PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2011 VOLUME 2 ISSUE 1 PAGES 68-82



ISSN 2078-502X

THE ANALYSIS OF THE STRAIN STATE OF SHEAR ZONES IN TERMS OF TYPES OF SECONDARY FRACTURES: STATEMENT OF PROBLEM

F. L. Yakovlev

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, 123995, Moscow, Bol'shaya Gruzinskaya street, 10, Russia

Abstract: *Introduction.* In this publication, shear zones, being traditional objects of tectonophysical studies, are considered in terms of their strain states. This approach differs from a commonly applied one when shear zones are studied with consideration of stress fields. The difference of a stress field and a field of strain for a simple shearing has been already noted by the researchers (Figure 1). As is known, secondary fractures in natural shear zones and in experiments do not always correspond to structures which are theoretically predicted by stress field studies. The problem under investigation in this publication is which combinations of secondary structures are possible/impossible in specific emerging strain fields?

Initial concept. The theoretical basis is the well-known scheme of secondary fractures proposed by P. Hancock [*1985*]. His representation of combinations of structures (Figure 2) is arbitrarily compiled: some of the secondary fractures (such as thrusts and normal faults) can not exist simultaneously as this leads to opposite deformation results (Figure 3).

Theoretical consideration of 2D strain in a shear zone. As a priority, all cases of elongation and shortening of the zone are theoretically studied in the constant volume of the zone. In previous studies, the situation was considered with additional compression or tension in the direction perpendicular to the shear zone (Figure 4), but not with elongation or shortening of the shear zone. The analysis of the strain state of the shear zone revealed that development of Riedel shears of R and R' types (which are paired and identical in the stress field of pure shearing) can lead to opposite results in deformation of the zone. Shear cracks of R type cause elongation of the zone and reduction of the zone's width (Figure 5). Shear cracks of R' type can occur with shortening of the zone and increase in its width (Figure 6). Shear cracks of X and P types (which are also paired) demonstrate similar behavior: X cracks occur with lengthening of the zone, while P cracks occur with its shortening. Cracks of Y type, which go parallel to the zone, can be observed in both cases. Influence of increase or reduction of the shear zone's volume on possible combinations of structures, including tension fractures and stylolithic fractures, is also considered. Combinations of secondary fractures revealed by the theoretical studies are tabulated (Table 1); six cases are distinguished with regard to active, possible and impossible structures.

Examples of combinations of secondary fractures in experiments and natural structures. Examples of echelon structures are considered in terms of the strain state of shear zones. In experiments, alternations of domains, wherein shear cracks of R and R' types are developing along shear zone, are interpreted as a combination of domains with elongation and shortening of the medium (along the strike of the zone), while the total length of the zone remains unchanged (Figure 7). It is assumed that variations of widths of zones of influence of faults, that are observed in natural structure, and changes of amplitudes of displacement in seismogenic faults (Figure 8) are related to this phenomenon of alternation of domains wherein shear cracks of R and R' types are developing, i.e. there is a relation to elongation and shortening of such domains of a fault zone. Structures of terminations of large faults of 'horse-tail' and 'fish-bone' types are interpreted as domains wherein shear cracks of R and R' types develop as secondary faults under conditions of lengthening and shortening of the sides of the main fault (Figure 9). It is shown that shatter zones in the basalt detachment of the Vorontsovsky nappe are related to shear cracks of R type; they evidence elongation of the nappe's body (Figure 10). In the scale of the given outcrop, a number of specific combinations of share cracks of P type and tension fractures are reviewed (Figure 11, 12, 13, 14, and 15). Structures with development of shear cracks of X type are specified; these are synthetic faults in the body of the landslide and echeloned normal faults in sides of regional shear faults in petroliferous structures of the Western Siberia (Figure 16).

Theoretical research of zones of simple shearing in a massif which is subject to general deformation of pure shearing. Simple shearing zones, which are located in massifs which are subject to pure shearing, are a target of special theoretical studies. Under such conditions of the massif's deformation, the length of shear zones in the massif will either increase or decrease, depending on orientations of such zones relative to the axis of shortening (Figure 17). Assumptions of possible combinations of secondary fractures in such shear zones are made.

Conclusions. It is established that in a shear zone, cracks of R and R' types can not develop in one domain as they lead to opposite deformation consequences. However, this has not been taken into account when describing shear zones in terms of stress fields. Concerning emerging deformations of a shear zone, it is revealed that cracks of R and X types are paired (in case of zone's elongation), and cracks R' and P types are in the opposite pair (case of zone's shortening). The table of theoretically possible and impossible secondary fractures is compiled for a variety of deformation conditions of a shear zone. The

problem of collecting data on stable combinations of echelon secondary structures, that occur in shear zones, and developing a systematic review of such combinations on the basis of concepts of the strain state of the shear zones is put forward. It is proposed to apply changes of shear zone length in modeling of these structures on equivalent materials.

Key words: shear zones, secondary fractures, pure shearing, simple shearing, Riedel shear, echelon structures, stress fields, strain state.

Recommended by V.A. San'kov 3 March 2011

Citation: *Yakovlev F.L.* The analysis of the strain state of shear zones in terms of types of secondary fractures: statement of problem // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2. № 1. P. 68–82.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОН СДВИГАНИЯ В СВЯЗИ С ТИПАМИ ВТОРИЧНЫХ НАРУШЕНИЙ: ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ф. Л. Яковлев

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

Аннотация: *Введение*. Традиционный объект тектонофизических исследований – зоны сдвигания – рассматривается с точки зрения его деформационного состояния, а не в рамках изучения поля напряжений, как это делается обычно. Разница поля напряжений и поля деформаций при простом сдвигании исследователями отмечалась (рис. 1). Известно, что вторичные нарушения в природных зонах сдвигания и в экспериментах не всегда соответствуют структурам, теоретически предсказанным при изучении полей напряжений. Исследуется вопрос: какие сочетания вторичных структур возможны и какие запрещены в поле определенных возникающих деформаций?

Исходные представления. За теоретическую основу берется известная схема вторичных нарушений П. Ханкока [*Hancock, 1985*]. Эта схема сочетаний структур (рис. 2) носит условный, компилятивный характер: часть вторичных нарушений не может существовать одновременно (взбросы и сбросы, например), поскольку это приводит к противоположным деформационным результатам (рис. 3).

Теоретическое рассмотрение 2D деформаций в зоне сдвигания. В первую очередь теоретически изучаются случаи удлинения и укорочения самой зоны при ее постоянном объеме. Ранее ситуация рассматривалась как дополнительное сжатие или растяжение перпендикулярно к зоне сдвига (рис. 4), но не как ее удлинение и укорочение. При анализе деформированного состояния зон сдвигания было выявлено, что развитие трещин скола R и R' типов, парных и идентичных в поле напряжений чистого сдвига, приводит к противоположным результатам в деформации зоны. Трещины R типа приводят к удлинению зоны и уменьшению ее мощности (рис. 5), трещины R' типа могут возникать при ее укорочении и увеличении ее мощности (рис. 6). Аналогично ведут себя парные трещины X и P типов: X сколы возникают при удлинении, а P сколы – при укорочении зоны. Трещины Y типа, параллельные самой зоне, могут встречаться в обоих случаях. Рассмотрено также влияние увеличения или уменьшения объема зоны сдвигания на возможные сочетания структур, в том числе трещин отрыва и стилолитовых швов. Полученные теоретически сочетания вторичных нарушений сведены в шесть случаев (таблица), с указанием структур активных, разрешенных и запрещенных.

Примеры комбинаций вторичных нарушений в экспериментах и природных структурах. Рассматриваются примеры эшелонированных структур с позиций описания деформированного состояния зон сдвигания. Встречающиеся в экспериментах чередования участков развития сколов R и R' типов интерпретируются как сочетание доменов с удлинением и укорочением среды (вдоль простирания зоны) при сохранении общей длины зоны (рис. 7). Сделано предположение о том, что вариации ширины зоны влияния разлома, наблюдаемые в природных структурах, и изменения амплитуд смещения в сейсмогенных разрывах (рис. 8) имеют отношение к этому явлению – чередованию участков развития сколов R и R' типов, т.е. удлинению и укорочению доменов зоны. Структуры окончания крупных разломов типа «конский хвост» и «елочка» интерпретируются как домены с развитием R и P сколов в условиях удлинения и укорочения бортов разрыва (рис. 9). Показано, что зоны дробления в базальном срыве Воронцовского покрова относятся к сколам R типа и свидетельствуют об удлинении тела покрова (рис. 10). Рассмотрены некоторые конкретные случаи сочетаний P сколов и трещин отрыва в масштабе обнажения (рис. 11–15). Указаны структуры с развитием трещин X типа: синтетические сбросы в теле оползня и эшелонированные сбросы в бортах региональных сдвигов в нефтеносных структура Западной Сибири (рис. 16).

Теоретическое исследование зон простого сдвигания в массиве при общей деформации чистого сдвига. Специально теоретически изучено состояние чистого сдвига в массиве, нарушенном зонами сдвигания. В этих условиях зоны сдвигания при деформировании массива будут удлиняться или укорачиваться в зависимости от их ориентировки к оси укорочения (рис. 17). Сделаны предположения о возможных сочетаниях вторичных нарушений в таких зонах сдвигания.

F.L. Yakovlev: The analysis of the strain state of shear zones...

Выводы. Установлено, что в зоне сдвигания R и R' трещины не могут развиваться в одном домене, поскольку приводят к противоположным деформационным следствиям, что не учитывалось при описании сдвигов в терминах полей напряжений. В отношении возникающих деформаций зоны сдвигания парными являются трещины R и X типов (при ее удлинении) и трещины R' и P типов (встречаются при ее укорочении). Предложена таблица теоретически возможных и запрещенных вторичных нарушений при разных деформационных состояниях зоны сдвигания. Выдвинута задача сбора и систематизации устойчивых сочетаний эшелонированных вторичных структур на основе представления о деформированном состоянии зон сдвигания. Предложено использовать изменение длины зоны сдвигания при моделировании этих структур на эквивалентных материалах.

Ключевые слова: зоны сдвигания, вторичные нарушения, чистый сдвиг, простой сдвиг, сколы Риделя, эшелонированные структуры, поля напряжений, деформационное состояние.

1. Введение. Зоны сдвигания: напряжения и деформации

Зоны сдвигания являются одним из наиболее традиционных объектов исследования в структурной геологии и тектонофизике. Внутренняя структура зон сдвигания, включая развитие трещин второго порядка (если считать основной разлом структурой первого ранга), всегда привлекала пристальное внимание экспериментаторов, поскольку перед полевыми геологами стояла задача - по характерным сочетаниям нескольких типов таких «вторичных» структур выяснить условия формирования всей зоны [Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Борняков, 1980, 1988; Михайлова, 1971, 1989; Шерман и др., 1983; Bokun, 2009]. В полном соответствии с назначением тектонофизики (решение проблем тектоники с использованием законов физики), начиная уже с первых попыток теоретические и экспериментальные исследования опирались на богатые методические ресурсы механики сплошных сред. Теоретические описания напряженного состояния объектов касаются как простых случаев [Стоянов, 1977], так и трехмерных задач [Ребецкий, 1987, 1988]. Поскольку в постановке ряда задач зоны сдвигания справедливо могут рассматриваться как объекты с пренебрежимо малыми деформациями, такое описание представлялось исследователям совершенно корректным. Справедливость подхода подтверждалась согласием между многими параметрами в теоретических (поля напряжений) и экспериментальных моделях. Таким образом, существует традиция подхода к исследованию зон сдвигания с позиций описания полей напряжения, и исключений в колоссальном количестве публикаций, как отечественных, так и зарубежных, почти не встречается. В качестве таковых можно, видимо, упомянуть отдельные задачи, например определение амплитуды смещения в зоне сдвигания по результатам стрейн-анализа в классическом учебнике Дж. Рэмзи [Ramsay, Huber, 1983]. Кроме этого, в последние годы были опубликовано несколько работ под руководством Д.Н. Осокиной, в которых на уровне постановки проблемы рассматриваются возможности совместного анализа распределения напряжений и деформаций в окрестностях отдельного разрыва [*Осокина и др., 2008*]. Надо отметить также, что, несмотря на видимую понятность явления, ряд наблюдаемых особенностей структур зон сдвигания не имел удовлетворительного объяснения в рамках традиционного подхода с позиций описания только полей напряжения. Наиболее известно здесь чередование вдоль экспериментальных структур зон сдвигания участков распространения сколов Риделя R и R' типов (эквивалентных друг другу при описании в терминах поля напряжений, но пространственно разобщенных в данном случае), которое редко встречается в природе, где обычны эшелонированные трещины какого-то одного типа (как правило, R типа).

Настоящая работа посвящена исследованию устойчивых сочетаний вторичных нарушений зон сдвигания с позиций описания в этих зонах полей деформаций. Идея работы появилась при анализе одной из покровных структур Кавказа, в котором использовалось описание и полей деформаций, и полей напряжений [Яковлев и др., 2008]. Исследование характера деформаций этой структуры по мелким складкам указало на ее формирование в условиях субгоризонтального простого сдвигания, а не горизонтального сжатия. Поле напряжений, выявленное по замерам на большой площади, этому выводу не противоречило, но могло отвечать и горизонтальному сжатию. Кроме складок в структуре вблизи зоны базального срыва наблюдались зоны дробления (сами смятые в складки), сопоставимые в первом приближении с обычными трещинами Риделя (R тип). В целях подтверждения ориентировки оси сжатия в этой локальной структуре были внимательно изучены все высококачественные фотографии обнажений со складками, но никаких трещин R' типа, парных к первым, обнаружено не было. Попытка найти объяснение этой асимметрии привела к пониманию, что зоны дробления (трещины R типа) образуются при заметном удлинении тела покрова в условиях гравитационного скольжения, а смещения по трещинам R' типа могли приводить только к укорочению структуры. Разумеется, существенно развиваться мог только один тип такой деформации, что, собственно, и обнаружи-



Рис. 1. Типы деформаций и соотношения напряжение – деформация [*Николя, 1992*]. Стрелками показано положение главных осей напряжений (в европейской индексации, σ_3 – относительное растяжение), эллипсами – деформация исходного круга, вписанного в исходный квадрат. *а* – соосная деформация (чистый сдвиг); *б* – несоосная деформация (простой сдвиг).

Fig. 1. Types of deformations and pressure-deformation ratios [*Николя, 1992*]. Arrow – principal stress axis (in the European indexation, σ_3 – relative tension); ellipse – deformation of the initial circle inscribed in the initial square; *a* – coaxial deformation (pure shear); *b* – deformation with axes misalignment (simple shear).

лось. Это наблюдение показало, что разница в описаниях одних и тех же вторичных нарушений в терминах поля напряжений и в рамках деформированного состояния в условиях простого сдвига (а не чистого!) может быть существенной и что эти методические возможности остались в основном вне сферы внимания исследователей. Подробнее этот пример будет рассмотрен ниже.

Здесь необходимо заметить, что, безусловно, на уровне словесного описания разница между деформациями и напряжениями в ситуации чистого сдвига и простого сдвига исследователями вполне осознавалась. В соответствующих объяснениях обычно приводится информация о том, что при чистом сдвиге главные оси эллипса напряжений и эллипса деформаций всегда совпадают, а для простого сдвига только «короткая» ось относительного сжатия всегда располагается под углом 45° к зоне сдвигания и эллипс деформации совпадает с эллипсом напряжений только в самый первый момент. Указывается, что при простом сдвиге существующий элемент поворота материальных линий в процессе деформирования разворачивает длинную ось эллипса деформаций в сторону ориентировки самой зоны таким образом, что в пределе эллипсоид с бесконечным удлинением будет параллелен этой зоне. Так, А. Николя [1992] в учебнике по структурной геологии и деформациям в горных породах посвятил этому вопросу специальный раздел (рис. 1). На разницу между ориентировками эллипсоида напряжений и эллипсоида деформаций в зоне сдвигания указывал также М.В. Гзовский [1975, стр. 143]. Но, повторим еще раз, исследование зоны сдвигания и развития вторичных нарушений в ней в рамках напряженного состояния чистого сдвига ошибкой не считается, хотя деформационные состояния простого и чистого сдвигов не идентичны. Таким образом, зона сдвигания рассматривается односторонне, некомплексно, только на основе описания эллипсоида напряжений.

2. ИСХОДНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О «ВТОРИЧНЫХ» СТРУКТУРАХ ЗОНЫ СДВИГАНИЯ В РАМКАХ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрим в качестве исходной модели известную схему вторичных нарушений в зоне сдвига П. Ханкока [*Hancock, 1985*]. На этой компилятивной схеме собраны вместе и обозначены все возможные вторичные нарушения для правого простого сдвига (рис. 2). Поле напряжений соответствует чистому сдвигу (точнее – почти чистому) в условиях правостороннего сдвигания в плоскости рисунка, и все вторичные структуры симметричны относительно главных осей этого поля.

Для состояния чистого сдвига средняя ось σ_2 , перпендикулярная плоскости рисунка, является «нулевой» (точнее – имеет среднюю величину от алгебраической суммы максимального (σ_3) и минимального (σ_1) сжимающих напряжений), в этом случае могут быть развиты трещины растяжения *е*, системы вторичных сдвигов R и R'; X и P (две парные системы, с углами скалывания 30° и 60° к оси сжатия), Y (одиночные, магистральные трещины), а также стилолиты St и кливаж S1. Остальные структуры (складки f, надвиги t и сбросы n) могут появиться в том случае, если сжатие по средней оси не соответствует алгебраической разнице максимального и минимального сжатия, т.е. напряжен-



Рис. 2. Вторичные нарушения в зоне сдвигания при анализе поля напряжений и деформационных обстановок; компилятивная диаграмма, иллюстрирующая эшелонированные структуры, характерные для сдвиговой зоны при развитии правого простого сдвига (по [*Hancock, 1985*]), пояснения в тексте.

Fig. 2. Secondary fractures in the shear zone which is subject to analyses of the stress field and the strain state. The consolidated diagram illustrates echelon structures which are typical of the shear zone in case of right-lateral simple shearing (on [*Hancock, 1985*]). Explanations are given in the text.

ное состояние не является чистым сдвигом. Если возникают деформации по средней оси (перпендикулярно плоскости рисунка), то должны развиваться складки f и надвиги t (удлинение по средней оси, рис. 3, *A*) или сбросы n (укорочение, рис. 3, *Б*). Очевидно, что совместное существование двух последних групп вторичных нарушений в общем случае невозможно. Это замечание только подчеркивает, что схема П. Ханкока является сугубо компилятивной, а вопрос о конкретных устойчивых сочетаниях вторичных нарушений, соответствующих этой схеме, в данном случае является открытым.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ 2D ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ СДВИГАНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ КОМБИНАЦИИ ВТОРИЧНЫХ НАРУШЕНИЙ

В качестве самого первого шага рассмотрим теоретически для двумерного случая простого сдвигания



Рис. 3. Схема вторичных нарушений в зоне сдвигания при анализе деформационных обстановок для случая трехмерной деформации: удлинения перпендикулярно плоскости рисунка (*A*) и укорочения перпендикулярно плоскости рисунка (*b*). По степени активности структуры обозначены цветом: синий – активные, красный – запрещенные, зеленый – разрешенные (возможные).

Fig. 3. Secondary fractures in the shear zone (mapped) which is subject to analyses of the strain state in case of 3D deformation. Elongation (*A*) and shortening (*B*) perpendicular to the direction of the drawing plane. Colours show degrees of activity of structure: dark blue – active; green – possible; red – impossible.

деформации удлинения зоны и ее укорочения (или, что то же самое, длины крыла разрыва), а также связанные с этим эффекты уменьшения и увеличения ширины зоны (при постоянстве объема самой зоны). Заметим, что в самом общем виде такой случай ранее рассматривался М.В. Гзовским (рис. 4). Оставаясь в рамках представлений о полях напряжений, М.В. Гзовский отмечал, что пары трещин скалывания оказываются в разных ситуациях, поскольку для простого сдвига существует компонента вращения. Трещины, близкие по ориентировке к перпендикуляру к зоне (R'), быстрее меняют свою ориентацию при сдвигании и будут менее развитыми, в отличие от трещин, ориентированных почти параллельно зоне (R). Как мы видим на рис. 4, интерпретация М.В. Гзовского показывает, что при дополнительном растяжении перпендикулярно зоне сдвигания (угол оси сжатия к зоне меньше 45°, случай «*г*») возникают трещины Р типа (по П. Ханкоку), а при сжатии (случай «д») – R типа. Деформационные следствия этих случаев не рассматривались.

Проанализируем, какие структуры возникают в случаях удлинения зоны сдвигания (уменьшения ее ширины) и ее укорочения (увеличения ее ширины), имея в виду главным образом природные структуры. Воспользуемся обозначениями трещин по П. Ханкоку, в которых угол скалывания в общем случае не равен 45°. Начнем с самого распространенного типа – с трещин Риделя R. При смещении по серии этих трещин будет уменьшаться мощность зоны, что при неизменности объема будет приводить к увеличению ее длины. Такой же эффект должен быть для трещин Х. Эти структуры (R и X) по типу возникающих деформаций явля-



Рис. 4. Вторичные нарушения в зоне сдвигания, в том числе при дополнительном сжатии и растяжении перпендикулярно зоне (по [*Гзовский, 1975*], рис. 31, с. 148): *а* – широко распространенная неправильная схема; *б*–*д* – рекомендуемая схема: *б* – при угле скалывания 45°, *в* – при угле скалывания меньше 45°, *г* – при угле скалывания 45° и дополнительном растяжении, *д* – при угле скалывания 45° и дополнительном сжатии. *1* – шов главного разрыва; *2* – трещины отрыва; *3, 4* – сопряженные трещины скалывания; *5, 6* – оси напряжений σ₁ и σ₃; *7* – условные границы рассматриваемого участка.

Fig. 4. Secondary fractures in the shear zone, including those in case of additional compression and tension perpendicular to the zone (according to [*Гзовский*, *1975*], Figure 31, p. 148). *a* – a common, yet incorrect scheme; $\mathcal{O}_{-\mathcal{A}}$ – recommended scheme. \mathcal{O}_{-} at shear angle 45°; *B* – at shear angle less than 45°; *r* – at shear angle 45° with additional tension; \mathcal{A}_{-} at shear angle 45° with additional compression. *1* – surface of the main fault; *2* – tension fractures; *3*, *4* – conjugated shear cracks; *5*, \mathcal{O}_{-} principal stress axes, σ_1 and σ_3 ; \mathcal{I}_{-} conventional borders of the domain under study.

ются парными (рис. 5).

Трещины Риделя R' являются сопряженными с Rтипом по полю напряжений. Однако в «деформационном» смысле они приводят к увеличению мощности зоны и к ее укорочению. Этими же свойствами обладают трещины P типа. Таким образом, трещины R' и P типов также являются парными в отношении возникающей деформации зоны разрыва (рис. 6).

Трещины У не приводят к изменению длины и ширины зоны, поэтому могут встречаться в обоих случаях. При уменьшении объема образуются стилолитовые швы St (растворение кальцита под давлением), при увеличении – трещины растяжения (переотложение кальцита и кварца в трещинах отрыва). В зависимости от конкретной ситуации в отношении сохранения объема могут встречаться как варианты только стилолитовых швов или только жил по трещинам отрыва, так и некоторая их комбинация. На рисунках 5 и 6, соответственно, эти три типа (Y, St, e) показаны как разрешенные для обоих случаев. Заметим, что для случая удлинения зоны вполне определенно запрещены трещины R' и P типов, И, наоборот, для случаев укорочения зоны запрещены трещины R и X типов. В случаях, если объем зоны не сохраняется, можно ждать некоторых специфических особенностей в сочетаниях структур. Так, при уменьшении ширины зоны (ее удлинении) скорее будут возникать структуры, способствующие уменьшению объема (стилолитовые швы и трещины R типа). И, наоборот, ситуации увеличения ширины зоны более благоприятствует комбинация жил по трещинам отрыва *е* и трещин P типа, чем какие-то другие сочетания. Эти варианты отражены в таблице, которая может быть использована для целей диагностики деформационного состояния зоны сдвигания (для решения обратной задачи). По таблице хорошо видно, что, в отличие от анализа трещин в поле напряжений, дающего в основном только направление смещения, данный вид анализа дает возможность получать несколько параметров.

4. ПРИМЕРЫ ОБЪЯСНЕНИЯ КОМБИНАЦИЙ ВТОРИЧНЫХ НАРУШЕНИЙ С ПОЗИЦИЙ ОПРЕДЕЛЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ СДВИГАНИЯ

4.1. ЧЕРЕДОВАНИЕ УЧАСТКОВ ТРЕЩИН R И R'

В экспериментах по моделированию вторичных трещин в зонах сдвига может возникать чередование участков трещин R и R', что обычно остается без объяснения (рис. 7). Предлагаемый подход позволяет интерпретировать это явление как возникающее чередование участков удлинения и укорочения вдоль

F.L. Yakovlev: The analysis of the strain state of shear zones...

Теоретически возможные сочетания вторичных трещин в зонах сдвигания при плоской деформации для условий изменения длины и объема зоны. Индексация трещин дается по П. Ханкоку [*Hancock, 1985*].

Theoretically possible combinations of secondary features in shearing zones for 2D deformation under conditions of change of zone's length and volume. The legend of crack indexation is according to P.L. Hancock [1985].

	Удлинение зоны (уменьшение ширины)			Укорочение зоны (увеличение ширины)		
степень активности / объем зоны	Уменьшение	Сохраняется	Увеличение	Уменьшение	Сохраняется	Увеличение
активны	R X St	RX	R X e	R' P St	R' P	R'Pe
разрешены	Ye	Y e St	Y St	Ye	Y e St	Y St
запрещены		R' P			RX	

простирания всей зоны (и, соответственно, укорочения и удлинения поперек нее). Вероятно, это следствие того, что возникновение магистральной трещины при развитии процесса должно предваряться накоплением деформаций. Поскольку в условие эксперимента автоматически «включено» общее сохранение длины борта разрыва, среда вынуждена реагировать возникновением локальных неоднородностей с противоположными свойствами (т.е. зон удлинения и укорочения). Возможно, что к этому же явлению имеют отношение многократно описанные в экспериментах и в природных структурах вариации ширины «зоны влияния раз-



Рис. 5. Вторичные нарушения для случая удлинения зоны сдвигания и/или уменьшения ее мощности (по материалам [*Яковлев, 2008*]). Активность структур обозначена цветом, см. рис. 3.

Fig. 5. Secondary fractures in case of shear zone elongation and/or reduction of its width (based on [*Яковлев, 2008*]). The legend of colours is given in Figure 3.



Рис. 6. Вторичные нарушения для случая укорочения зоны сдвигания и/или увеличения ее мощности (по материалам [*Яковлев, 2008*]). Активность структур обозначена цветом, см. рис. 3.

Fig. 6. Secondary fractures in case of shear zone shortening and/or increase of its width (based on [*Яковлев, 2008*]). The legend of colours is given in Figure 3.



Рис. 7. Интерпретация деформационных обстановок ареалов распространения трещин двух типов вдоль зоны сдвигания при эксперименте (по [*Стоянов, 1977*], с изменениями): а – стрелками показаны обстановки укорочения и удлинения.

Fig. 7. Interpretation of modeling data on strain states of areas of two types of Riedel shears (R and R') along the shear zone (according to [*Стоянов, 1977*]; amended). a – arrows show conditions of shortening and elongation.

лома» (регулярно чередующиеся раздувы зон вторичных разломов) [Шерман и др., 1983; Шерман и др., 1991; Семинский, 2003]. Поле напряжений для этого случая может быть описано следующим образом. Происходит отклонение оси сжатия от «региональной» ориентировки в сторону больше 45° относительно зоны в случае трещин R типа и менее 45° в случае трещин R' типа [Надаи, 1936; Гзовский, 1975]. Поскольку в результате смещения происходит сброс напряжений не по направлению действия т_{тах}, а по плоскостям скалывания, для случая плоской деформации коэффициент Лоде-Надаи остается прежним, но меняется само т_{тах} (соотношение абсолютных величин напряжений по осям относительного сжатия и растяжения). Детальное описание изменений поля напряжений для участков укорочения (сжатия) и удлинения (растяжения) вдоль магистрального разрыва около его окончания было дано Д.Н. Осокиной [*2008*]; в первом приближении его можно отнести и к обсуждаемому случаю.

А.Л. Стром, занимаясь обобщением наблюдений за горизонтальными и вертикальными смещениями поверхности земли вдоль сейсмогенных разрывов, собрал обширную «коллекцию» случаев, в которых такие разрывы имеют чередование зон явного увеличения и уменьшения этих амплитуд [*Стром, Никонов, 1999*]. Он указывает на возможный волнообразный характер изменения амплитуд таких смещений (рис. 8). Вполне вероятно, что указанное явление имеет прямое отношение к наблюдаемому чередованию деформационных обстановок в экспериментах.

4.2. Интерпретация структур окончания крупных разломов

Хорошо известно, что крупные разломы заканчиваются совокупностями более мелких разрывов, в том числе типа «конский хвост» и «ёлочка» (рис. 9, А). В соответствии с теоретическим распределением деформаций и напряжений в окрестностях единичного разлома [Осокина и др., 2008], при правом сдвиге следует ожидать, что правый дальний сектор около окончания разрыва будет сектором сжатия/укорочения вдоль разрыва, а левый дальний – растяжения/удлинения. Согласно теории (см. рис. 5 и 6), в случае двумерной деформации в этих секторах следует ожидать, соответственно, возникновения трещин типа Р (правый) и трещин типа R (левый). Поскольку вся структура является центросимметричной, ближние правый и левый секторы будут иметь противоположные свойства (рис. 9, Б). В зависимости от конкретных условий, очевидно, либо



Рис. 8. Распределение сдвиговых смещений вдоль разрыва, образовавшегося при Филиппинском землетрясении 16.07.1990 г. (по рисунку А.Л. Строма по данным о смещениях из работы [*Nakata et al., 1990*]).

Fig. 8. Distribution of shear displacements along the rupture formed by the Philippine earthquake of 16 July 1990 (based on A.L. Strom's drawing based on the data on the displacement from [*Nakata et. al., 1990*]).



Рис. 9. Приконцевые вторичные нарушения единичного разлома. *А* – сбросы и взбросы у концевых частей сдвигов. Структуры «конский хвост» (VI) и «елочка» (VII) [*Расцветаев, 1987*]. *Б* – теоретическая схема расположения сдвигов типа R и P в концевых частях сдвигов, эллипсами показаны деформационные обстановки (материалы доклада [*Осокина и др., 2008*]).

Fig. 9. Secondary fractures at terminations of the single fault. A – normal faults and thrusts at terminations of shear faults. «Horse-tail» (VI) and «fish-bone» (VII) structures are shown according to [*Pacuperaeb*, *1987*]. E – a theoretical scheme of distribution of shear cracks of R and P types at terminations of shear faults; strain conditions are shown by ellipses (materials from [*Ocokuna u др., 2008*]).

могут быть развиты преимущественно трещины Р или R типа (тогда образуются структуры типа «конский хвост»), либо они могут быть развиты приблизительно равномерно, тогда будут возникать «ёлочки». При 3D деформации (рис. 9, А) структуры сжатия будут представлены надвигами (в комбинации с Р разрывами), структуры растяжения – сбросами (в комбинации с разрывами R типа).

4.3. РАЗРЫВНЫЕ СТРУКТУРЫ ВОРОНЦОВСКОГО ПОКРОВА

Воронцовский покров расположен в северной части Абхазской зоны Закавказского массива, непосредственно к северу от г. Сочи. Закартированная амплитуда перемещения с севера из структуры Большого Кавказа составляет минимум 15 км при мощности всей пластины около 1.5 км. Структура покрова характеризуется рядом интересных особенностей. Все тело покрова в его фронтальной части имеет наклон на север под углом около 20°. Флишоидные отложения эоценовой мамайской свиты, представленные тонкослоистым чередованием аргиллитов и алевролитов, образуют большое число мелких складок. Были собраны данные о двух параметрах этих складок – наклоне осевой плоскости и величине укорочения, ей перпендикулярной. Рассматривались две модели формирования покрова бокового укорочения и горизонтального сдвигания в поле тех же двух признаков (рис. 10, *A*, *Б*). Оказалось, что в первом приближении на диаграмме (рис. 10, *B*) облако точек складок параллельно тренду горизонтального сдвигания, но смещено на 15° выше линии теоретической модели, что легко объясняется именно наклоном всей структуры на север [Яковлев и др., 2008]. Таким образом, субгоризонтальные разрывы занимают позицию трещин Риделя R типа с углом скалывания 20° или несколько больше. Часть зон дробления была смята в складки (рис. 10, А), что указывает на одновременность их формирования с развитием складок. Облако точек природных складок имеет «разрыв» и смещено на диаграмме вниз на 15-20° в области высоких значений укорочения. Такое смещение может быть интерпретировано как «перескок» процесса сдвигания уже не вдоль главной плоскости срыва, а вдоль плоскости трещин Риделя (вдоль структур второго порядка), что позволяет оценить предел пластичности толщи, за которым развиваются хрупкие деформации. Это 85 % укорочения, чему соответствует 80-85° угла сдвигания. Многочисленные небольшие трещины с наклоном 20–30° на север (знак 4, рис. 10, A) смещают главным образом слои алевролитов и имеют надвиговый характер вне зависимости от положения относительно осевых поверхностей складок: они обеспечивают сокращение северных крыльев и растяжение южных крыльев антиклиналей. По схеме П. Ханкока это трещины Ү типа, параллельные плоскости детачмента. Таким образом, анализ структуры Воронцовского покрова показал активность трещин R типа и Y типа, но «активные» трещины Х типа не наблюдались. В данном случае трещины R типа, как это уже указывалось во введении, свидетельствуют об удлинении зоны сдвигания (детачмента), что подтверждает горизонтальное сдвигание (кинематический механизм) и гравитационное соскальзывание (геодинамические условия), и не разрешают участие в формировании этой структуры бокового укорочения (т.е. не существует геодинамических условий бокового давления). Запрещенные трещины R' типа отсутствуют. Можно сделать вывод, что свойства данного объекта соответствуют предсказанным теоретически.

4.4. НАБЛЮДАВШИЕСЯ ВАРИАНТЫ РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ УМЕНЬШЕНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМА ЗОНЫ СДВИГАНИЯ

Поскольку цель настоящей работы – скорее обозначить проблему и дать предварительную характеристику возможным структурам, чем сразу дать ее решение, задача подробного описания всех типичных случаев эшелонированных вторичных разрывных структур,



Рис. 10. Деформации и разрывы Воронцовского покрова [*Яковлев и др., 2008*]. Общая структура складчатых и разрывных деформаций в горной выработке (*A*, по фотографии). Север справа. Для *A*: *1* – слои алевролита и песчаника; *2* – слои аргиллита; *3* – зона дробления (границы – крупный пунктир); *4* – мелкие разрывы (штриховые линии). *Б* – общая схема напряженно-деформированного состояния тела покрова. С учетом наклона тела покрова на север (20°) ориентировка зоны дробления соответствует трещинам Риделя (R). Наклон оси максимального сжатия общего поля на юг 20° не противоречит ни обстановке простого сдвигания в теле покрова, ни механизму бокового давления со стороны Большого Кавказа, что означает невозможность решения задачи на основании параметров поля напряжений [*Яковлев и др., 2008*]. *В* – сравнение трендов изменения параметров деформации для моделей латерального укорочения и горизонтального сдвигания с параметрами природных складок. Используется диаграмма рассеяния – величина укорочения складок (X) и наклон осевых поверхностей складок (Y). Показаны две линии регрессии для совокупностей точек: модели горизонтального сдвигания и природных складок. Для В: *1* – модель горизонтального укорочения; *2* – модель горизонтального сдвигания; *3* – замеры природных складок.

Fig. 10. Deformations and ruptures of the Vorontsovsky nappe [*Яковлев и др., 2008*]. A general pattern of folding and fracturing in the tunnel (*A*) is based on a photo. North is on the right. *A*: 1 – siltstone and sandstone; 2 – mudstone, 3 – crushed zone (a thick dashed line shows borders); 4 – small ruptures (dashed lines). *B* – a general scheme of the state of stress and strain of the nappe body. Taking into account that the nappe body is inclined northward (20°), the crushed zone's orientation corresponds to Riedel shear of R type. The fact that the axis of the maximum compression of the common stress field is inclined southward (20°) shows no contradiction both to conditions of simple shearing of the nappe body and the mechanism of lateral pressure from the Larger Caucasus. It is thus impossible to resolve the problem on the basis of parameter of the stress field [*Яковлев и др., 2008*]. *B* – Comparison of trends of change of parameters of deformation for models of lateral shortening and horizontal shearing with measured parameters of natural folds. Scattering diagram: X axis – values of shortening of folds; Y axis - inclinations of axial surfaces of folds. Two lines of regression for sets of points are shown, one for models of horizontal shearing, another for natural folds. In Figure 10.B: 1 – horizontal shortening model; 2 – horizontal shearing model; 3 – parameters of natural folds.



Рис. 11. Структура уменьшения объема и ширины зоны (схема). Наблюдаются обычные стилолитовые швы, субперпендикулярные оси сжатия, а также трещины Риделя R типа, образованные также стилолитовыми структурами с уступами, «обратными» перемещению крыльев в сравнении с обычными уступами с жильным заполнением. Размер структуры – десятки сантиметров.

Fig. 11. The structure of reduction of the volume and the width of the zone (schematic drawing). Typical stylolithic sutures going sub-perpendicular to the compression axis are observed, as well as Riedel shears of R type, that are also formed by stylolithic fractures with micro-benches which are «inverse» to movement of the sides (unlike typical benches with mineral filling). The structure's length is dozens of centimeters.

реально встречающихся в природе, в настоящий момент не ставилась. Сбор такой информации в поле и/или в публикациях представляется интересной и важной задачей будущих исследований.

Тем не менее некоторые структуры могут быть описаны в предварительном порядке уже сейчас. В частности, во время полевых работ в Крыму осенью 1993 г. при поиске сколовых трещин в карьерах в районе Бахчисарая в известняках и доломитах палеогена Ж. Анжелье обнаружил и показал участникам маршрута интересную комбинацию из «сколовых» трещин Риделя R типа и стилолитовых швов (рис. 11). Трещины Риделя представляли собой те же стилолитовые швы, но расположенные под очень острым углом к оси сжатия. При этом основное внимание участников было обращено на «обратные» уступы в сколовых трещинах, противоречащие реальному смещению (относительно обычных уступов с отложением минерального вещества). В рамках предлагаемой нами схемы такая структура может быть проинтерпретирована как комбинация уменьшения ширины и объема зоны, причем, возможно, при сохранении ее общей длины.

Довольно распространенными являются комбинации трещин, заполненных кварц-кальцитовым жильным веществом с небольшими блоками матрикса, по которым наблюдается сильная штриховка. На рис. 12 представлен образец из крыла складки в Воронцовском покрове (трещина Y типа на крыле складки, север слева). Хорошо видно, что внутренние трещины со смещением представляют собой структуры Р типа с



Рис. 12. Зона смещения (сдвигания) в слоистом алевролите из Воронцовского покрова. На левом снимке показан перпендикулярный срез зоны; справа – штриховка смещения на плоскости зоны в том же образце.

Fig. 12. The displacement (shearing) zone in the aleurolite layer in the sample taken from the Vorontsovsky nappe. Left – perpendicular section of the zone; right – striation of displacement on the zone's plane in the same sample.

углом сдвигания около 80°. Структуры растяжения *е* типа в данном случае не видны как трещины, поскольку заполняют почти все пространство этой небольшой зоны сдвигания. Здесь мы имеем структуру увеличения объема зоны, возможно со слабой тенденцией к ее укорочению

В качестве дополнительного материала кратко опишем деформационные структуры, которые в разное время были найдены в облицовочных плитах (мрамор). Недостатком материала является отсутствие и его привязки, и ориентации наблюдаемых структур в природе, однако возможность точной фиксации деталей в данном случае перекрывает этот дефект. На рис. 13 показана зона сдвигания шириной 5 см, состоящая из комбинации сколовых трещин Р типа и трещин растяжения *е*. В данном случае будет наблюдаться увеличение



Рис. 13. Зона сдвигания в мраморе (слева), представленная комбинацией трещин Р и *е* типа. Справа показана деталь левого снимка. Московское метро, ст. Нагорная.

Fig. 13. Shear zone in marble. Left – the zone is represented only by a combination of shear cracks of P and e types. Right – a detail of the photo. The photo was taken at Nagornaya Station of the Moscow Metro.



Рис. 14. Зона сдвигания в мраморе, представленная только трещинами растяжения *е* типа. Ширина зоны около 5 см. Московское метро, переход ст. Чеховская – ст. Пушкинская.

Fig. 14. Shear zone in marble. The zone is represented only by tension fractures of e type. The zones' width amounts to almost 5 cm. The photo was taken in the underground passage from Chekhovskaya Station to Pushkinskaya Station of the Moscow Metro.

ширины зоны и, весьма возможно, некоторое уменьшение ее длины. Об этом может говорить ориентировка трещин растяжения, несколько меньшая, чем 45° к плоскости зоны.

На рис. 14 представлена довольно типичная структура эшелонированных трещин отрыва. В данном случае никаких трещин другого типа не наблюдается. Такую структуру, вероятнее всего, будет правильно интерпретировать как смещение соседних крыльев с сохранением их длины и небольшим увеличением ширины всей зоны (и увеличением ее объема).

Заметим, что по величине угла сдвига (отношению величины смещения к ширине зоны) последние три структуры представляют собой ряд, хотя и неравномерный, от очень большого угла сдвига (см. рис. 12) к малому (см. рис. 13) и еще меньшему (рис. 14).

Некоторые эшелонированные структуры могут показывать не вполне однозначный генезис, требующий дополнительных исследований. На рис. 15 мраморная плита имеет эшелонированную зону трещин, ориентированных под углом 15-20° к самой зоне, т.е. напоминающих сколы R типа. Удачно ориентированная полосчатость показывает правое сдвигание с углом сдвига около 60°. Возможно, в этом случае появившиеся в зоне сдвигания R сколы были использованы трещинами растяжения. Однако нельзя исключать вероятность двухстадийной деформации – сначала появления е типа сколов с обычным углом 45° к зоне, а затем общего однородного удлинения массива вдоль зоны (и укорочения поперек) с пластичным разворотом трещин до 20°. Выявление такой последовательности событий может дать интересный дополнительный материал к истории деформирования массива.

В приведенных выше структурах отсутствуют трещины X типа. К таким структурам, прежде всего, следует отнести самые обычные серии сбросов в теле оползня, имеющего общую субгоризонтальную плоскость скольжения по своей подошве. Развитие сбросов в этом случае обеспечивается удлинением тела оползня и поворотами блоков. В качестве второго примера можно указать на структуры сдвигания в осадочном чехле Западно-Сибирской плиты, которые были обнаружены в ходе детальных сейсмических работ на нефтяных месторождениях [Гогоненков и др., 2007]. Это сложные трехмерные структуры, которые представлены региональными субвертикальными зонами сдвигания предположительно левого и правого типа (северозападного и северо-восточного простирания). Оперяющие разрывы имеют в целом субмеридиональное простирание, тип движения – сбросы. Наклоны сбросов (и, соответственно, их «вергенция») противоположны на соседних крыльях. Механизм формирования этих структур в целом остается пока дискуссионным. Нами предполагается, что в вертикальном сечении, параллельном региональному сдвигу, эти сбросы указывают на растяжение структуры и на некоторое ее перекашивание (сдвигание) вследствие движений фундамента относительно кровли чехла. Ранее подобное объяснение уже предлагалось [Koronovsky et al., 2009], но без указания на существование компоненты удлинения вдоль регионального сдвига. Таким образом, эти структуры можно отнести к трещинам Х типа (рис. 16).

5. ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ (2D) ПРИ ЧИСТОМ СДВИГЕ: ОРИЕНТАЦИЯ ЗОН ПРОСТОГО СДВИГАНИЯ И ВТОРИЧНЫЕ НАРУШЕНИЯ В НИХ

Интересным представляется рассмотреть теоретически возможные случаи сочетания чистого и простого сдвига. Понятно, что в случае чистого сдвига в массиве пород будут возникать серии парных трещин сколов. В этих же условиях могут быть активны воз-



Рис. 15. Зона сдвигания в мраморе, представленная предположительно только трещинами скола R типа, имеющими компоненту растяжения. Ширина зоны около 3 см. Пекин (КНР), пешеходная улица к югу от пл. Тянь-Ань-Мэнь.

Fig. 15. Shear zone in marble. The zone is presumably represented only by shear cracks of R type with a component of tension along the zone's strike. The zone's width amounts to almost 3 cm. The photo was taken on a pedestrian street located southward from the Tjan An Men Square in Beijing, China.



Рис. 16. Структурная карта одного из горизонтов верхней юры Еты-Пуровского вала, Западно-Сибирская плита [*Гогоненков и др., 2007*]. Освещение слева. Хорошо видно несколько сдвиговых структур СЗ и СВ простирания с многочисленными эшелонированными сбросами субмеридионального простирания по бокам, имеющими противоположную вергенцию в соседних блоках.

Fig. 16. The structural map of a horizon of the Upper Jurassic sequence in the Ety-Purovsky swell of the Western-Siberian plate [*Forohenkob и др., 2007*]. The light is from the left. Clearly observed are shear fault structures of NW and NE strikes with numerous echelon normal faults of the submeridional strike on each side. Normal faults on opposite sides have opposite vergence.

никшие ранее ослабленные зоны любой ориентации по отношению к оси максимального сжимающего напряжения (к оси максимального укорочения). В любом случае признаком ситуации чистого сдвига будет примерно равное развитие в массиве правых и левых зон сдвигания. Поскольку при чистом сдвиге оси «сжатия» и «укорочения» совпадают, можно легко дать прогноз, что зоны, находящиеся под углом менее 45° к оси укорочения, будут испытывать укорочение, а не удлинение. И наоборот, зоны, находящиеся под углом более 45° к оси укорочения, будут испытывать удлинение, а не укорочение. В соответствии с предлагаемыми теоретическими схемами (см. рис. 5, 6, таблица) можно ожидать возникновения специфических комбинаций вторичных трещин. Рассмотрим кратко некоторые случаи (рис. 17). Если зона сдвигания находится под углом более 45° к оси укорочения (случай правого сдвига, рис. 17, *а*), то можно ожидать удлинения всей зоны; соответственно могут развиваться сколовые трещины R-типа. Если при деформации объем массива уменьшается, то можно ждать развития стилолитовых трещин. Если объем массива увеличивается, то будут развиваться эшелонированные трещины отрыва *е* (случай левого сдвига, рис. 17, *г*). С последним случаем можно сопоставить структуру на рис. 14. Если структура сдвигания находится под острым углом (менее 45°) к оси укорочения (рис. 17, δ), то можно ожидать возникновения эшелонированных трещин скалывания P-типа в комбинации с трещинами отрыва *е*, чему соответствуют структуры на рис. 12 и 13. Не исключено возник-



Рис. 17. Массив в состоянии чистого сдвига, включающий в себя зоны простого сдвигания [*Yakovlev, 2010*]. Показано предположительное развитие вторичных трещин в ситуации удлинения зон (а – для уменьшения объема, г – для увеличения объема зон сдвигания), а также в ситуации уменьшения длины зон (б – для увеличения объема, в – для постоянного объема зоны). Индексация трещин показана по П. Ханкоку. Одноименные зоны сдвигания, показывающие укорочение и удлинение («а» и «б», например), могут быть использованы для определения направления 45° к оси сжатия.

Fig. 17. The massif which is subject to pure shear. It also includes zones of simple shearing [*Yakovlev, 2010*]. Presumable development of secondary fractures is shown for the case of elongation of the zones [the shear zone's volume decrease (a) and increase (r)] and for the case of decrease of the zones' length [the zone's volume increase (6) and constant (B)]. Indexation of cracks is given according to P. Hancock. The shear zones with the same names, that evidence shortening and lengthening («a» and « δ », for example), can be used for definition of direction 45° to the compression axis.

новение и трещин скалывания R' типа (рис. 17, *в*). Заметим, однако, что представленные теоретические варианты являются сугубо предварительными и требуют подтверждения фактами в природных и экспериментальных структурах. Например, структура, приведенная на рис. 11, вероятнее всего, возникла под довольно острым углом к оси укорочения (положение «б» на рис. 17 или с еще меньшим углом) при уменьшении объема самой зоны сдвигания и ее ширины и при сохранении длины самой зоны (т.е. при отсутствии пластических деформаций в массиве).

На первый взгляд парные зоны сдвигания, находящиеся под разными углами к оси максимального укорочения массива, почти эквивалентны парным трещинам скалывания в ситуации с описанием структуры в полях напряжений. По совокупности таких трещин скалывания со следами скольжения определяется ориентация главных осей напряжения и значение коэффициента Лоде-Надаи. Однако в предлагаемом варианте есть возможность следить за компонентой изменения объема и пластической деформацией матрикса самого массива, что можно рассматривать как два дополнительных параметра, характеризующих именно деформационную сторону описания массива и зон сдвигания в нем. В связи с этим целесообразно выдвинуть задачу сбора и систематизации всех случаев эшелонированных вторичных структур на основе представления о деформированном состоянии зон сдвигания. Материалом для такой работы могут служить и обычные природные структуры в масштабе обнажения, и результаты моделирования на эквивалентных материалах, и структуры, выявляемые геофизическими методами в осадочном чехле платформ. Второе предложение касается практикуемого характера моделирования на эквивалентных материалах. Вероятно, будет полезно в процессе создания экспериментов на эквивалентных материалах каким-то образом менять длину всей моделируемой структуры. Возможно, при этом будут выявлены новые структурные ситуации, встречающиеся в природе, но оставшиеся неизученными в ходе традиционного моделирования, предусматривающего сохранение длины структуры.

6. Выводы

1. Теоретически обосновано, что трещины R и X типов (индексация по схеме П. Ханкока) в отношении возникающих деформаций зоны сдвигания являются парными и встречаются при ее удлинении. Трещины R' и P типов также являются парными и встречаются при укорочении зоны сдвигания. Установлено, что одновременное нахождение R и R' трещин в зоне сдвигания невозможно. Такое развитие вторичных нарушений не эквивалентно ситуации чистого сдвига, рассматриваемой в рамках исследования полей напряжений в зоне сдвигания.

2. Обоснована таблица теоретических вариантов сочетаний вторичных нарушений для случаев удлинения и укорочения зоны сдвигания, а также при увеличении и уменьшении ее объема (активные, возможные и запрещенные). Таблица может использоваться для диагностических целей.

3. Сделаны два предложения по развитию исследований зон сдвигания. Представляется полезным проводить сбор и систематизацию сочетаний эшелонированных вторичных нарушений в рамках представления о деформированном состоянии зоны сдвигания. Предложено ввести изменение длины зоны сдвигания в качестве параметра при моделировании на эквивалентных материалах.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Первоначальное обсуждение идеи работы проводилось в 2007 г. с Л.А. Сим, А.В. Марининым и Д.Н. Осокиной, которые отметили, что развитие работ в этом направлении будет полезным. Постановка проблемы обсуждалась с Ж. Анжелье весной 2008 г. в форме переписки, и теоретическая часть работы вызвала у него благожелательный интерес. В других рабочих обсуждениях представленной идеи автор получил активные положительные отклики со стороны В.С. Имаева, А.Л. Строма, Я. Буковой, Я. Черны. Специально для данной работы любезно предоставил некоторые свои материалы по сейсмогенным разрывам, а также просмотрел первоначальный текст статьи А.Л. Стром. Ю.Л. Ребецкий и А.В. Михайлова дали важные консультации по вопросам описания поля напряжений для простого сдвига. Всем коллегам автор выражает свою искреннюю благодарность за помощь и поддержку.

8. ЛИТЕРАТУРА

- *Борняков С.А.* Моделирование сдвиговых зон на упруговязких моделях // Геология и геофизика. 1980. №11. С. 75–84.
- Борняков С.А. Динамика развития деструктивных зон межплитных границ (результаты моделирования) // Геология и геофизика. 1988. № 6. С. 3–10.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–11.
- *Михайлова А.В.* Методика количественной оценки деформаций, напряжений и перемещений в пластических непрозрачных моделях // Тектонофизика и механические свойства горных пород. М.: Наука, 1971. С. 38–48.
- *Михайлова А.В.* Методические вопросы создания и исследования тектонических моделей с применением пластичных эквивалентных материалов // Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы. М.: Наука, 1989. С. 209–227.
- Надаи А. Пластичность. М.–Л.: Мир, 1936. 280 с.
- *Николя А.* Основы деформации горных пород. Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 167 с.
- *Осокина Д.Н.* Особенности локальных полей напряжений разных уровней и нарушений второго порядка в окрестностях окончания сдвигового разрыва // Проблемы тектонофизики. К 40летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН / Ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 69–87.
- Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л., Войтенко В.Н. Изучение тектонического разрыва как объекта, объединяющего мегатрещину, ее поля (напряжений, деформаций) и вторичные структуры (тектонофизический анализ) // Проблемы тектонофизики. К 40летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН / Ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 89–102.
- *Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.

Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном го-

ризонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С. 41–57.

- Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном сдвиге // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 9. С. 29– 35.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 244 с.
- *Стоянов С.* Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
- Стром А.Л., Никонов А.А. Распределение смещений вдоль сейсмогенных разрывов и учет неравномерности подвижек при палеосейсмологических исследованиях // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 47–59.
- Шерман С.И., Борняков С.А, Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. 262 с.
- Яковлев Ф.Л. О диагностике деформированного состояния крыльев разломов и их внутренней зоны по типам вторичных нарушений // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания / Ред. Ю.В. Карякин. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 516–519.
- Яковлев Ф.Л., Маринин А.В., Сим Л.А., Гордеев П.П. Поля тектонических напряжений и поля деформаций Воронцовского покрова (Северо-Западный Кавказ) // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН / Ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 319–333.
- *Bokun A.N.* Horizontal shear zones: physical modeling of formation and structure // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2009. V. 45. № 11. P. 996–1005. doi:10.1134/S106935130911007X.
- *Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. V. 7. № 3–4. P. 437–457. doi:10.1016/0191-8141(85)90048-3.
- Koronovsky N.V., Gogonenkov G.N., Goncharov M.A., Timurziev A.I., Frolova N.S. Role of shear along horizontal plane in the formation of helicoidal structures // Geotectonics. 2009. V. 43. № 5. P. 379-391. doi:10.1134/S0016852109050033.
- *Nakata T., Tsutsumi H., Punongbayan R.S., Rimando R.E., Daligdig J., Daag A.* Surface faulting associated with the Philippine earthquake of 1990 // Journal of Geography. 1990. V. 99. P. 515–532 (in Japanese).
- *Ramsay J.G., Huber M.I.* The techniques of modern structural geology. V. 1. Strain analysis. London: Academic Press, 1983. 307 p.
- Yakovlev F.L. Detections of types of strain states for simple shear zones based on sets of secondary fractures // 8th Meeting of the Central European Tectonic Group Studies (CETeG). Conference proceedings / Eds. M. Ludwiniak, A. Konon, A. Zylyska. Warsaw: UW, 2010. P. 128–130.



Яковлев Федор Леонидович, канд. геол.-мин. наук, с.н.с., лаб. тектонофизики Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123995, ГСП-5, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, Россия Тел.: (495)2549350; ⊠ e-mail: yak@ifz.ru

Yakovlev, Fyodor L., Candidate of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Lab. of Tectonophysics Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 123995, Moscow, Bol'shaya Gruzinskaya street, 10, Russia Tel.: (495)2549350; ⊠ e-mail: yak@ifz.ru