2014б). Левые сдвиги СВ-широтного простирания образуют парагенез с образовавшимися при сжатии валами СЗ-ССЗ простирания и связанными с растяжением ступенчатыми флексурами ЮВ экспозиции. Этот левосдвиговой парагенез протягивается также далеко на восток вдоль всего северного борта Прикаспийской синеклизы, где он особенно повлиял на рисунок всех крупных долин бассейна р. Урал (рис. 4).

Взятый в целом, этот левосдвиговой парагенез, устанавливаемый разными способами и на широком пространстве, указывает на общее перемещение материала от Воронежского массива к востоку — к Прикаспийской синеклизе. Оно в любом случае должно было происходить за счет латерального выжимания материала из области повышенного

сопротивления кавказскому давлению, которое создавала жесткая литосфера Воронежского массива, к ближайшему геодинамическому убежищу — Прикаспийской синеклизе, однако дополнительно могло ускоряться и за счет действия силы тяжести (Копп и др., 2014б, 2016).

Таким образом, на обширной территории от Кавказа и Донбасса до Воронежского массива и Прикаспийской синеклизы включительно наблюдается действие «кавказского» поля напряжений. При этом очевидно и принципиальное согласие его определений всеми разными методами: макро-, мезо- и морфоструктурным (под последним имеется в виду структурно-кинематический анализ рисунков гидросети).

Однако далее к северу, начиная от северного погружения Токмовского свода и особенно в пределах Северо-Татарского и Котельнического сводов Волжско-Камской антеклизы вместе с прилегающими районами Московской синеклизы, ситуация резко меняется: структурный план слоев чехла и кровли фундамента уже резко противоречит определениям, сделанным вторым и особенно первым из этих методов — макроструктурным. Связано это с тем, что структурный план здесь формировался под динамическим влиянием Урала с его широтным сжатием, обусловившим субмеридиональную ориентировку валообразных структур. Две группы таких меридиональных валов, принадлежащих соответственно Окско-Цнинскому и Вятскому мегавалам, своими южными окончаниями заходят непосредственно на Токмовский свод (рис. 6). Что же касается данных, полученных третьим методом — анализом гидросети, то они твердо фиксируют влияние «кавказского» типа поля напряжений, ошущающееся в систематических расширениях меридиональных отрезков долин крупных рек, в том числе Волги, выше Нижнего Новгорода, а также Велуги в ее верховьях, Вятки ниже Кирова и многих других. Еще более наглядно это поле проявляется в правом сдвиге СЗ простирания вдоль долины Вятки в ее нижнем течении, который выражен в ее отчетливой кулисности (причем к сочленениям кулис приурочены пулл-апартовые расширения долины и образующие регулярную сеть линейные СВ простирания с признаками левосдвиговых смещений (рис. 7)). Кроме того, влияние «кавказского» поля напряжений видно в субширотном плане плиоцен-четвертичных поднятий и впадин внутри Вятско-Камского новейшего свода, наложенных на меридиональные валы Вятских дислокаций (Копп, 2012).

Соответственно, имеет место наложение на меридиональные валы Вятских и Окско-Цнинских дислокаций плиоцен-четвертичного поля напряжений, выраженного в рисунке гидросети, и это позволяет определить верхний предел возраста этих структур как рубеж позднего миоцена—плиоцена. Нижний же предел разными авторами предположительно указывался как эоцен или олигоцен

(ссылки см. в Копп, 2012), что соответствует примерно началу роста новейшего Урала.

Интересно, что такое резкое несовпадение структурных планов макро- и морфоструктур отражается и в противоречивости ориентации суммарных кайнозойских деформаций/напряжений по мезоструктурным данным. Так, для района Вятских дислокаций оказалось, что ярче всего проявляется не сжатие поперек валов (как это следовало бы ожидать в соответствии со структурным планом), а, напротив, растяжение (субширотной — «кавказской» — ориентации). Вместе с тем компьютерная генерализация обнаружила, что на определенном уровне осреднения данных значительно возрастает надвиговая составляющая поля напряжений поперек валов (Копп, 2012; Копп и др., 2014а, б). Таким образом, режим сжатия оказывается здесь попросту более региональным и, соответственно, предположительно более глубинным. В другой серии обнажений, приуроченной к обрывам правого берега Волги между Волгоградом и Чебоксарами, намечается направленный к северо-западу постепенный разворот оси сжатия от меридиональной до ЗСЗ ориентировки (Копп, 2011) (рис. 2, Б). При этом постепенное приближение этой оси к широтному («уральскому») направлению сопровождается и улучшением выраженности дугообразных амфитеатров в широтной долине Волги, свидетельствующем о возрастании режима субмеридионального растяжения.

Следовательно, в условиях тектонического наложения двух стресс-режимов разного плана мезоструктурные определения ориентации напряжений оказываются ближе к таковым для более молодого из них — в этом случае режима субмеридионального сжатия — субширотного растяжения, установленного по результатам структурно-кинематического анализа рисунка гидросети.

Итак, в целом дальность проникновения к северу давления Большого Кавказа, включая позднэоценов-четвертичный этап, по нашим данным, составляет до 1000 км.

Обращаясь к предгорьям Урала, можно видеть, что субширотное сжатие, генерируемое этим орогеном и в равной степени проявляющееся как в геологических структурах, так и в рисунке гидросети, распространяется на запад в глубь платформы не столь далеко, как в предэоценовое время, — не более, чем на 150–300 км. В рельефе оно особо отчетливо выражено в систематических расширениях широтных отрезков рек Сакмары, Урала, Илека и других в районе Оренбурга и Актюбинска, а также широтных отрезков Белой и Камы между Пермью и Ижевском (здесь оно особенно наглядно подчеркнуто приуроченностью камских водохранилищ к аномально расширенным широтным отрезкам коленчатой в плане долины реки). Примерно на то же расстояние, не более 200 км от Урала, распространяется его давление и по данным изучения крупных линейных геологических структур (только тех из них, которые унаследованно

формировались в конце неогена — квартере). Наиболее ясно оно выражено в Предуральском прогибе и находящихся совсем рядом участках платформы. В Бельской и Кунгурской ячеях прогиба оно представлено соответственно складками слоев миоцена—плиоцена в первой и Суксунским взбросом основания на краю платформы — во второй (Копп, 2005; Копп и др., 2008).

Таким образом, суммируя все вышесказанное, можно сделать вывод, что если на доплиоценовой стадии развития давление Уральского новейшего орогена на Восточно-Европейскую платформу распространялось (во всяком случае, на севере рассматриваемой территории) очень далеко к западу, до меридиана Нижнего Новгорода, то начиная с плиоцена (судя по отражению этого давления в рисунке гидросети и в складчатых деформациях неогена—квартера) новейшее сжатие почти не захватило платформы и орогенез Урала тогда был выражен, по сути, только его вертикальным воздыманием. Если же иметь в виду распространение именно горизонтального сжатия, то главная часть платформы находилась тогда под активным динамическим воздействием только направленного с юга на север давления со стороны Большого Кавказа. Плиоцен-четвертичная эскалация «кавказского» поля горизонтальных напряжений к северу и его наступление на зону динамического влияния Урала прогнозировались нами и ранее (Копп, 2004, 2005), исходя только из общих соображений относительно более позднего начала аравийско-евразийской коллизии по сравнению с индо-евразийской. Однако теперь это можно подтвердить документально, используя впервые обобщенные в настоящей статье данные о кинематике формирования рисунка гидросети.

В обширной области вокруг Прикаспийской синеклизы и одноименной равнины, а также на бортах Московской синеклизы рисунок гидросети определяется ориентацией региональных коллизионных напряжений, действующих вдоль их краев. Интересно, однако, что наряду с этим особенное воздействие на этот рисунок и там, и там оказывает приуроченность к границам антеклиз и синеклиз дугообразных эрозионно-тектонических уступов вроде упомянутого Ергенинского. Наиболее ярко они представлены около Прикаспийской синеклизы, но только на западном и северо-западном бортах последней, удаленных как от Кавказа, так и от Урала и, соответственно, в наибольшей степени свободных от приложенного извне сжатия (Копп, 2017; Копп и др., 2014а, б, 2016). Такая пространственная приуроченность подтверждает констатированное выше по детальным структурно-геологическим данным формирование этих грандиозных геоморфологических амфитеатров при поперечном к ним растяжении (Копп, 2004, 2011; Копп и др., 1999, 2014а, б, 2016). Их концентрическое расположение вокруг антеклиз и синеклиз, с вогнутостью, обращенной к последним, т.е. по уклону тектони-

ческого рельефа (что характерно и для обычных экзогенных цирковых оползней), позволяет предположить, что эти гигантские геоморфологические амфитеатры образовались в результате гравитационно-тектонического (корового масштаба) оползания литосферы антеклиз в направлении соседних синеклиз и особенно к самой глубокой Прикаспийской (подробнее см. в (Копп, 2017; Копп и др., 2016)).

Обсуждение результатов

Изложенный материал показывает, что в условиях обширной платформенной территории востока Русской плиты применение структурно-кинематического анализа рисунка гидросети позволяет восстановить картину поля новейших напряжений, близкую той, которая независимо получена разными и более точными структурно-геологическими методами. Соответственно, приемы этого анализа со всеми указанными выше его преимуществами и ограничениями и с необходимостью использовать его корректно, вполне пригодны для изучения новейшего напряженного состояния платформ (и, во всяком случае, позволяют обоснованно прогнозировать его характеристики). Однако попутно наши исследования выявили ряд требующих обсуждения особенностей этого анализа и его информативности по отношению к геологическим структурам разного масштаба — макро- и мезотектонического.

Так, проведенное нами сопоставление данных разного вида показывает, что поле напряжений «по гидросети» лучше всего коррелируется с результатами замеров мезоструктурных кинематических индикаторов, при этом независимо от того, в какой части территории и в породах какого возраста (внутри платформенного чехла) эти наблюдения проведены, а также с каким источником — от Кавказа или Урала — напряжения предположительно передавались. Мнение о том, что мезоструктурные кинематические индикаторы и особенно зеркала скольжения претерпевали существенную модификацию в последнюю стадию деформации какого-либо региона и, соответственно, характеризуют динамический режим именно этой стадии, неоднократно высказывалось ранее (Гущенко, 1982, 1999 и др.), но оно было основано только на теоретических соображениях. Содержащиеся же в нашей статье данные полностью подтверждают это предположение на материале изучения рисунков современной гидросети Русской плиты, формировавшихся как раз в заключительную — плиоцен-четвертичную — стадию неотектонического этапа.

Однако при переходе к сопоставлению этих данных с простиранием и динамикой формирования крупных новейших структур все оказывается сложнее, и, похоже, в этом случае уже не обойтись без учета местоположения источников стрессов. Так, для сформировавшихся в «кавказском» поле

напряжений валов и складчато-надвиговых дислокаций субширотного простирания (большей частью, на южной половине территории) отмечается наивысшая степень корреляции — сразу всех трех способов определения напряженного состояния: по морфоструктурам («по гидросети»), либо по геологическим структурам — макро- или мезотектонического масштаба. Причем эта область охватывает обширную территорию — от Донбасса на юге до Токмовского свода на севере.

Когда же мы рассматриваем область, расположенную к востоку, северу и северо-востоку от упомянутой, где крупные структуры сжатия, включая взбросы и надвиги, вытянуты меридионально (отчетливо указывая на действие субширотного «уральского» сжатия), узкая полоса доказанного влияния последнего, также с полной корреляцией данных всех трех методов, ограничена Предуральским прогибом и активизированным самым ближним краем платформы. Западнее же, в районе Северо-Татарского, Котельнического и Токмовского сводов меридиональные структуры уральского простирания (Вятские дислокации и Окско-Цнинский вал) недостаточно выражены на поверхности именно как меридиональные структуры (особенно Вятские дислокации), а мезоструктурные данные противоречивы. Зато наблюдается гораздо большее соответствие обоих — мезо- и морфоструктурных — данных субмеридиональным напряжениям сжатия «кавказского» типа поля напряжений. Кроме того, отчетливо видно резкое наложение выраженных в рельефе субширотных новейших (плиоцен-четвертичных) поднятий и впадин на меридиональные валы и прогибы платформенного чехла, образовавшиеся при давлении новейшего Урала.

В совокупности результаты сопоставления определений новейшего напряженного состояния Русской плиты, полученных разными методами, подтверждают формирование ее структуры и рельефа в результате действия стрессов из удаленных источников коллизионного происхождения. При этом более позднее начало жесткой коллизии с Евразией Аравийской плиты (в плиоцене) по сравнению с таковым Индийской (в олигоцене) отражено на платформе в наложении «кавказского» типа поля напряжений на «уральское».

Интересны также и, несомненно, требуют своего обсуждения установленные нами признаки действия другого, автономного, источника напряжений, видимо, более слабого, но зато генерируемого древней (доколлизионной) внутренней структурой плит. Это признаки движения материала от антеклиз к синеклизам, выраженные в особенностях новейшего рельефа и в структурно-геологическом материале. Предположение о некоем влиянии Прикаспийской синеклизы на новейший рельеф востока Восточно-Европейской платформы высказывалось В.И. Макаровым (Новейшая геодинамика..., 2006 и др.), который среди других неотектонических факторов формирования рельефа Русской равнины выделял

так называемую Прикаспийскую геодинамическую систему. Однако в результате наших исследований стало очевидно, что это влияние было выражено происходящим при растяжении гравитационно-тектоническим течением масс к Прикаспийской синеклизе (Копп, 2017; Копп и др., 2016). В пользу действия гравитационного фактора в этом процессе свидетельствуют также разнообразные структурные данные о компенсационном перемещении деформируемого материала в сторону погружения тектонического рельефа (Копп, 2004, 2017; Копп и др., 2014б, 2016).

Заключение

Рисунки современной гидросети востока Русской равнины часто напоминают форму линий тектонических разрывов разного кинематического типа. Однако, поскольку присутствие столь протяженных и многочисленных разрывов здесь не подтверждается геологическими данными, эта особенность может связываться только с проявлением геометрии траекторий новейших палеонапряжений. Последние передаются при вскрытии рекой малоамплитудных дизъюнктивных структур (трещин разгрузки напряжений и мелких разрывов), простирающие и знак смещения которых соответствуют таковым траекторий региональных новейших стрессов в этой области. В соответствии с этими характеристиками напряженного состояния, конкретными для каждого неотектонически нагруженного участка, и осуществляется моделировка эрозией формы берегов долины в плане.

Структурно-кинематический анализ подобных рисунков гидросети позволяет увидеть участки про-

явления всех типов стресс-режима: сжатия, растяжения или сдвига, но наиболее уверенно выделяются два последних. Широкое, по определению, площадное распространение рисунков гидросети позволяет картографировать вариации напряженного состояния и сопоставлять их с региональными новейшими структурами.

Корреляция определений ориентировки напряжений, сделанных по рисунку гидросети, с соответствующими данными, полученными более точными (структурно-геологическими) методами, подтверждает высокую достоверность результатов использования такого подхода, по меньшей мере, для прогноза характера напряженного состояния в территориях, где по каким-либо причинам невозможно применять структурно-геологические методы.

Применение структурно-кинематического анализа рисунков гидросети позволило существенно уточнить ареалы, возраст и местоположение источников новейших напряжений, действовавших на литосферу Восточно-Европейской платформы. Установлено, в частности, что на севере рассматриваемой платформенной области в начале плиоцена произошла эскалация к северу «кавказского» поля с наложением его широкого ареала на более древнее «уральское» поле.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ГИН РАН «Тектоно-седиментационные системы: строение и развитие» (госзадание 0135-2018-0034, руководитель Н.П. Чамов) и при поддержке Программы 6 ОНЗ РАН (руководитель Ю.Г. Леонов). Авторы признательны Ю.А. Воложу, А.И. Кожурину, В.И. Макарову и В.Г. Трифонову, с которыми проводились консультации по разным вопросам в процессе исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Гзовский М.В. Волнистость простираения крупных тектонических разрывов // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1953. № 2. С. 101–115.
- Горелов С.К. О связи неотектонических движений Волго-Уральской области с глубинными структурами типа флексур и разломов // Докл. АН СССР. 1963. Т. 149, № 1. С. 149–151.
- Гущенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения (в связи с прогнозом сейсмической опасности) // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Мат-лы Вес. школы-семинара. Апатиты, 20–22 мая 1980 г. Апатиты, 1982. С. 35–52.
- Гущенко О.И. Кинематический принцип относительной геохронологии палеонапряжений (основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга) // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 515. М.: Наука, 1999. С. 108–125.
- Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизийном поясе // Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 506. М.: Научный мир, 1997. 314 с.
- Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы // Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 552. М.: Наука, 2004. 340 с.
- Копп М.Л. Новейшая деформация Южного Урала и Мугоджар и ее вероятное происхождение // Геотектоника. 2005. № 5. С. 36–61.
- Копп М.Л. Денудационные уступы как индикатор региональных неотектонических напряжений // Геотектоника. 2011. № 5. С. 71–90.
- Копп М.Л. Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре // Геотектоника. 2012. № 6. С. 55–77.
- Копп М.Л. Дугообразные структуры растяжения в кинематическом анализе региональных и глобальных тектонических обстановок // Геотектоника. 2017. № 6. С. 18–36.
- 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., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А. и др. Новейшее поле напряжений востока Русской плиты и Урала (по макро- и мезоструктурным данным) // Геотектоника. 2014а. № 4. С. 23–43.
- Копп М.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А. и др. Кайнозойские напряжения востока Русской плиты, Южного и Среднего Урала: Методические, теоретические и прикладные аспекты // Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 610. М.: ГЕОС, 2014б. 88 с.

Копп М.Л., Егоров Е.Ю., Зарицков А.А. О происхождении Приволжско-Ергенинского уступа // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 1999. № 4. С. 21–37.

Копп М.Л., Иоффе А.И., Егоров Е.Ю. и др. Геодинамика Окско-Донского новейшего прогиба // Общие и региональные вопросы геологии. Динамика формирования, структура, вещественный состав и полезные ископаемые складчатых систем и осадочных бассейнов различной геодинамической позиции / Ред. Г.Н. Савельева, В.Г. Николаев. М.: ГЕОС, 2000. С. 123–179.

Копп М.Л., Колесниченко А.А., Васильев Н.Ю., Мострюков А.О. Гравитационный коллапс Воронежской и Волго-Камской антеклиз Русской плиты («коровые оползни») — по результатам анализа структурной приуроченности и кинематики формирования дугообразных геоморфологических линейментов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. Мат-лы докл. 4-й тектонофизической конференции в ИФЗ РАН / Ред. Ю.Л. Ребецкий. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 89–95.

Копп М.Л., Леонов Ю.Г. Тектоника // Очерки геологии Сирии. Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 519. М.: Наука, 2000. С. 7–104.

Копп М.Л., Тверитинова Т.Ю. Кинематика Жигулевского новейшего разлома // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1999. Т. 74, вып. 5. С. 18–29.

Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере // Тр. Геол. ин-та АН СССР. М.: Наука, 1991. 144 с.

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

Расцветов Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Позднеальпийские дизъюнктивные системы и тектодинамика Западного Кавказа // Физика Земли. 2010. № 5. С. 31–40.

Сим Л.А. Неотектонические поля напряжений Восточно-Европейской плиты и соседних структур. Автореф. дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. М.: Моск. ун-т, 1996. 41 с.

Шатский Н.С. Балыклейский грабен и дислокации южного Поволжья // Вестн. Моск. горн. акад. 1922. Т. 1, № 1. С. 13–43.

McGill E., Stromquist A.W. Grabens of Canyonlands National Park, Utah: Geometry, mechanics, and kinematics // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84, N B9. P. 4547–4563.

Rosendahl B.R. Architecture of continental rifts with special reference to east Africa // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1987. Vol. 15. P. 445–503.

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, N 3/4. P. 161–181.

Сведения об авторах: *Копп Михаил Львович* — докт. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. лаб. сравнительного анализа осадочных бассейнов ГИН РАН, *e-mail:* mlkopp@mail.ru; *Колесниченко Алексей Александрович* — канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. лаб. неотектоники ГИН РАН, *e-mail:* kolesn_al@mail.ru; *Макарова Наталия Валентиновна* — канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail:* makarovanat@yandex.ru