

УДК 551.243(571.1)

ЛАТЕНТНАЯ ТЕКТОНИКА СРЕДНЕРУССКОГО ПОЯСА ДЕФОРМАЦИЙ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2021 г. С. Ю. Колодяжный¹, *, А. В. Полещук¹, Д. С. Зыков¹

¹Геологический институт РАН, д. 7, Пыжжевский пер., 119017 Москва, Россия

*e-mail: kolod63@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 21.12.2020 г.

После повторной доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 07.07.2021 г.

Рассмотрены особенности тектоники Среднерусского пояса деформаций, расположенного в центральной части Восточно-Европейской платформы. Пояс широкой (до 350 км) полосой прослеживается в восток-северо-восточном направлении на протяжении более 1000 км. При изучении этой структуры были использованы методы дистанционного и структурного анализов. На основе имеющихся данных, анализа потенциальных полей и дешифрирования карт цифрового рельефа составлен комплект тектонических схем раннедокембрийского фундамента, протоплатформенного и плитного чехла. Рассмотрены особенности тектоники различных этажей платформы, а также проведено сопоставление структур, расположенных на разных глубинных уровнях. Анализ показал, что Среднерусский пояс представляет собой долгоживущую структуру, в строении которой обособлены крупные тектонические зоны, выраженные в современной поверхности рельефа и пронизывающие комплексы фундамента и чехла. В строении пояса на разных глубинных уровнях проявлены комбинированные элементы тектоники сдвиговых зон и трансоровых детачментов, которые развивались в различных динамических обстановках: (I) коллизия в конце палеопротерозоя (свекофенский этап); (II) трансензионный рифтогенез в рифее и раннем венде (раннебайкальский этап); (III) развитие инверсионных структур при формировании бассейна Московской синеклизы (каледонский – раннегерцинский этапы); (IV) сдвиговые перемещения в обстановках транспрессии и трансенсии (позднегерцинский – новейший этапы). Деформации осадков чехла Среднерусского пояса обычно представлены в латентной форме (рассредоточенные малоамплитудные нарушения), но встречаются также зоны с разрывно-складчатым строением. Детальное изучение Среднерусской зоны деформаций, образующей северную часть одноименного пояса, показало, что ей свойственны элементы тектоники типичных сдвиговых зон. Рассмотрены структурно-кинематические парагенезы зоны и модели ее строения. Отмечены структурно-динамические признаки благоприятные для накопления углеводородов. Начиная с позднего рифея и до новейшего времени Среднерусская зона испытала более девяти импульсов подвижности и не менее шести кинематических инверсий. Для позднегерцинского, альпийского и новейшего этапов установлены три стадии деформаций, связанные преимущественно с левосдвиговой транспрессией, и локальными по времени проявления обстановками правосдвиговой трансенсии и левого сдвига.

Ключевые слова: внутриплитная тектоника, геодинамика, зона сдвига, детачмент, кинематика, структурный парагенез, Среднерусская зона, Восточно-Европейская платформа

DOI: 10.31857/S0016853X21040093

ВВЕДЕНИЕ

Внутриплитные зоны деформаций, пронизывающие континентальную кору относительно стабильных платформ, представляют собой особый тип недостаточно изученных тектонических нарушений. В областях развития платформенного чехла они представлены тектоническими зонами, выраженными в латентной (скрытой) форме. В породах кристаллического фундамента зоны нарушений скрыты под мощными толщами плитных отложений. В осадках чехла и на поверхности для зон деформаций характерны энер-

гетически латентные формы проявления в виде небольших и рассредоточенных смещений, слабой сейсмичности и флюидно-газовой активности, а также малозаметных морфоструктур современного рельефа. В последнее время интерес к этим структурам существенно вырос в связи с их влиянием на процессы платформенного рудообразования и проявления сейсмичности [3, 4, 17, 31, 37, 45]. Рассматриваемые зоны все чаще становятся предметом геологического картирования и изучения по специальным методикам [4, 22, 23, 26, 31, 33].

Внутриплитные тектонические зоны широко развиты в пределах древней Восточно-Европейской платформы, в центральной части которой докембрийский фундамент перекрыт мощным фанерозойским чехлом. Главными источниками информации о строении фундамента являются геофизические материалы и относительно редкая сеть скважин. В плейстоцене почти вся территория платформы была охвачена оледенением, оставившим после себя обширный покров ледниковых отложений и многочисленные гляциодислокации, которые маскируют и скрывают тектонические нарушения в осадках чехла. В связи с этим представления о тектонике фундамента и чехла Восточно-Европейской неоднозначны. Появление в последние годы новых геологических и геофизических данных способствовало разработке геологических карт новых поколений, которые отражают стремительное развитие представлений о тектонике платформы [4, 11, 13–15, 23].

Многие исследователи отмечали пространственную связь крупнейших разновозрастных структур Восточно-Европейской платформы: палеопротерозойских орогенных поясов и сутурных зон с рифейскими авлакогенами, которые контролируют позицию платформенных синеклиз, инверсионных валов и тектонических нарушений плитного чехла [6, 28, 31, 47, 54]. Ряды разновозрастных структур, совмещенных в пространстве и образующих единую вертикальную колонну, в целом представляют собой долгоживущие тектонические зоны. Обширная полоса распространения долгоживущих нарушений прослеживается в субширотном направлении в центральной части Восточно-Европейской платформы. В инфраструктуре фундамента эта полоса соответствует Среднерусскому палеопротерозойскому коллизионному поясу, на уровне кровли фундамента она соответствует Среднерусской системе палеорифтовых структур рифей–ранневендского возраста [5, 8, 11, 39, 43, 47].

В задачи нашего исследования входило изучение строения и особенностей динамического развития Среднерусского пояса деформаций в отло-

жениях плитного чехла. В настоящей работе рассматриваются результаты дистанционного изучения приповерхностных структур в широкой полосе развития Среднерусского пояса, проводится сопоставление выявленных нарушений с тектоническими структурами фундамента. Для этих целей нами был составлен комплект геолого-структурных карт, характеризующих тектонику различных этажей Восточно-Европейской платформы. Более подробно рассмотрено строение северной части Среднерусского пояса, в пределах которой мы провели геолого-структурные исследования.

ТЕКТОНИКА ФУНДАМЕНТА СРЕДНЕРУССКОГО ПОЯСА

Составленная нами схема тектоники фундамента основана на опубликованных материалах и анализе карт потенциальных полей [11, 13–15, 32, 46, 47] (рис. 1). Показаны три крупнейших сегмента Восточно-Европейской платформы – Фенноскандинавский, Сарматский и Волго-Уральский, а также разделяющие их широкие коллизионные и вулканоплутонические пояса, сформировавшиеся в палеопротерозое [11, 46] (см. рис. 1, б). Крупнейшие коллизионно-орогенные пояса – Среднерусский и Южно-Прибалтийский – прослеживаются в центральной части платформы вдоль северо-западных границ Сарматии и Волго-Уралии. Они рассматриваются в качестве единого пояса в составе Фенноскандии, образующего крупные дугообразные мегаструктуры, по [11]. Сюда эти пояса ограничены Смоленско-Московской и Владимир-Вятской зонами нарушений, образующими в целом трансформационную сутурную зону вдоль северного обрамления Сарматии и Волго-Уралии. Южнее Смоленско-Московской зоны располагается Осинско-Микашевичско-Московский палеопротерозойский (2.02–1.97 млрд лет) вулканоплутонический пояс, который рассматривается в качестве активной окраины андийского типа, связанной с субдукцией океанической плиты под палеоконтинент Сарматия [2, 11].

Рис. 1. Схема строения раннедокембрийского фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы (по данным [11, 46] с изменениями).

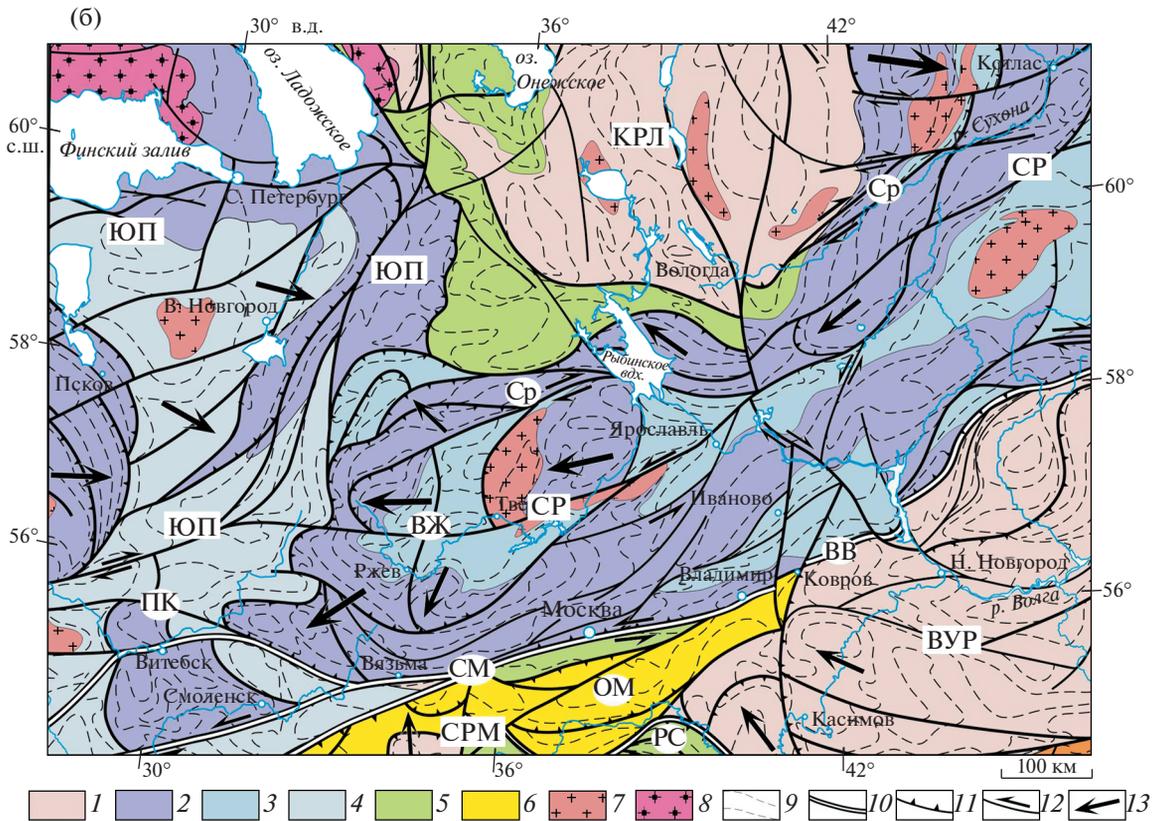
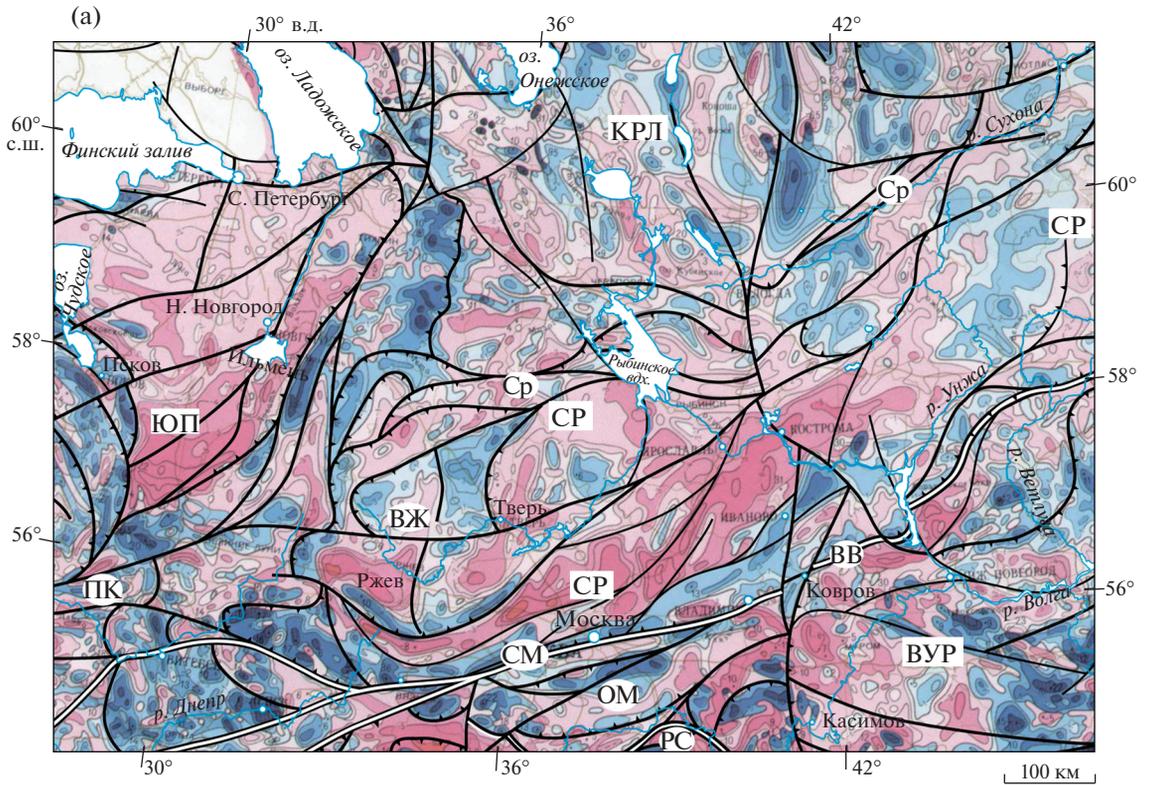
(а) – тектонические границы поверх карты магнитного поля;

(б) – тектоническая схема размещения главных элементов раннедокембрийской коры. *Домены фундамента:* КРЛ – Карельский, ВУР – Волго-Уральский, СРМ – Сарматский; *орогенные пояса:* СР – Среднерусский (ВЖ – Верхневолжская протрузия), ЮП – Южно-Прибалтийский;

палеопротерозойские пояса: ОМ – Осинско-Микашевичско-Московский, РС – Рязано-Саратовский;

зоны нарушений: СМ – Смоленско-Московская, ВВ – Владимир-Вятская, СР – Среднерусская, РС – Рязано-Саратовская, ПК – Полоцко-Курземская.

1 – архейские кратоны; 2–4 – интенсивно переработанные в палеопротерозое комплексы пород Среднерусского и Южно-Прибалтийского коллизионных орогенов, преимущественно: 2 – палеопротерозойские гранулитогнейсы, 3 – архейские и палеопротерозойские гранито-гнейсы, 4 – палеопротерозойские гранито-гнейсы; 5–7 – палеопротерозойские комплексы: 5 – вулканогенно-осадочные (рифтогенные и окраинно-континентальные), 6 – вулканоплутонические (активные окраины), 7 – гранитоидные; 8 – граниты-рапакиви; 8 – структурные линии; 10–12 – разрывы: 10 – главные шовные зоны, 11 – взбросы и надвиги, 12 – сдвиги и взбросо-сдвиги; 13 – предполагаемые направления горизонтальных перемещений свекофеннского этапа



Среднерусский коллизионный пояс прослежен по геофизическим данным в виде широкой (до 350 км) полосы от верховьев рек Волга и Днепр в восток – северо-восточном направлении на протяжении более 1000 км, после чего плавно изгибается и сливается с Лапландско-Беломорским поясом северо-западного простирания. В строении Среднерусского пояса участвуют интенсивно переработанные в палеопротерозое архейские гранит-зеленокаменные комплексы, палеопротерозойские гранулиты-гнейсы, гранитоиды и интрузии мафитового состава [11]. В палеопротерозое данные образования находились на уровне нижней – средней коры, испытали метаморфизм в условиях, достигающих гранулитовой фации, и были выжаты к поверхности в виде дивергентных покровов в результате свекофенских (1.9–1.8 млрд лет) коллизионных событий [11].

На основе сейсмо-гравитационного моделирования в пределах коры Среднерусского пояса были выявлены большие объемы пород с избыточной плотностью 0.03–0.25 г/см [32]. Вдоль краевых частей пояса выявлены полосовые гравиметрические аномалии амплитудой до +60 мГал, которые связаны с выходом на поверхность гранулитовых комплексов [11]. В западной части Среднерусского пояса полосы аномалий сходятся, образуя подковообразную структуру – центриклиналь чешуйчато-надвигового строения (см. рис. 1). Полосы гранулитов (гравитационных аномалий) сопровождаются более узкими прерывистыми и линзовидными магнитными аномалиями (см. рис. 1, а).

На картах локальных аномалий намагниченности зоны гранулитов имеют тонко расслоенный облик, подчеркивающий изгибы структур и характер смещений вдоль нарушений [11, 42]. Структурный рисунок западного замыкания Среднерусского пояса позволяет рассматривать эту область в качестве фронтальной части Верхневолжской горизонтальной протрузии, где в результате продольного тектонического течения произошло скучивание и надвигание тектонических пластин к западу [16] (см. рис. 1, б). Пересекающий Верхневолжскую протрузию сеймопрофиль 1-ЕВ показывает, что эта часть Среднерусского пояса имеет синформное строение, образована серией тектонических пластин, дискордантно перекрывающих зону трансформационного детачмента, полого погружающегося в южных румбах [11]. В крыльях протрузии в облике локальных аномалий намагниченности дешифрируются структурные рисунки, идентичные гигантским С-S – структурам, которые указывают на сдвиговые (сдвиго-надвиговые) перемещения: правосторонние в северном крыле протрузии и левосторонние – в южном (см. рис. 1, б). Фланговые зоны сдвига под острыми (с юга) и почти прямыми (с севера) углами срезают структуры смеж-

ных доменов. Судя по смещениям отдельных магнитных аномалий, фланговые сдвиги имеют амплитуды от 200 до 500 км.

СТРОЕНИЕ ПРОТОЧЕХЛА СРЕДНЕРУССКОГО ПОЯСА

Использованная для тектонического анализа структурная карта кровли фундамента составлена на основе синтеза опубликованных данных [3, 5, 10, 13–15, 43] (рис. 2). В центральной части Восточно-Европейской платформы обособлена крупная депрессия – Московская синеклиза, – контуры которой во многом соответствуют контурам Среднерусского палеопротерозойского орогена. На уровне кровли фундамента синеклизе осложняют палеорифтовые структуры Среднерусской системы (авлакогены), заполненные верхнерифейскими и нижневендскими терригенными отложениями проточехла. Отложения верхнего рифея рассматриваются в качестве синрифтовых комплексов [43].

Авлакогены образуют ветвистую систему, построенную из протяженных узких трогов и цепочек грабенов. По направлению с северо-востока на юго-запад система палеорифтов испытывает виргацию и плавно расширяется, достигая максимального раскрытия в районе Торжокского и Нелидовского поднятий. Грабены (Моловский, Крестецкий, Тверской и Гжатский) обрамляют и пересекают эти поднятия и к западу от него вновь сливаются в широкую, но не глубокую Валдайскую грабенообразную впадину (см. рис. 2). Уровень тектонического врезания трогов уменьшается в направлении их виргации. В северной части Среднерусской системы располагается ее главная ветвь – Среднерусский авлакоген. Грабены авлакогена разделены продольными перемычками поднятий, по простиранию смещены поперечными и диагональными разрывами, образуют цепочки и часто кулисообразно надстраивают друг друга.

Авлакогены Среднерусской системы осложнены диагональными разрывами и оперяющими грабенами, угловые соотношения которых с магистральными зонами позволяют их идентифицировать как аналоги присдвиговых синтетических (R) и антитетических (R') сколов Риделя, а также оперяющих трещин отрыва. Главную магистраль Среднерусского авлакогена сопровождают диагональные и оперяющие грабены (Крестцовский, Бобровский), позиция которых соответствует трещинам отрыва и позволяет предполагать левосдвиговые смещения вдоль палеорифта. Авлакоген пересекают несколько антитетических правых сдвигов северо-западной и субмеридиональной ориентировки. Наиболее крупный из них – Ладожско-Рыбинский – с видимой амплитудой около 50 км смещает вправо ось авлакогена и имеет признаки конседиментаци-

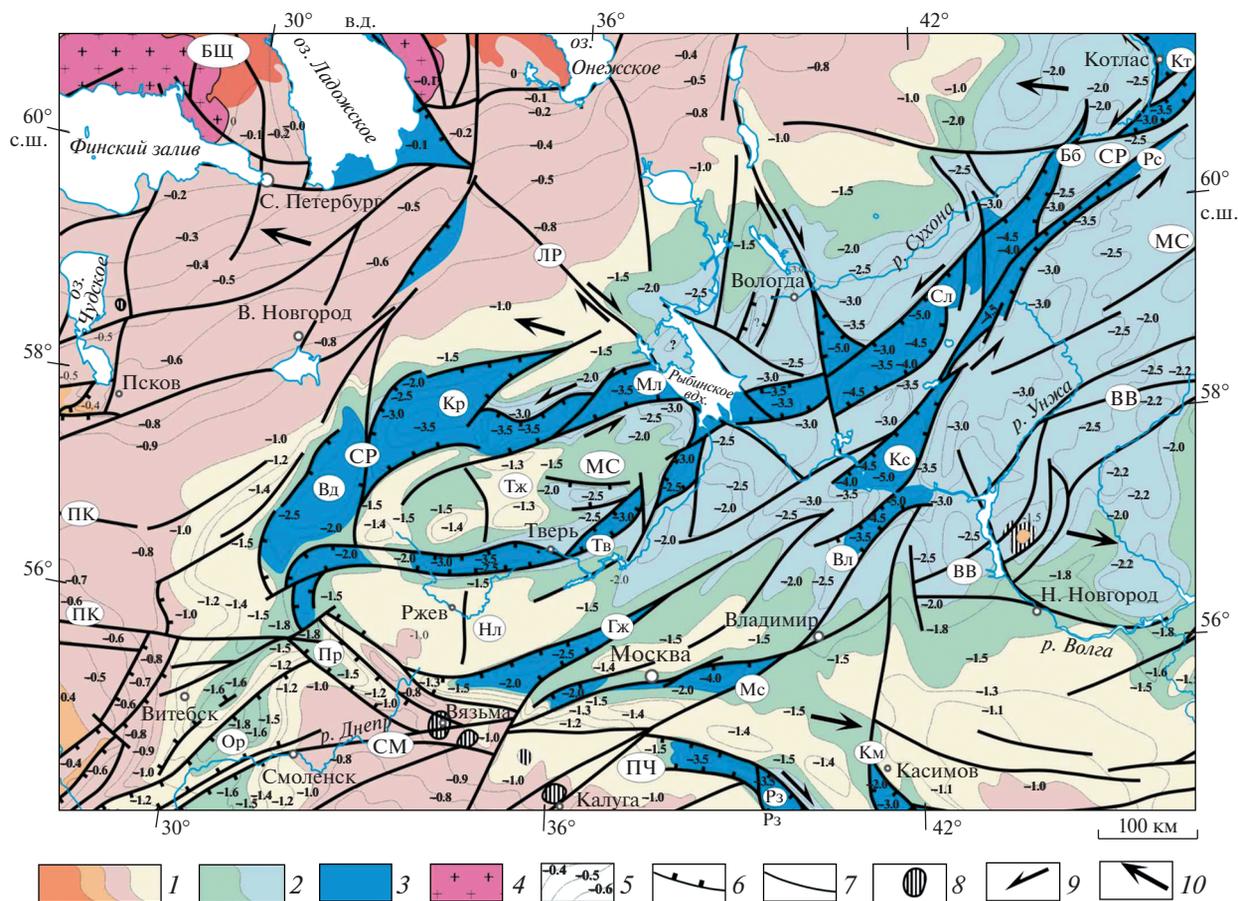


Рис. 2. Структурная схема строения кровли фундамента Восточно-Европейской платформы (с использованием данных [3, 5, 8, 10, 13–15, 43, 47]).

Палеорифты: CP – Среднерусская палеорифтовая система (грабены: Ор – Оршанский, Вд – Валдайский, Кр – Крестцовский, Мл – Молоковский, Сл – Солигалицкий, Рс – Рослятинский, Бб – Бобровский, Кт – Котласский, Тв – Тверской, Кс – Костромской, Вл – Владимирский, Пр – Пречистенский, Гж – Гжатский, Мс – Московский (Подмосковный), ПЧ – Пачелмский авлакоген;

грабены: Рз – Рязанский, Км – Касимовский;

щиты и выступы фундамента: БЩ – Балтийский щит, Тж – Торжокский, Нл – Нелидовский; МС – Московская синеклиза;

зоны нарушений: СМ – Смоленско-Московская, ВВ – Владимир-Вятская, ЛР – Ладожско-Рыбинская, ПК – Полоцко-Курземская.

1–3 – морфоструктуры кровли фундамента: 1 – поднятия и их склоны, 2 – депрессии и их склоны, 3 – рифей – ранневендские грабены и авлакогены; 4 – граниты рапакиви; 5 – изогипсы кровли фундамента; 6–7 – разломы, преимущественно: 6 – сбросы, 7 – сдвиги; 8 – кольцевые структуры и кратеры; 9–10 – направления перемещений при рифтогенезе: 9 – сдвиговые, 10 – латеральные

онного и более позднего развития [43]. Можно предположить, что левосдвиговые смещения вдоль оси авлакогена и поперечный правый сдвиг проявились одновременно и динамически были сопряжены. В этом случае реконструируется косо-направленное растяжение рифта в направлении запад–северо-запад – восток–юго-восток (см. рис. 2). В строении многих авлакогенов также участвуют сегменты ромбовидной формы (Московский, Крестцовский, Молоковский), напоминающие структуры пулл-апарт. Морфология и характер кулисного расположения этих структур также указывают на левосдвиговые смещения.

В областях торцевого прерывания и затухания сдвиговых зон обычно формируются имбрикационные вееры растяжения и сжатия (структуры в виде конского хвоста, по [27, 59]), компенсирующие сдвиговые перемещения. Ранее было отмечено, что левосдвиговые смещения вдоль Среднерусского авлакогена компенсировали процессы растяжения в рифтовой системе Белого моря [36]. На юго-западном фланге Среднерусского авлакогена развитие имбрикационных вееров растяжения можно предполагать в пределах Валдайской и Оршанской впадин. Таким образом, структурные рисунки Среднерусской системы указывают на ее

формирование в условиях левосдвиговой трансформации.

Главные системы рифейских авлакогенов развиты вдоль палеопротерозойских поясов и шовных зон, разделяющих крупнейшие домены фундамента Восточно-Европейской платформы [3, 5, 6, 32, 43, 46, 47]. Палеопротерозойская коллизионная граница Сарматии и Волго-Уралии на всем протяжении маркируется Пачелмским (Рязано-Саратовская зона) авлакогеном. Смоленско-Московская сутурная зона, ограничивающая с юга Среднерусский и Южно-Прибалтийский палеопротерозойские орогены, контролирует Московский рифейский грабен, а также разломы и горсты Оршанской впадины. Система грабенов Среднерусского авлакогена приурочена к полосе выходов гранулитов северного крыла одноименного палеопротерозойского орогенного пояса (см. рис. 2, см. рис. 1). Юго-западное окончание этого орогена представлено Верхневолжской горизонтальной протрузией, которая имеет синформное строение, подчеркнутое полосами выходов гранулитов в крыльях структуры и их дугообразным смыканием в области ее центриклинали. Цепочка рифейских грабенов (Молоковский–Крестцовский–Валдайский–Пречистенский–Гжатский–Московский) полностью повторяет внешний контур центриклинали Верхневолжской структуры (см. рис. 2, см. рис. 1).

По данным сейсморазведки (профиль 1-ЕВ МОВ ОГТ) в основании пластин палеопротерозойских гранулитов, подстилающих Среднерусский авлакоген, развита зона сквозькорового детачмента, погружающегося в юго-юго-восточных румбах и контролирующего листрические разрывы и связанные с ними грабены [11, 32, 43, 49]. Детачмент прослеживается в основании Валдайского и Молоковского грабенов, восточнее Рыбинского водохранилища его поверхность сильно раздроблена и теряется [11, 43, 49]. Породы кристаллического фундамента, залегающие в основании Среднерусского авлакогена в зоне детачмента, имеют следующие характеристики [14, 43]:

- снижение значений скоростей продольных волн (V_p);

- присутствие пакетов высококонтрастных стратифицированных отражений, конформных поверхности фундамента (мощность более 300 м);

- проявление бластомилонитов, катаклазитов и тектонического меланжа, вскрытых Северо-Молоковской скважиной.

Таким образом, в позднем протерозое Среднерусская система авлакогенов развивалась в связи с активизацией палеопротерозойских коллизионных структур преимущественно в режиме левосдвиговой трансформации. В строении палеорифтов проявлены элементы тектоники сдвиговых зон и трансформированных детачментов [6, 32, 43, 49].

ТЕКТОНИКА ПЛИТНОГО ЧЕХЛА СРЕДНЕРУССКОГО ПОЯСА

Методы исследования

Изучение нарушений плитного чехла проводилось на основе дистанционного анализа и полевых геолого-структурных исследований. Для дешифрирования и выявления систем линейных элементов использовались цифровые модели рельефа высокого и среднего разрешения (1 и 3 с), трансформированные в карты затененного рельефа, экспозиции (аспект) и угловых характеристик склонов. При выделении линейных нарушений учитывались их соотношения с эрозионно-аккумулятивными формами ледникового рельефа, а также со структурами различных горизонтов осадочного чехла (рис. 3).

На цифровых картах рельефа отображены дугообразные валы и террасы, соответствующие образованиям донных и конечных морен, а также флювиогляциальным наносам, формировавшимся вдоль кромки отступавших ледников (см. рис. 3, а). Ледниковые морфоструктуры образуют ребристую поверхность рельефа, характерную для морен Де-Геера, по [24]. Дугообразные морфоструктуры выгнуты к юго-востоку (по направлению движения ледника), образуют фестончатые системы и выстраиваются в полосы северо-восточного простираения. Дешифрируется система линейных элементов – новейших разрывов, которые пересекают, разрушают и смещают эти ледниковые морфоструктуры. На участках сгущения линейных элементов формы ледникового рельефа теряются (см. рис. 3, а).

На цифровых картах интенсивности наклона поверхностей рельефа доступна информация о пространственном распределении линейных, дугообразных и других более сложных форм. На многих участках дешифрируются пояса преобладающего и концентрированного развития линейных элементов с закономерной ориентировкой. На смежных территориях в бортах таких поясов врезаны гидросети и водоразделы имеют дендритовидный и хаотичный характер (см. рис. 3, в).

Анализ структурных карт различных стратиграфических поверхностей позволяет идентифицировать выявленные при дешифрировании линейные элементы в качестве тектонических нарушений различного ранга. На структурных картах они выражены в сгущении, прерывании и смещении стратоизогиб, в появлении линейных узких депрессий, валлообразных поднятий и структурных носов (см. рис. 3, б, г). Отражение разрывов в современном рельефе и их секущие соотношения с ледниковыми морфоструктурами указывают на новейшие последниковые импульсы смещений. Структурные рисунки систем нарушений позволяют предварительно судить о кинематике зон деформаций.

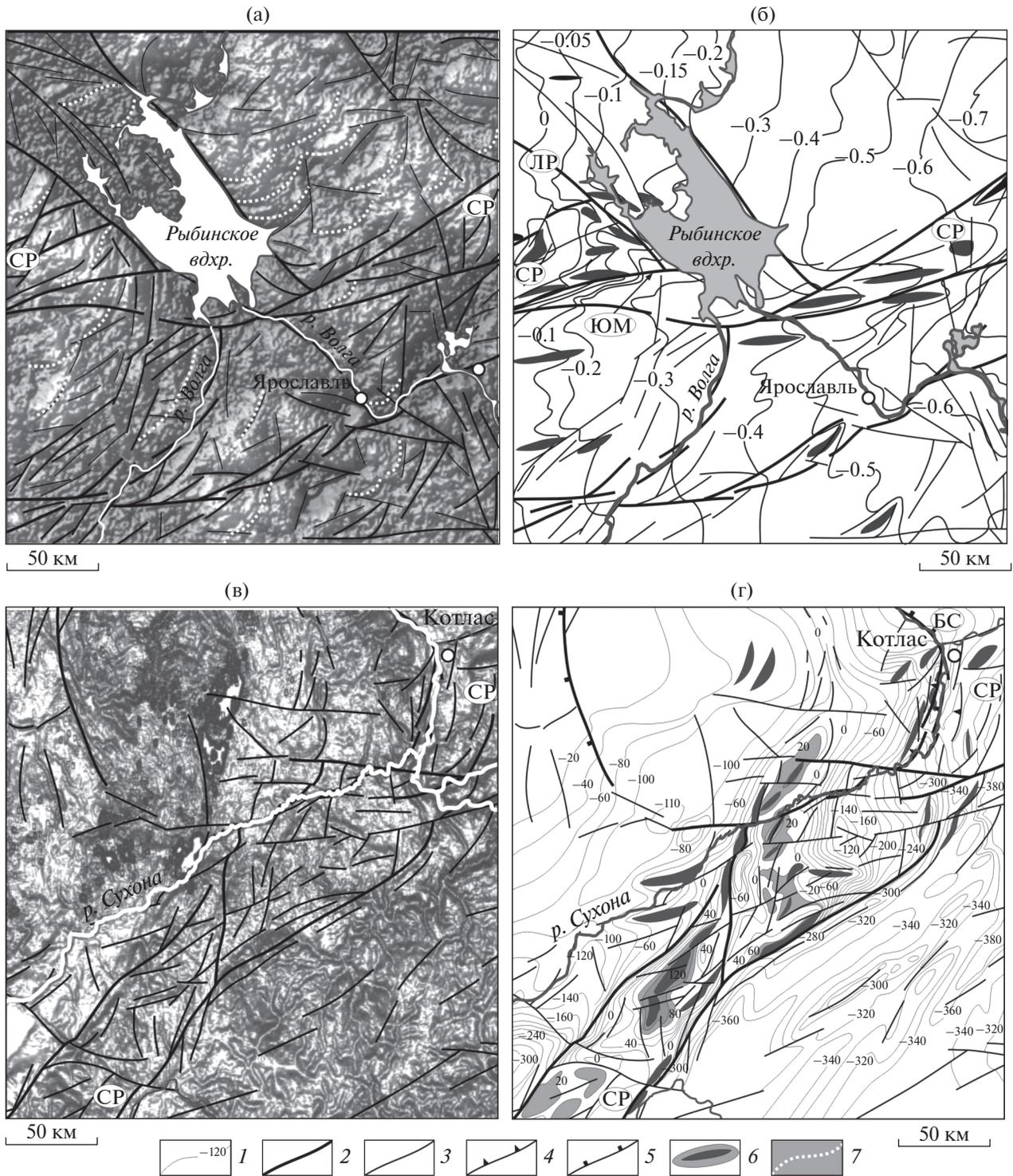


Рис. 3. Структурные схемы различных сегментов Среднерусской зоны деформаций, иллюстрирующие соотношения приповерхностных и глубинных нарушений.

(а) – Цифровая модель затененного рельефа (схема дешифрирования);

(б) – кровля верейского горизонта среднего карбона;

(в) – цифровая модель (схема дешифрирования) интенсивности наклона склонов (степень затенения рельефа нарастает с увеличением углов наклона);

(г) – кровля казанских отложений верхней перми (казанский ярус).

Тектонические зоны: СР – Среднерусская, БС – Беломорско-Северодвинская, ЛР – Ладожско-Рыбинская, ЮМ – Южно-Молоковский разлом.

1 – стратозагогипсы кровли верейского горизонта (на схеме (б)) и казанского яруса (на схеме (г)); 2–5 – разрывы: 2 – главные, 3 – второстепенные, 4 – взбросы, 5 – сбросы; 6 – тектонические вали и антиклинали; 7 – ледниковые морфоструктуры

Данные дистанционного анализа

Выявленные при дешифрировании системы линеаментов показаны на цифровых картах затененного рельефа с градационно-высотной раскраской и экспозиции склонов (рис. 4, а, б). Линеаменты обычно представлены короткими отрезками, которые выстраиваются в эшелонированные ряды и протяженные линии, либо имеют хаотичное расположение. Отмечаются широкие (10–100 км) пояса концентрированного проявления линеаментов с их закономерной продольной, диагональной и кулисной ориентировкой. Два главных наиболее протяженных пояса прослеживаются в центральной части платформы в восток–северо-восточном направлении, оконтуривая область Среднерусского палеопротерозойского орогена (см. рис. 1, см. рис. 4). В районах городов Витебск– Смоленск и Москва–Тверь–Ржев–Калуга пояса испытывают сложную виргацию и соединяются диагональными и ортогональными перемычками линеаментных зон. В плане вся эта область имеет форму треугольника, отчасти соответствующего территориям Смоленско-Московской и южной части Валдайской возвышенностей (см. рис. 4, а). По направлению к востоку и северо-востоку главные пояса пересекают Верхневолжскую низменность и прослеживаются вдоль склонов возвышенности Северные Увалы.

Главные пояса имеют субконформные соотношения с регионально выдержанными склонами северной – северо-западной и южной – юго-восточной экспозиции, которые восточнее меридиана 36° имеют зональное распространение (см. рис. 4, б). Склоны западной и восточной экспозиции подчеркивают систему субмеридиональных линеаментов, которые образуют наиболее выдержанные концентрированные пояса вдоль Валдайской возвышенности и по линии городов Касимов–Кострома–Вологда (см. рис. 4, а, б). Главные линеаментные пояса под острыми углами пересекают линии максимального распространения Днепровского, Московского и Валдайского оледенений, вдоль которых развиты мощные краевые морены (см. рис. 4, б).

Выявленные пояса линеаментов, хотя и обнаруживают некоторую конформность с крупными орографическими элементами, но прямым связям с их определенными формами не имеют. Линеаменты представлены морфоструктурами высоких порядков:

– линейными отрезками речных долин и резкими изгибами русел рек;

– линейными грядами и цепочками малых возвышенностей;

– протяженными уступами и узкими удлиненными впадинами;

– комбинированными сочетаниями различных морфоструктур, секущих эрозионно-аккумулятивные формы ледникового рельефа.

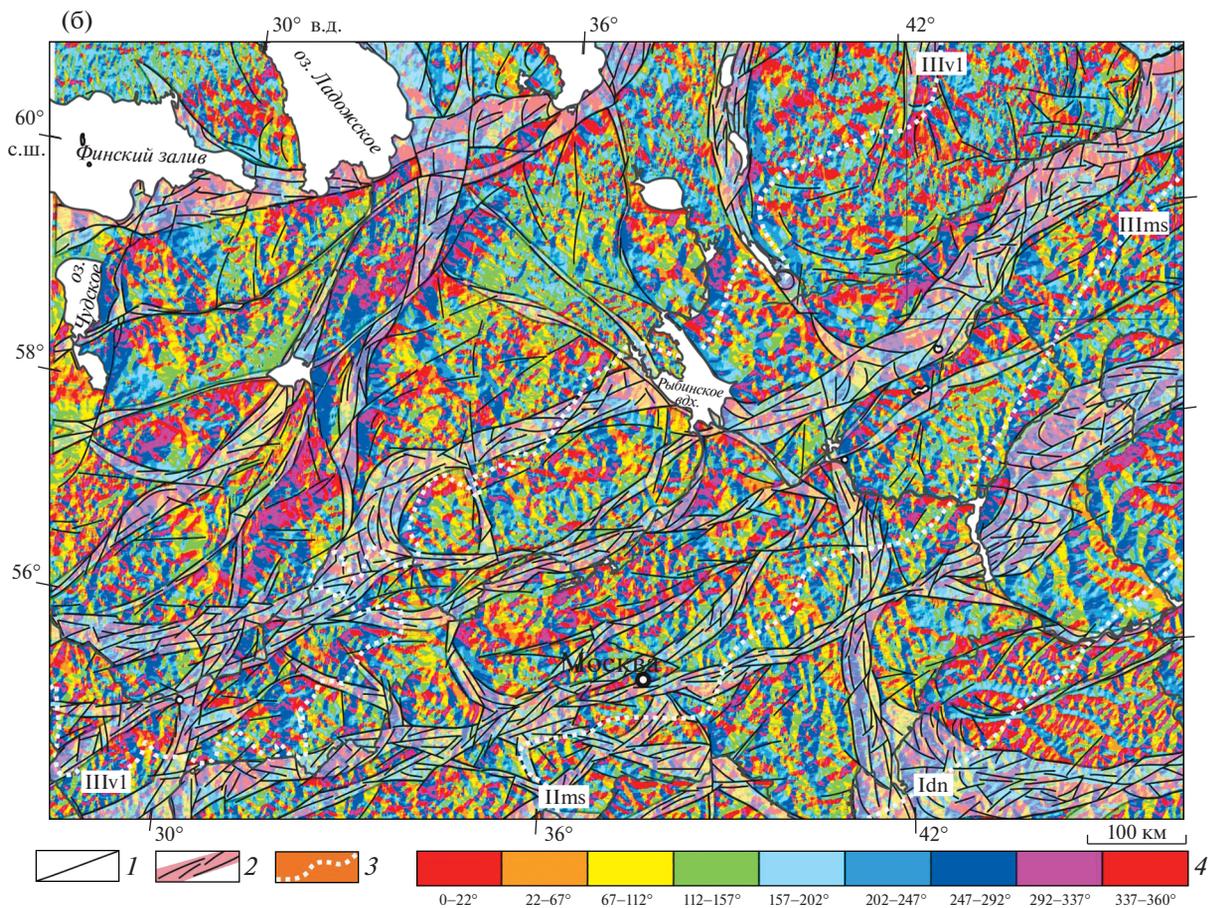
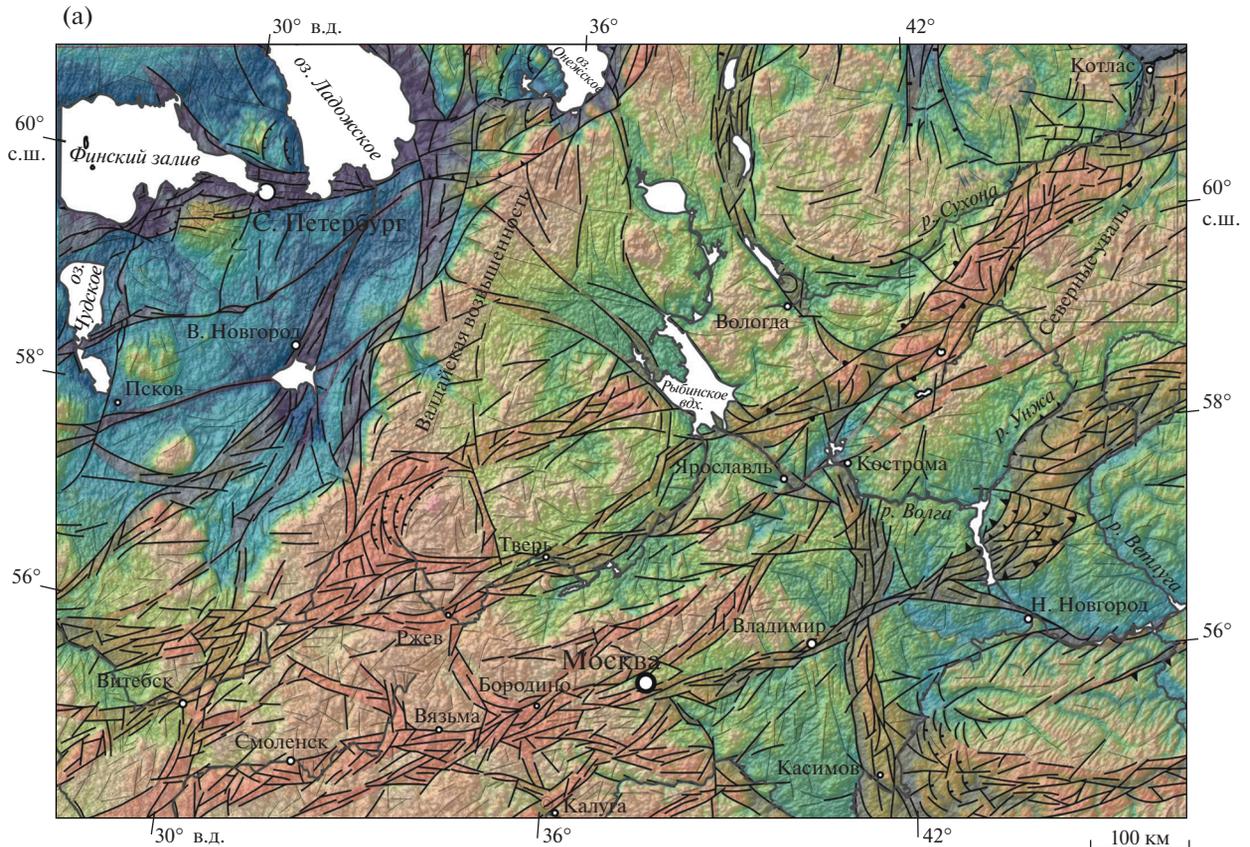
Сопоставление структур фундамента и плитного чехла

Анализ соотношений выявленных линеаментных поясов со структурами осадочного чехла и фундамента позволил идентифицировать их в качестве зон тектонических нарушений. Главные линеаментные пояса находят отражение в пликативной и дизъюнктивной тектонике осадочного чехла, в частности, в характере распределения валлообразных структур и конфигурации стратоизогипс (рис. 5, а, б). В центральной части Восточно-Европейской платформы крупнейшими по геометрическим параметрам структурами являются Среднерусская, Смоленско-Московская и Владимир-Вятская зоны, которым на поверхности соответствуют главные пояса концентрированного проявления линеаментов. Смоленско-Московская и Владимир-Вятская зоны являются сегментами более крупного тектонического нарушения. В пределах зон отмечаются многочисленные деформации осадков чехла, которые отчасти совмещены с областью развития краевых напорных морен Московского оледенения, а на западе – Валдайского (см. рис. 4, б). Зоны разделены поперечной субмеридиональной Иваново-Касимовской зоной (см. рис. 5).

В осадочном чехле зоны нарушений Среднерусского пояса выражены интенсивным развитием трещиноватости и малоамплитудных разрывов, рассредоточенных в широкой полосе. Стратоизогипсы кровли верейского горизонта в пределах зон образуют высокоградиентные полосы, соответствующие разрывам и флексурам, образуют центриклинальные и периклиналильные изгибы, окаймляют мелкие и крупные валы, которые образуют линейные и диагонально-кулисные цепочки (см. рис. 5, б).

В пределах и в непосредственной близости от Смоленско-Московской и Владимир-Вятской зон располагаются кольцевые структуры, наиболее крупные из которых располагаются в районе городов Калуги, Вязьмы и к северу от Нижнего Новгорода (см. рис. 5, б). Кольцевые структуры

Рис. 4. Система линеаментов центральной части Восточно-Европейской платформы.
(а) – Цифровая модель затененного рельефа с градационной высотной раскраской (схема дешифрирования);
(б) – цифровая модель (схема дешифрирования) экспозиции склонов (размер ячейки осреднения данных 150 пикселей).
1 – линеаменты; 2 – пояса сгущения линеаментов; 3 – линии максимального распространения днепровского ($I_{дн}$), московского ($II_{мс}$), валдайского ($III_{вл}$) оледенений; 4 – градационная шкала азимутальных направлений экспозиции склонов



обычно представлены глубокими кратерами, осложняющими их центральными поднятиями и периферийными кольцеобразными валами. Эти особенности позволяют рассматривать их в качестве астроблем [12]. Существуют и альтернативные представления об эндогенно-тектоническом происхождении рассматриваемых структур [7, 14, 23].

В целом рассматриваемым зонам нарушений свойственны структурные рисунки, характерные для сдвиговых зон с сочетанием продольных, диагональных и ступенчатых разрывов, кулисно-эшелонированных валов и складок (см. рис. 5, а). Дешифрируются локальные структуры пулл-апарт и сдвиговые дуплексы. На флангах и изгибах некоторых зон отмечаются имбрикационные вееры нарушений.

Рассматриваемые зоны нарушений плитного чехла располагаются внутри и вдоль границ Среднерусского палеопротерозойского орогена. Среднерусская зона деформаций развита вдоль северной окраины одноименного орогенного пояса и на всем протяжении соответствует главной ветви рифейских палеорифтовых структур – Среднерусскому авлакогену (рис. 6, а). Смоленско-Московская и Владимир-Вятская зоны нарушений плитного чехла маркируют на поверхности палеопротерозойскую сутурную зону, отделяющую Южно-Прибалтийский и Среднерусский палеорогенные пояса от крупных доменов фундамента – Сарматии и Волго-Уралии. В основании Смоленско-Московской зоны располагаются крупные рифейские структуры – Московский грабен, система разломов и горстов Оршанской впадины. Владимир-Вятская зона расположена на границе Московской синеклизы и Волго-Уральской антеклизы (см. рис. 6, а). За пределами рассматриваемой территории зона пространственно связана с рифейским Вятско-Кажимским авлакогеном. Субмеридиональная Иваново-Касимовская зона пересекается с рассмотренными выше нарушениями. Южный сегмент зоны пространственно совпадает с рифейским Касимовским грабеном, над которым в отложениях чехла развит инверсионный Окско-Цнинский мегавала [32] (см. рис. 5, см. рис. 6, а).

В строении Среднерусского пояса деформаций участвуют второстепенные тектонические

зоны – Тверская, Галичская и Гжатская, – унаследованные нарушениями фундамента различного ранга (см. рис. 6, а). В западной части палеопротерозойского Среднерусского пояса малопротяженные зоны нарушений чехла образуют ветвистую систему, конформно повторяющую область замыкания палеорогена во фронтальной части Верхневолжской протрузии (см. рис. 1, см. рис. 6, а). На продолжении Тверской зоны расположена одна из ветвей Полоцко-Курземского пояса деформаций [7, 31].

ТЕКТОНИКА СРЕДНЕРУССКОЙ ЗОНЫ СДВИГА

Среднерусская зона деформаций приурочена к северной окраине одноименного пояса и прослеживается на протяжении более 1000 км в восток-северо-восточном направлении (см. рис. 5, см. рис. 6). Зона относительно хорошо изучена нефтепоисковым бурением и сейсмопрофилированием, что позволило выявить в ее пределах большое количество мелких и крупных тектонических валов, разрывов и флексур (см. рис. 5, б, см. рис. 3). На уровне фундамента зона приурочена к северному крылу Среднерусского палеопротерозойского пояса и повторяет очертания одноименного рифейского авлакогена (см. рис. 6, а). В строении Среднерусской зоны, помимо конформных нарушений, участвуют системы поперечных и диагональных разрывов северо-западного и субширотного простирания, которые контролируют изгибы главной зоны. Наиболее крупный изгиб отмечается в районе пересечения Среднерусской зоны с Ладожско-Рыбинской системой правых сдвигов, сформировавшихся в рифее [43]. На юго-западном фланге зоны развит имбрикационный веер, выраженный системой дугообразных уступов рельефа, по морфологическим признакам соответствующих листрическим сбросам (см. рис. 5, а). Во многом аналогичный имбрикационный веер располагается на северо-восточном фланге Среднерусской зоны в области ее ортогонального сочленения с Беломорско-Северодвинской зоной (см. рис. 5, а).

Над рифтовыми трогами Среднерусского авлакогена в осадках чехла развит Рыбинско-Сухонский мегавал, прослеженный в центральной и се-

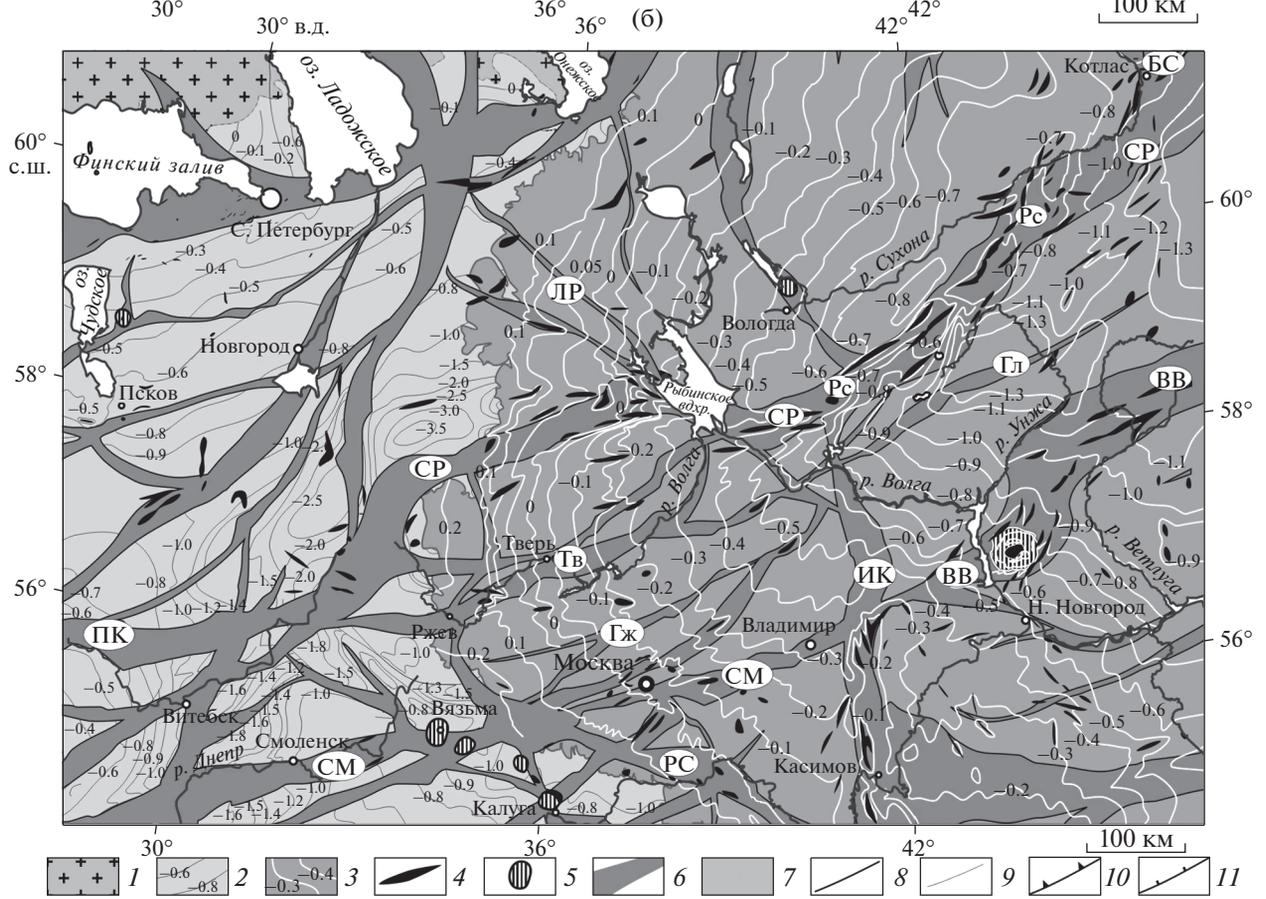
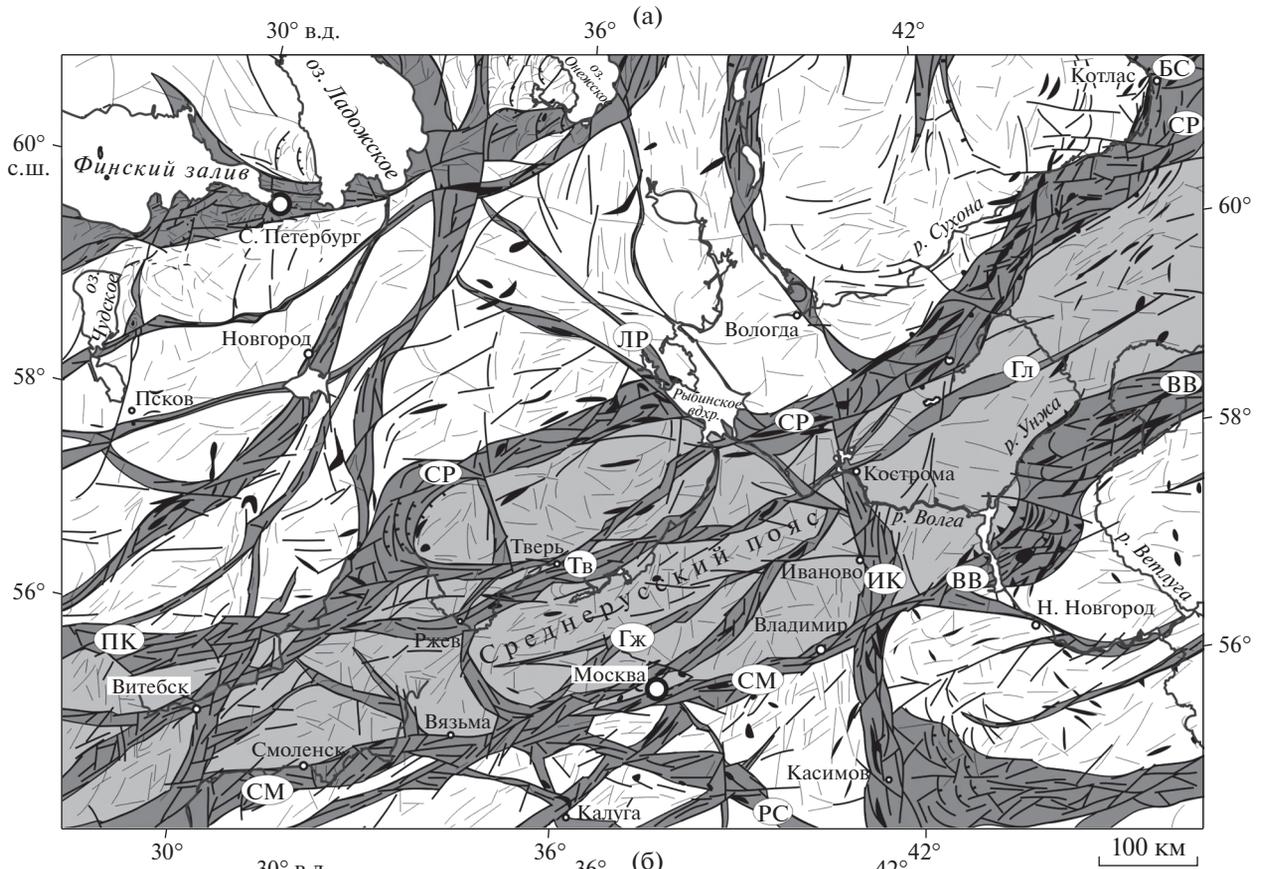
Рис. 5. Центральная часть Восточно-Европейской платформы.

(а) – системы линейных нарушений, выраженных в рельефе (структурная схема);

(б) – пространственные соотношения зон концентрации линейных нарушений, структур плитного чехла и кровли фундамента.

Тектонические зоны: СР – Среднерусская, СМ – Смоленско-Московская, ВВ – Владимир-Вятская, ЛР – Ладожско-Рыбинская, БС – Беломорско-Северодвинская, ПК – Полоцко-Курземская, Тв – Тверская, Гл – Галичская, Гж – Гжатская, ИК – Иваново-Касимовская, РС – Рязано-Саратовская; Рс – Рыбинско-Сухонский мегавал.

1 – выходы на поверхность пород фундамента; 2 – изогипсы кровли фундамента; 3 – изогипсы кровли верейского горизонта среднего карбона; 4 – тектонические валы; 5 – кольцевые структуры и кратеры; 6 – зоны концентрации линейных нарушений; 7 – Среднерусский пояс (на схеме (а)); 8–11 – линеаменты и разрывные нарушения: 8 – главные, 9 – второстепенные, 10 – взбросы, 11 – сбросы



веро-восточной части зоны на протяжении 600 км (см. рис. 5, б). Он имеет признаки конседиментационного развития и разделяет Московскую синеклизу на две обособленные впадины [8]. Мегавал осложняют валы и складки второго порядка, имеющие продольную, либо диагональную по отношению к оси мегавала ориентировку. Складчатые структуры часто образуют кулисные ряды, характерные для зон левого сдвига (см. рис. 3, б, г, см. рис. 5).

Глубинное строение Среднерусской зоны характеризуют несколько разрезов, построенных вдоль буровых и сейсмических профилей [41, 43]. Линии разрезов показаны на схеме (см. рис. 6, б). Сейсмический образ коры вдоль фрагмента геотраверса 1-ЕВ показал важную закономерность: разрывные нарушения Среднерусской зоны по мере погружения выполаживаются и на глубинах 8–20 км сливаются с зонами пологих detachментов (рис. 7). Пологие нарушения рассматриваются в качестве палеопротерозойских надвигов, ограничивающих тектонические покровы северного крыла Среднерусского палеорогена [11]. По отношению к рифтогенным структурам рифея эти же нарушения представляют собой пологие сбросы, связанные с глубинным detachментом [43]. На уровне кровли фундамента разрывы контролируют асимметричный рифей–ранневендский Молоковский грабен, имеющий крутое южное крыло, ограниченное Южно-Молоковским разломом, и – полого-ступенчатое северное крыло (см. рис. 7). Суммарная амплитуда сбросовых смещений кровли фундамента вдоль Южно-Молоковской зоны разломов превышает 1600 м. В пологом северном крыле грабена Северо-Молоковская скважина вскрыла верхнюю часть разреза зоны detachмента, представленной проявлением меланжа и бластомилонитов [43]. Большинство разрывов проникает в осадки плитного чехла, угасая на разных уровнях разреза в основании крупных стратиграфических несогласий (см. рис. 7). Некоторые разломы достигают поверхности. Амплитуды и направления перемещений вдоль разрывов меняются.

Строение Среднерусской зоны к юго-западу и северо-востоку от узла ее пересечения с Ладож-

ско-Рыбинским разломом несколько меняется (рис. 8). В северо-восточном сегменте существенно возрастают амплитуды вертикальных перемещений в осадках чехла, и появляется резко обособленный Рыбинско-Сухонский инверсионный мегавал, в основании которого развиты рифей–ранневендские рифтогенные структуры (см. рис. 8, а). В юго-западном сегменте вместо вала обособлен инверсионный горст, осложненный пологими валами и мелкими складками (см. рис. 8, б).

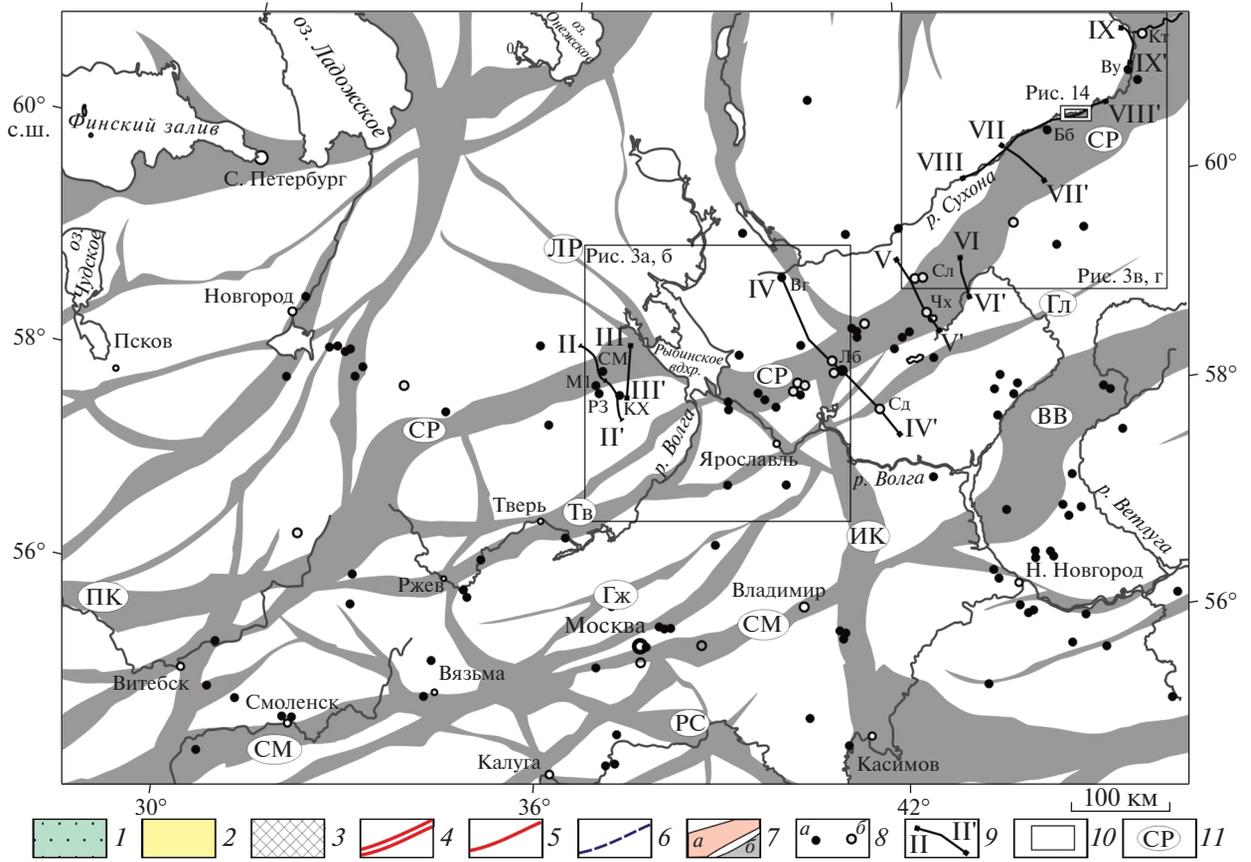
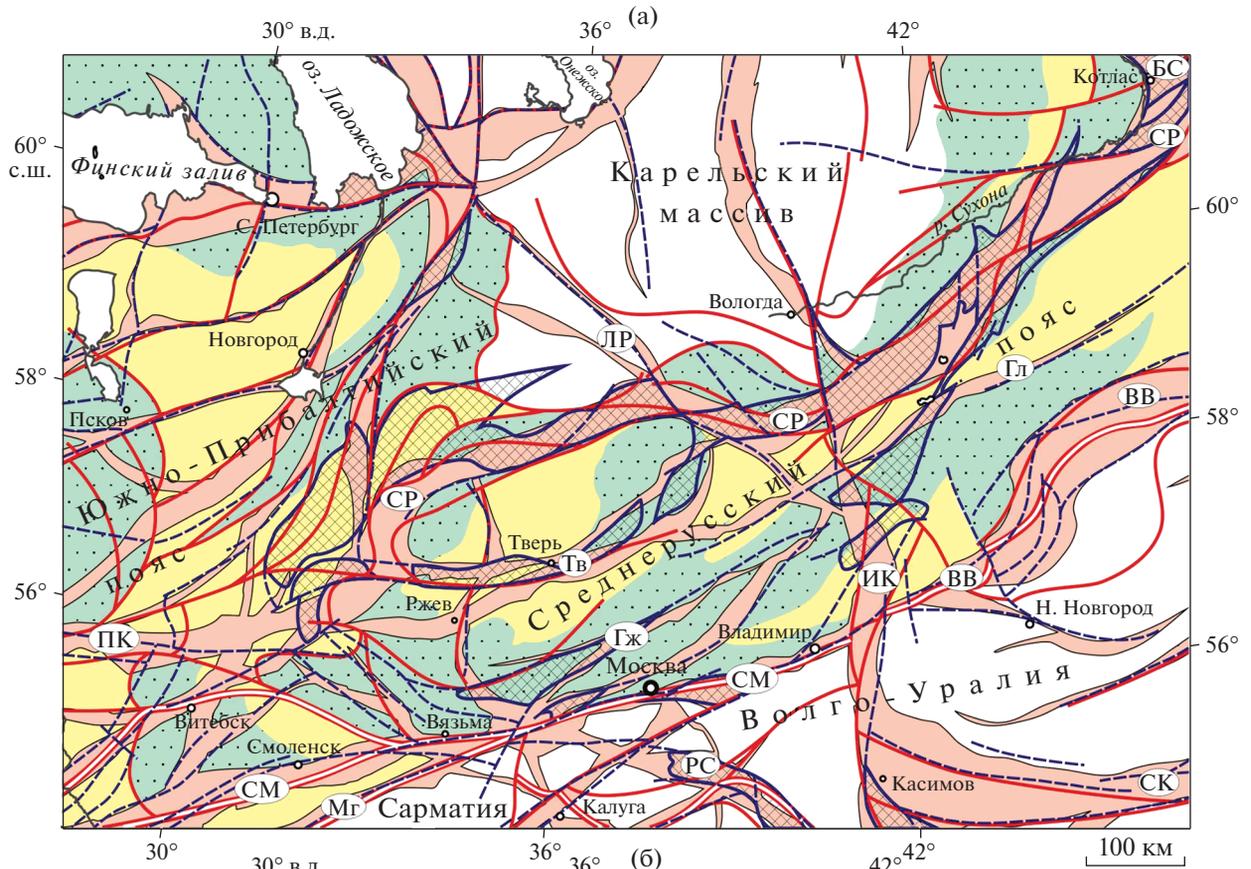
Реконструкции этапов перемещений

Стратиграфические и угловые несогласия, показанные на разрезах, являются признаками изменений условий седиментации и общей геодинамической обстановки (см. рис. 8). Анализ соотношений этих поверхностей со структурами Среднерусской зоны позволяет наметить несколько этапов тектонических перемещений. Снижение амплитуд вертикального поднятия Рыбинско-Сухонского мегавала происходит неравномерно. Соотношения мощностей осадков верхнего венда и нижнего кембрия в крыльях и ядре мегавала показывают, что в соответствующий период времени формировалось конседиментационное поднятие с видимой амплитудой 800–700 м (см. рис. 8, а). В вышележащих толщах кембрия–ордовика видимая амплитуда мегавала снижается до 300–200 м во многом за счет прерыва в осадконакоплении и размыва в начале девона. В толщах девона – перми поднятие имеет наложенный постседиментационный характер и охватывает локальные прогибы франского времени. Повышенные мощности соответствующих толщ в ядре мегавала обусловили увеличение значений видимых амплитуд поднятия до 300 м и более. Плавное снижение амплитуд поднятия мегавала начинается от подошвы триаса (200 м) к нижним горизонтам мела (150 м).

Палинспастические реконструкции последовательного изменения вертикальных амплитуд смещений Южно-Молоковского разлома Среднерусской зоны позволили выявить несколько стадий перемещений [36]. В наших построениях

Рис. 6. Элементы тектоники центральной части Восточно-Европейской платформы.

(а) – структурная схема соотношений крупнейших нарушений фундамента, кровли фундамента и плитного чехла; (б) – местоположение сейсмических и геолого-структурных разрезов, скважин и участков детальных работ.
Зоны нарушений: СР – Среднерусская, СМ – Смоленско-Московская, ВВ – Владимир-Вятская, ЛР – Ладожско-Рыбинская, БС – Беломорско-Северодвинская, ПК – Полоцко-Курземская, Тв – Тверская, Гл – Галичская, Гж – Гжатская, ИК – Иваново-Касимовская, РС – Рязано-Саратовская; *скважины:* СМ – Северо-Молоковская, М1 – Молоково 1, РЗ, КХ – Краснохолмская, Вг – Вологодская, Лб – Любимские, Мг – Могилевская, СК – Сурско-Камская, Сд – Судиславская, Сл – Солигаличская, Чх – Чухломская, Бб – Бобровская, Ву – Великоустюгская, Кт – Котласская.
 1–2 – Среднерусский и Южно-Прибалтийский палеопротерозойские орогены; 1 – пояса гранулитогнейсов, 2 – тектонизированные в палеопротерозое различные породы; 3 – рифей–ранневендские авлакогены; 4–5 – тектонические нарушения фундамента: 4 – главные шовные зоны, 5 – разломы различного ранга; 6 – разломы, выраженные в рельефе кровли фундамента; 7 – зоны деформаций плитного чехла: а – на схеме (а), б – на схеме (б); 8 – скважины: а – вскрывшие фундамент, б – не вскрывшие фундамент; 9 – линии сейсмических и геолого-структурных разрезов; 10 – участки работ; 11 – тектонические зоны и структуры



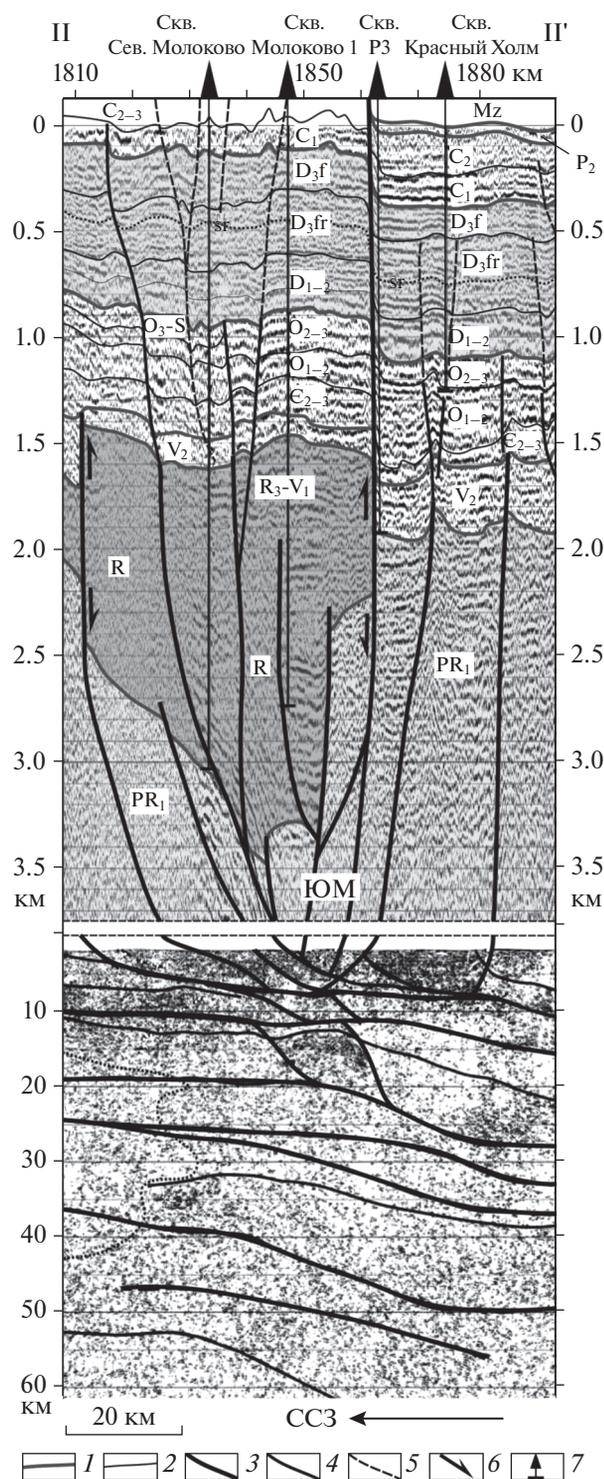


Рис. 7. Фрагмент сейсмического профиля 1-ЕВ, пересекающего Среднерусскую зону по линии II–II' (по данным [11, 41], с изменениями и дополнениями). Обозначен разлом (аббревиатура): ЮМ – Южно-Молоковский.

1 – главные поверхности несогласий; 2 – стратиграфические границы; 3–5 – разломы: 3 – главные, 4 – второстепенные, 5 – малоамплитудные; 6 – направления видимых смещений; 7 – скважины

для расчетов были использованы стратиграфические разрезы опорных скважин Молоково 1 и Р-3, расположенных вдоль профиля 1-ЕВ в противоположных бортах Южно-Молоковского разлома [41] (см. рис. 7, см. рис. 8, б). При реконструкции использовалась процедура последовательного приведения к горизонтальной плоскости поверхностей различных стратиграфических горизонтов, смещенных по разлому, в последовательности от верхних частей разреза к нижним частям. В правой части реконструкции показана современная позиция горизонтов относительно разлома (рис. 9). В направлении справа налево проводилось последовательное совмещение поверхностей стратиграфических несогласий в основании среднего и нижнего карбона, верхнего и среднего девона, верхнего и нижнего ордовика, кембрия и верхнего венда. Левая крайняя реконструкция характеризует первоначальную амплитуду смещения по разлому в рифее. Видимые амплитуды смещений для каждого этапа замерылись в верхних слоях. Незначительные изменения мощностей толщ на коротком расстоянии между скважинами не учитывались.

Результаты построений представлены в виде девяти вертикальных реконструкций разрезов в бортах Южно-Молоковского разлома (см. рис. 9). Каждая из них характеризует определенную стадию перемещений вдоль нарушения и позволяет оценить направление и, приблизительно, амплитуду смещения. Стадии смещений распределены в соответствии с этапами тектонического развития территории, выраженными региональными поверхностями несогласий. В байкальский этап (рифей–начало кембрия) проявилось две стадии перемещений. На ранней стадии проявился сброс (амплитуда ~1620 м), на поздней – взброс (амплитуда ~50 м). Каледонский этап (кембрий–ранний девон) охарактеризован тремя стадиями перемещений с ранней сбросовой и более поздними взбросовыми смещениями. На раннегерцинском этапе (средний девон–ранний карбон) ситуация повторяется – ранние сбросовые смещения опять сменяются взбросовыми в конце этапа. Позднегерцинский (средний карбон–ранний триас) и альпийский этапы объединены ввиду отсутствия мезозойских отложений в северном борту разлома. Это позволило выявить только две стадии взбросовых перемещений (амплитуда 25 и 200 м) по смещениям различных толщ карбона (см. рис. 9).

Реконструкция показывает цикличность развития Южно-Молоковского разлома. Установленная стадийность, вероятно, имеет региональное проявление, что подтверждают во многом аналогичные результаты анализа стадий формирования Рыбинско-Сухонского мегавала и ряда других структур центральных областей Восточно-Европейской платформы [8, 18, 38]. От позднего

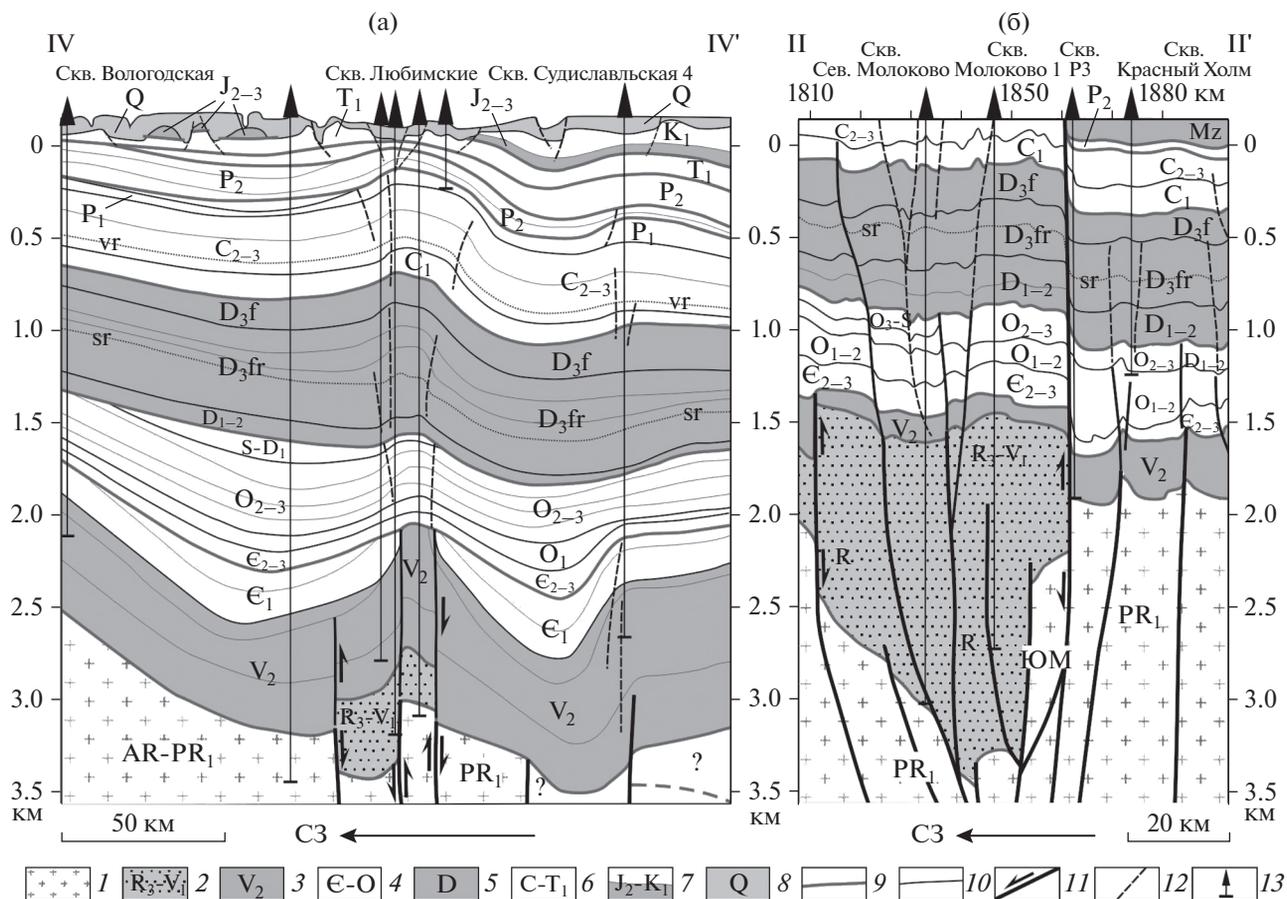


Рис. 8. Геолого-структурные разрезы, пересекающие Среднерусскую зону по линиям IV–IV' (а) и II–II' (б) (по данным [15, 41], с изменениями и дополнениями).

Обозначен разлом (аббревиатура): ЮМ – Южно-Молоковский.

1 – архей–палеопротерозойский фундамент; 2–8 – осадочные отложения: 2 – верхнего рифея–нижнего венда, 3 – верхнего венда, 4 – кембрия–ордовика, 5 – девона, 6 – карбона–нижнего триаса, 7 – средней юры – нижнего мела, 8 – квартера; 9 – поверхности главных стратиграфических несогласий; 10 – стратиграфические границы; 11 – разломы и видимые смещения по ним; 12 – малоамплитудные нарушения; 13 – скважины

рифея и до новейшего времени Среднерусская зона испытала более девяти импульсов подвижности и не менее шести кинематических инверсий. Учитывая, что для данной зоны характерны сдвиговые ансамбли структур, можно полагать, что отмеченные на разрезе колебательные сброс-взбросовые перемещения отражают циклическое чередование обстановок трансенсии и транспрессии, а также проявления многократных кинематических инверсий (по [29]).

Структурные парагенезы северо-восточного сегмента Среднерусской зоны

Крупнейшим тектоническим элементов северо-восточной части Среднерусской зоны является Рыбинско-Сухонский мегавал (см. рис. 5, б). Его осложняют многочисленные разрывы и флексуры, а также складки высокого порядка (рис. 10). В плане складчатые и разрывные струк-

туры образуют продольные и диагонально-кулисные системы, характерные для зон левого сдвига (см. рис. 3, г). Разрывы прослеживаются от поверхности до фундамента и сливаются на глубине с разрывами, ограничивающими рифтогенные комплексы Среднерусского авлакогена (см. рис. 10, б). Направления и амплитуды смещений по восстанию разрывов меняются: глубинные сбросы надстраиваются взбросами и, наоборот, – взбросы в фундаменте сменяются сбросами в чехле (см. рис. 10, б). Вблизи поверхности разрывы смещают толщи мезозоя, включая отложения нижнего мела, с амплитудами более 100 м (см. рис. 10, а, б, г). Многие нарушения выражены в морфологии дочетвертичного и современного рельефа (рис. 8, а, см. рис. 10).

Рыбинско-Сухонский мегавал и осложняющие его второстепенные складки, как правило, ассиметричны и имеют наклонные осевые плоскости (см. рис. 10). Вдоль простирания Средне-

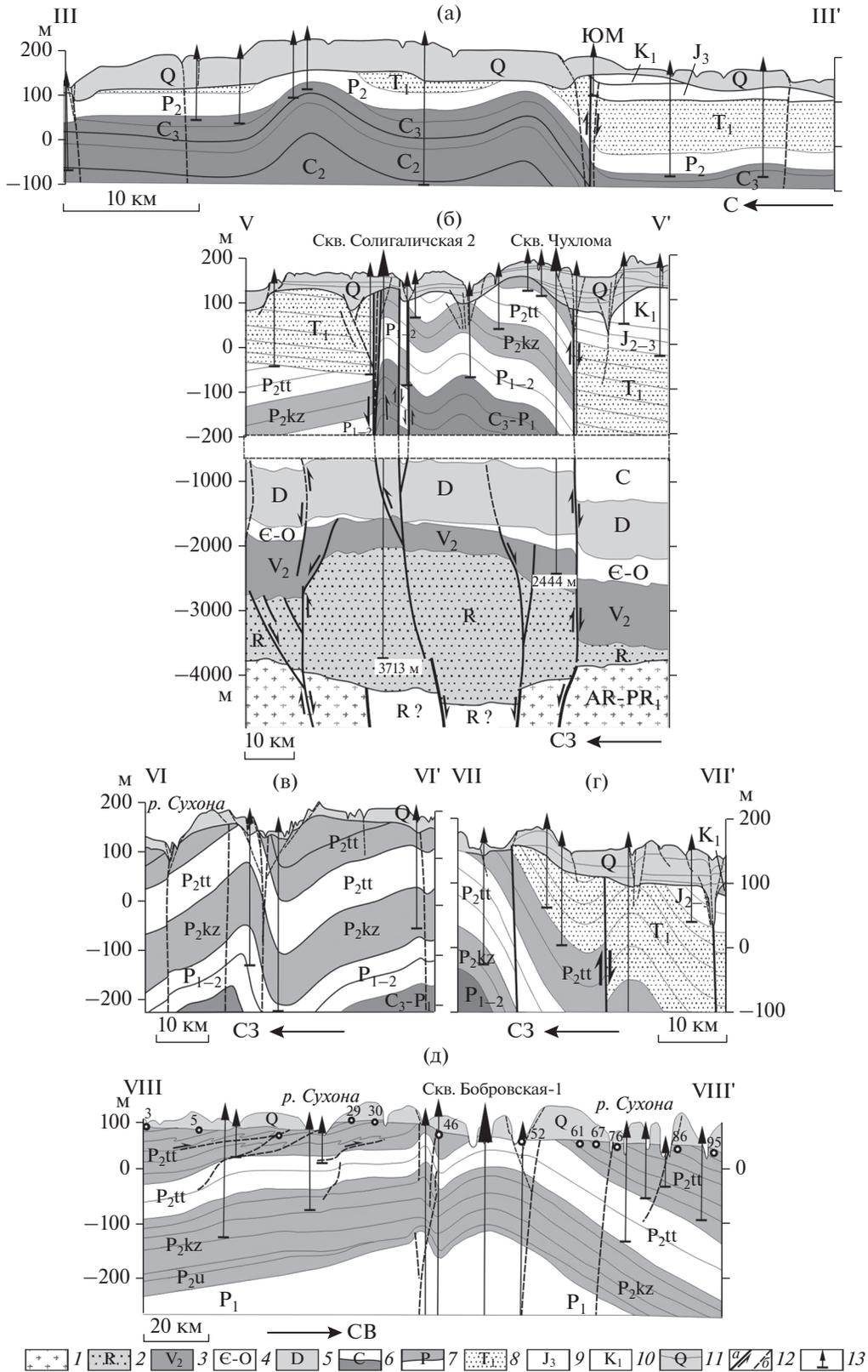


Рис. 10. Геолого-структурные разрезы, пересекающие Среднерусскую зону по линиям III–III' (а), V–V' (б), VI–VI' (в), VII–VII' (г), VIII–VIII' (д).

1 – архей – палеопротерозойский фундамент; 2–8 – осадочные отложения: 2 – рифея – нижнего венда, 3 – верхнего венда, 4 – кембрия – ордовика, 5 – девона, 6 – карбона, 7 – перми, 8 – нижнего триаса; 9 – верхней юры; 10 – нижнего мела; 11 – квартера; 12 – разрывы и направления премещений: а – главные, б – второстепенные малоамплитудные; 13 – скважины

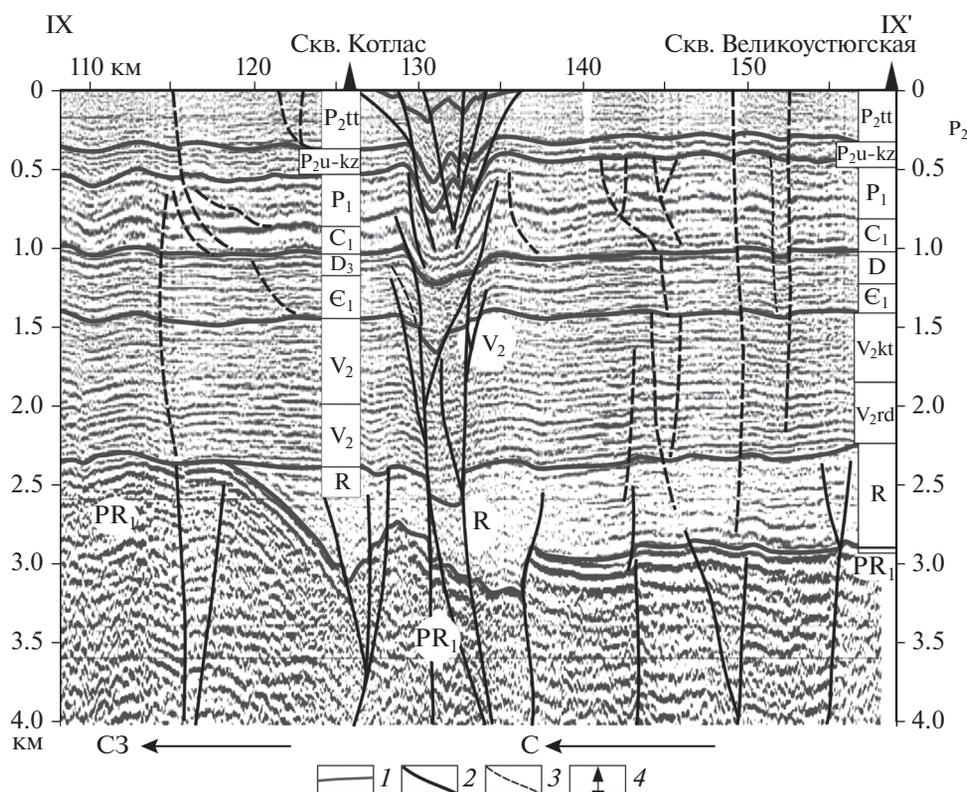


Рис. 11. Сейсмический профиль в район г. Котлас, пересекающий Среднерусскую зону по линии IX–IX' (по данным [43], с изменениями и дополнениями).

1 – главные поверхности несогласий; 2 – разломы; 3 – малоамплитудные нарушения; 4 – скважины

Вдоль нарушений отмечаются различные тектониты: брекчии и катаклазиты, жилки кальцита и гипса, милониты и сланцеватость, образующие зоны шириной до нескольких метров (см. рис. 12, а).

Наиболее распространены зоны сгущения трещиноватости и малоамплитудных разрывов. Они образуют широкие (сотни метров) пояса, для которых характерны закономерные сочетания трещин разного типа. Можно отметить случаи совмещенного в пространстве сочетания систем сопряженных трещин и сколов Риделя (R, R'), которые выстраиваются в линейные ступенчатоконусные и линзовидные системы (см. рис. 12, б). Сопряженные трещины образуют ромбовидную структуру и пересекаются под острыми углами (углы скалывания 60° – 70°), которые позволяют определить ориентировку оси сжатия (вдоль биссектрисы острого угла). Распределение сколов Риделя характеризует разные стадии развития магистрального сдвига (L) – от начального зарождения кулисы синтетических сколов (R-сколы, в правой части снимка) до их слияния с другими типами трещин (R', R, отрывы, мостиковые перегибки) в линзовидную систему (см. рис. 12, б, левая часть снимка). Выявленные эволюционные последовательности являются закономерными и обоснованы аналоговыми экспериментами и эмпирически [33, 44, 48].

Широко распространены взбросы и сбросы, имеющие в разрезе ступенчатую конфигурацию (см. рис. 12, в, г). При этом крутопадающие отрезки разрывов периодически преломляются и сменяются пологими, в которых смещения происходят вдоль реологически ослабленных слоев (глин, мергелей). В случаях сбросовых смещений такие пологие поверхности представляют собой рамповые структуры локального сжатия, но для взбросов, наоборот, – локальной декомпрессии.

Пликативные структуры, наблюдаемые в обнажениях, представлены разнообразными формами (рис. 13). Пологие флексур и открытые складки с углами падения крыльев 5° – 10° отмечаются на многих участках. Сжатые приразломные складки локализованы узкими системами вдоль сдвига-взбросов и надвигов. Асимметричные складки сопровождают пологие поверхности субслоистых срывов и детачментов. Серии мелких (0.1–1 м) складок волочения локализованы в пластичных слоях и прослеживаются на многих уровнях видимого разреза. Более крупные складки приурочены к сегментам угасания детачментов и их рамповым изгибам (см. рис. 13, а, б). Эти структуры часто имеют морфологию шевронных кинк-складок и образуются как реакция на торможение скольжения вдоль надвигового рампа, а также на окончании детачментов, компенсируя

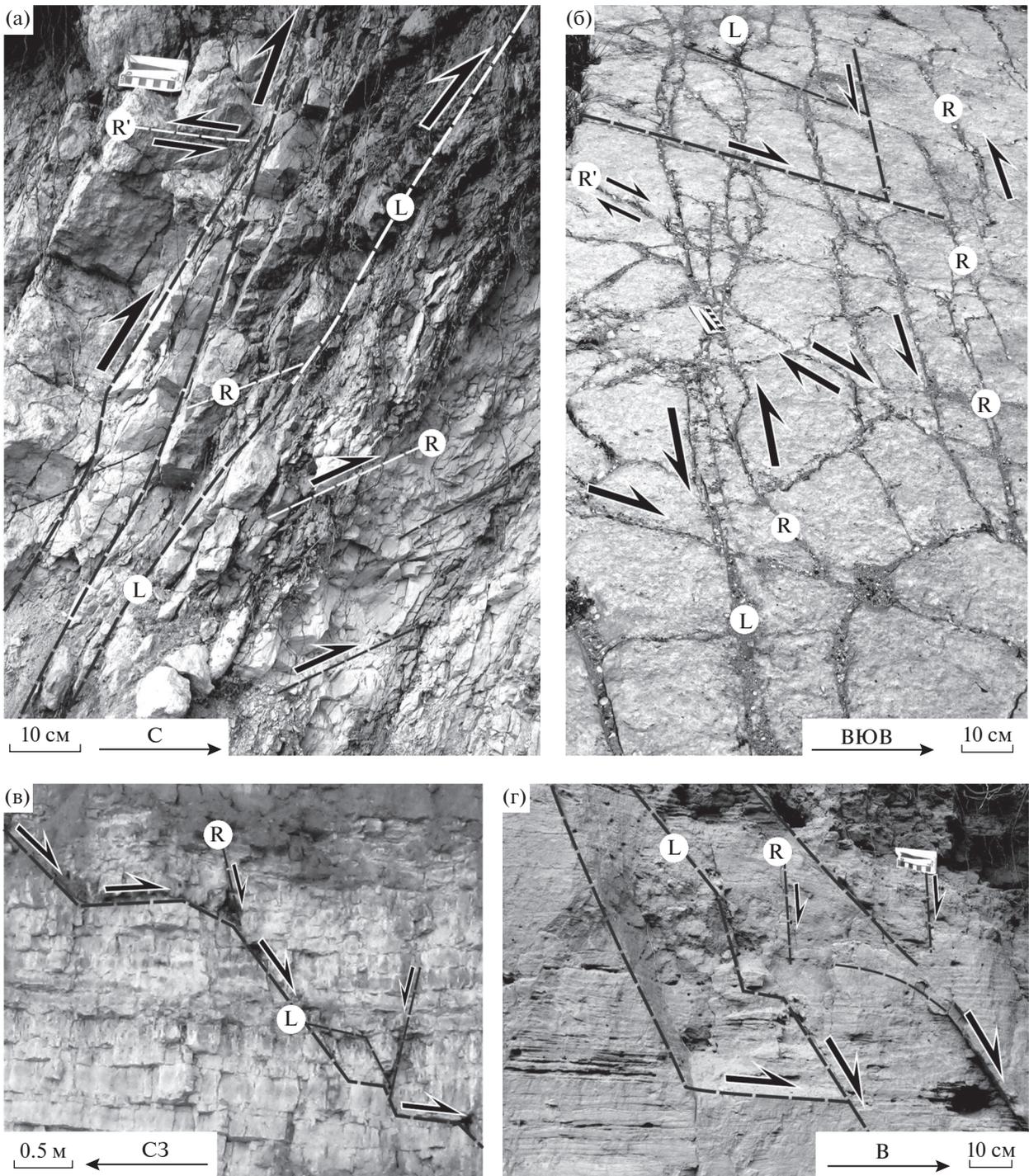


Рис. 12. Фотографии дизъюнктивных нарушений с закономерным сочетанием магистральных (L), синтетических (R) и антитетических (R') склоров Риделя.
 (а) – Зона взброса с проявлением милонитов, сланцеватости и оперяющих склоров Риделя: известняки, мергели и аргиллиты татарского яруса (вид в разрезе);
 (б) – зона рассредоточенного сдвига с системами кулисных склоров R, линзовидными структурами и сопряженными трещинами, образующими ромбовидную отдельность: мергели татарского яруса (вид в плане);
 (в) – ступенчатый сброс: известняки казанского яруса (вид в разрезе);
 (г) – ступенчатые сбросы: пески и глины квартера (вид в разрезе).

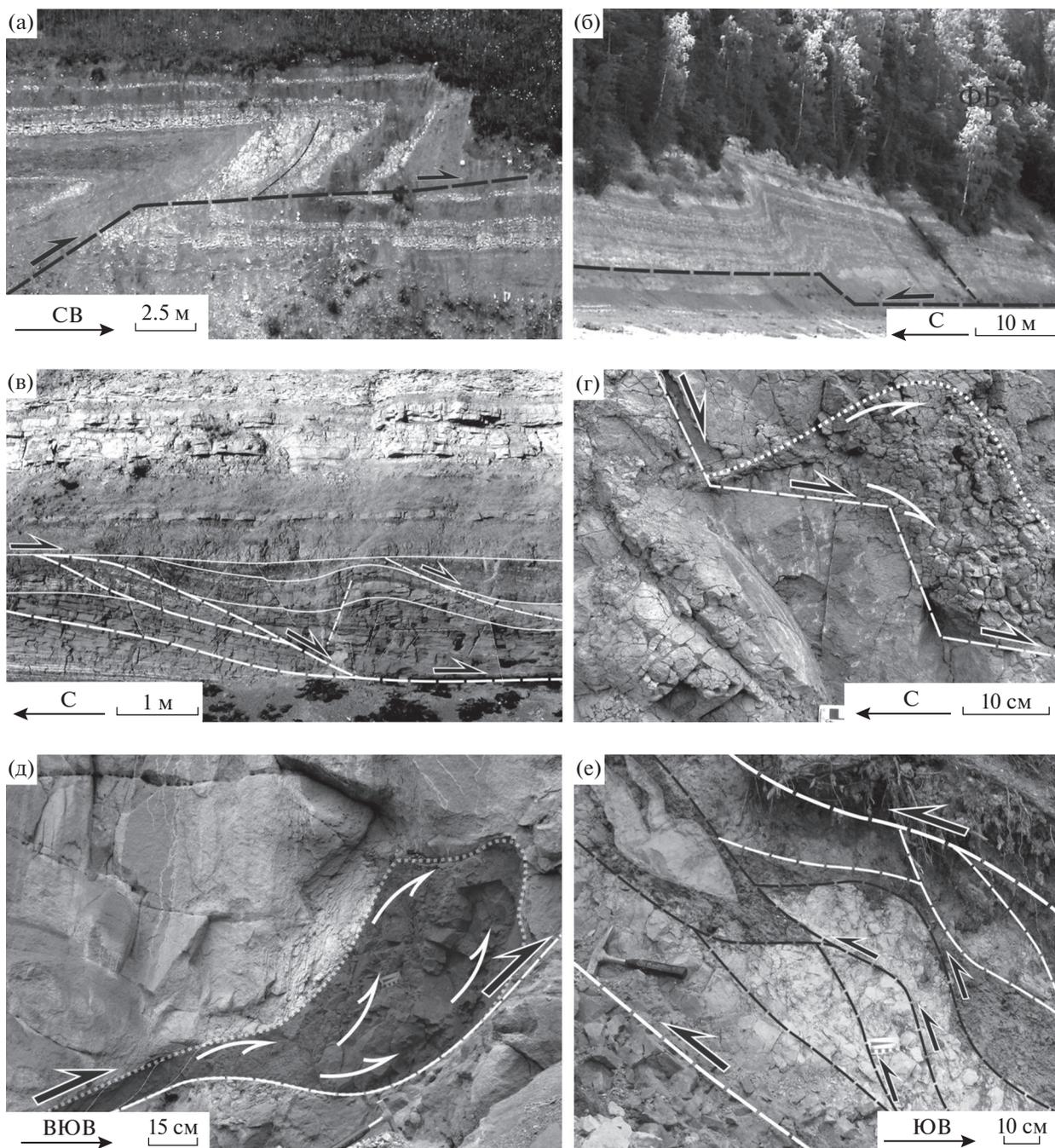


Рис. 13. Фотографии складчатых и разрывных нарушений в отложениях татарского яруса.
 (а–б) – надрамповые асимметричные складки, связанные с зонами субслоного детачмента (вид в разрезе);
 (в) – попутный скольжению изгиб зоны субслоного детачмента и надрамповая грабен-синклиналь (вид в разрезе);
 (г) – ступенчатый сброс, препятствующий скольжению изгиб и комковатая брекчия выжимания в область разгрузки (вид в разрезе);
 (д) – инъекционная структура выжимания глинистых пород в области попутного скольжению изгиба поверхности взбросо-надвига (вид в разрезе);
 (е) – надвиговые дуплексы, образующие структуру хорс (вид в разрезе).

надвиговые перемещения. Вдоль рамповых изгибов детачментов, имеющих попутный наклон по отношению к направлению смещений, формируются дуплексы растяжения и надрамповые грабен-синклинали (см. рис. 13, в).

Многочисленные дизъюнктивно-пликативные деформации связаны с рамповыми изгибами крутопадающих и пологих разрывов. К ним относятся комковатые брекчии выдавливания, например, из рампового уступа сброса в область деком-

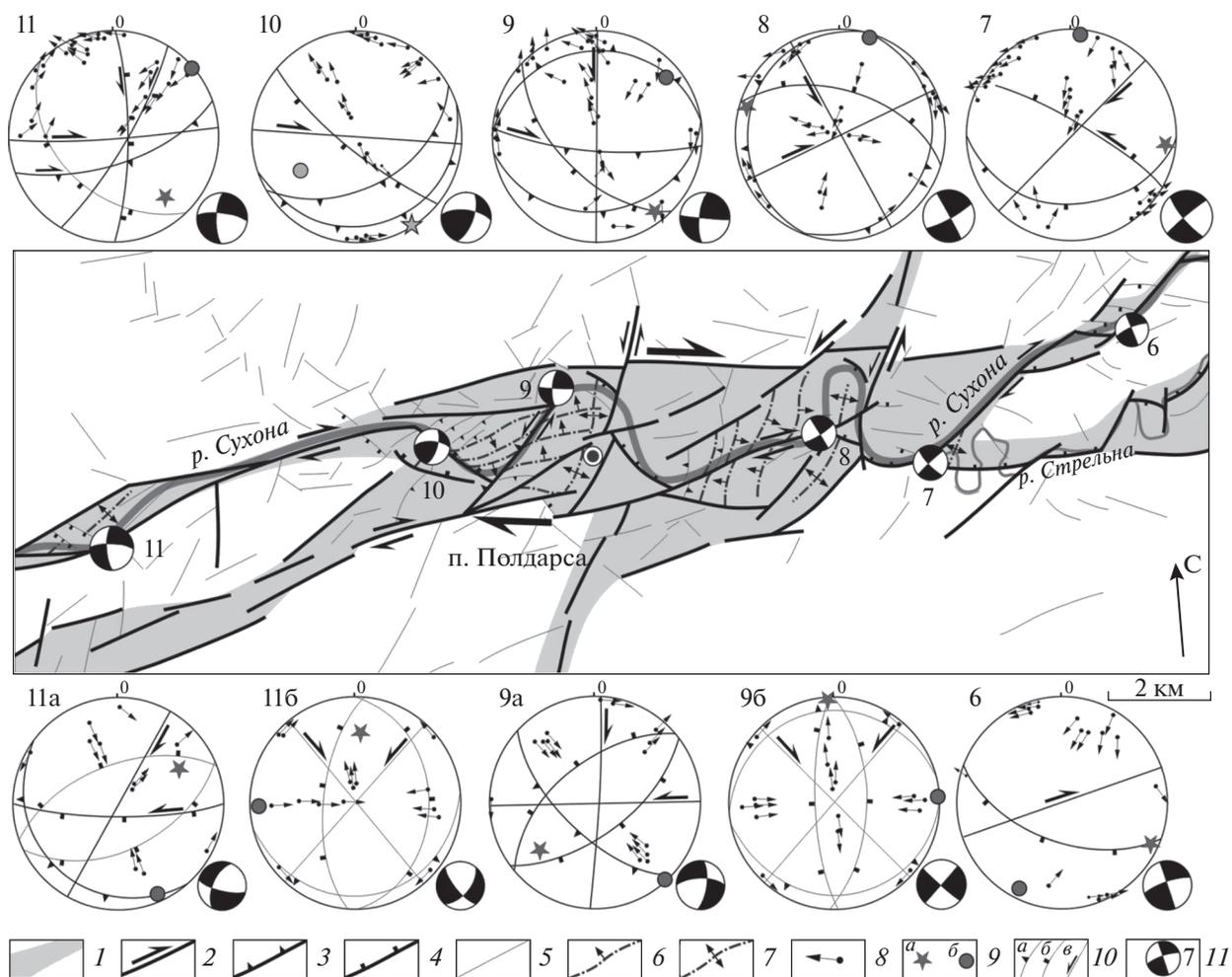


Рис. 14. Структурно-кинематическая схема локального участка Среднерусской зоны деформаций в районе пос. Полдарса.
 1 – зоны сдвига; 2–5 – разрывы: 2 – сдвиги, 3 – взбросы и надвиги, 4 – сбросы, 5 – второстепенные; 6 – асимметричные складки и направление восстания их осевых плоскостей; 7 – прямые пологие складки; 8–11 – структурные элементы равноплоскостных стереографических проекций (нижняя полусфера): 8 – полюса плоскостей разрывов и векторы перемещения висячего крыла, 9 – главные оси палеонапряжений: *a* – сжатия, *б* – растяжения, 10 – усредненные позиции плоскостей нарушений: *a* – взбросов и надвигов, *б* – сбросов, *в* – сдвигов, 11 – министереограммы ориентировки палеонапряжений для главного парагенеза структур и их номера (сегмент растяжения (черный), сегмент сжатия (белый))

прессии (см. рис. 13, г), протрузии и инъекции глинистых пород в рампы разгрузки взбросов и надвигов (см. рис. 13, д). В препятствующих перемещению рампах формируются надвиговые дуплексы и эшелонированные складчато-разрывные структуры типа хорсов (см. рис. 13, е).

Изучение полей развития асимметричных складок, связанных с detachментами, показало, что они распределяются закономерно (рис. 14). По отношению к магистральным сдвигам, это диагональные складки, вергентность которых закономерно меняется на обратную в противоположных бортах нарушений. При небольших и рассредоточенных в широкой полосе сдвиговых смещениях, осевые плоскости складок просле-

живаются через зону сдвига и образуют пропеллеорообразные поверхности. Можно отметить пространственную связь рассматриваемых складок с сегментами прерывания сдвигов и ступенчатого перехода сдвиговых смещений на новый отрезок. Также отмечается их приуроченность к узлам пересечения сдвиговых зон различной ориентировки. Простираения осевых поверхностей асимметричных складок заметно меняются и подчиняются позиции сдвиговых нарушений. Среди последних обособлены субширотные правые сдвиги и взбросо-сдвиги северо-восточного простираения (см. рис. 14). Складки и сдвиги различной ориентировки свидетельствуют о локальных вариациях условий деформаций и их полистадийном разви-

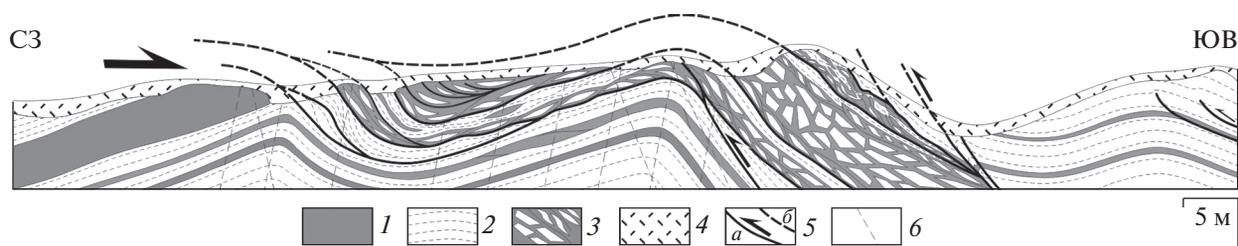


Рис. 15. Асимметричные складки, генетически связанные с субслоевым детаментом, сминающие более раннюю зону субслоевого срыва и меланжа (пикет № 10).

1–2 – отложения татарского яруса верхней перми: 1 – известняки, 2 – аргиллиты и мергели; 3 – субслоевая зона брекчий и меланжа; 4 – четвертичные отложения; 5 – разрывные нарушения и направления перемещений: а – достоверные, б – предполагаемые; б – трещины

тии. Смятие зон субслоевого срыва и меланжа в асимметричные складки иллюстрируют пример наложенных деформаций (рис. 15).

В нижнем течении р. Сухона в красноцветных терригенных отложениях верхов татарского яруса отмечены признаки конседиментационных деформаций. Нарушения этого типа приурочены к линзам песчаников с крупными косослоистыми сериями речного и дельтового типа. Линзы шириной от 50 до 500 м линейно прослеживаются на десятки километров, имеют мощность от 5 до 20 м, залегают среди пород древней коры выветривания и, иногда, перекрыты базальными гравелитами и конгломератами нижнего триаса. В основании линз развиты малоамплитудные разрывы и зоны трещиноватости (рис. 16, а, б). В слоях песков распространены брекчии обрушения, сложенные плитообразными, изометричными, угловатыми и округлыми обломками плотно сцементированных пород, залегающих в бортах песчаных линз (см. рис. 16, в, г). Брекчии сопровождают конседиментационные сбросы, которые вверх по восстанию срезаются поверхностями напластования. Сбросы имеют листрическую и ступенчатую конфигурацию (см. рис. 16, г). Все эти образования, вероятно, связаны с формированием вдоль тектонически активных нарушений палеоканьонов, заполнявшихся аллювием и обломками обрушения бортовых эскарпов. В разрезе они имеют морфологию отрицательных структур цветка, в данном случае, конседиментационных.

Тектонофизические исследования

Тектонофизические исследования проведены в северо-восточной части Среднерусской зоны в долине р. Сухона (рис. 17). Их основу составили замеры зеркал скольжения, ориентировок приразрывных изгибов слоев и складок, оперяющих сколов и трещин отрыва. На первом этапе обработки строились упрощенные схемы ориентировки нарушений и их кинематики. Сопоставление этих схем с тектонофизическими моделями [9, 35]

позволило выявить группы динамически согласованных структур – структурно-кинематических парагенезов. При окончательной статистической обработке материалов использовалась программа FaultKin6 [52]. Для каждого структурного парагенеза были построены стереограммы, выявлены ориентировки главных осей палеонапряжений и характеристики режимов деформаций [19, 35]. Структурные парагенезы Среднерусской зоны изучались в карбонатно-терригенных и терригенных отложениях казанского и татарского ярусов верхней перми, нижнего триаса и квартера.

Выявлено три группы структурно-кинематических парагенезов. Стереографические проекции ориентировок структур каждой группы представлены в виде табличной раскладки в соответствии с пунктами наблюдений (рис. 18). Миниатюрные стереограммы с сегментами сжатия – растяжения характеризуют режимы деформаций, а цифры в кружках соответствуют номерам стереограмм, упоминаемых в тексте. Номера стереограмм группы 1 использованы для обозначения пунктов наблюдений на структурных схемах (см. рис. 14, см. рис. 17).

Группа 1. Структуры главной группы 1 статистически резко преобладают и присутствуют в отложениях верхней перми и нижнего триаса (см. рис. 17, см. рис. 14). Для парагенеза характерно сочетание конформных северо-восточному простиранию Среднерусской зоны взбросов, левых сдвига-взбросов и надвигов, а также субширотных правых и субмеридиональных левых сдвигов (см. рис. 18, стереограммы 1–5, 12–16). В парагенез также входят прямые и асимметричные принадвиговые складки северо-восточной и восток-северо-восточной ориентировки. Статистически реже встречаются сбросы и сдвиг-сбросы северо-западной ориентировки. Исключение составляет область оперяющих нарушений на северо-востоке Среднерусской зоны. Здесь резко преобладают сбросы, образующие имбрикационный фланговый веер растяжения в северо-западном

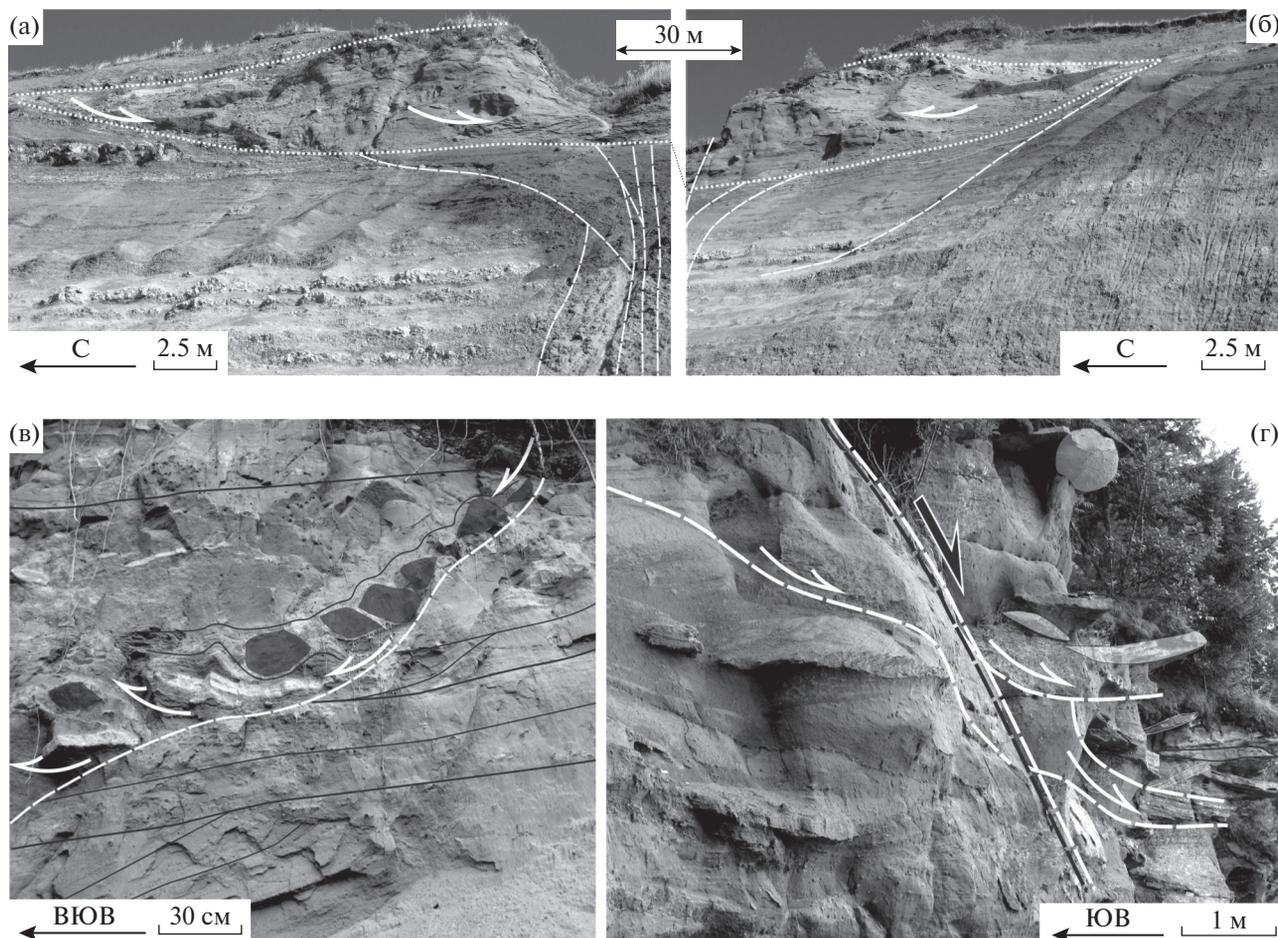


Рис. 16. Фотографии конседиментационных структур в линзах песчаников верхней части разреза татарского яруса. (а–б) – Линза песчаников с глыбами и брекчиями обрушения, залегающая в апикальной части отрицательной структуры цветка (вид в разрезе); (в–г) – конседиментационные сбросы и связанные с ними брекчии, плитообразные и шарообразные глыбы обрушения (вид в разрезе).

борту Среднерусской зоны (см. рис. 18, стереограмма 1). Реконструируется преимущественно субгоризонтальное положение осей сжатия и растяжения, ориентированных под углом к простиранию Среднерусской зоны, что соответствует левостороннему сдвиговому и взбросо-сдвиговому режимам деформаций. В области пунктов 6–12 Среднерусскую зону пересекает система правых сдвигов, по отношению к которым режим деформаций правосдвиговой (см. рис. 14, стереограммы 6–11). Имбрикационный веер, оперяющий северо-восточный фланг зоны, характеризуется левосторонним сдвиго-сбросовым режимом деформаций (см. рис. 18, стереограмма 1). Широкое распространение складчатых и взбросо-сдвиговых нарушений, субконформных простиранию Среднерусской зоны, свидетельствуют о ее развитии в обстановке левосдвиговой транспрессии. Нижний возрастной рубеж деформаций соответствует раннему триасу, верхний – не определен.

Группа 2. Структуры группы 2 менее распространены и встречаются в отложениях верхней перми. Они представлены преимущественно структурами растяжения – сбросами, сдвиго-сбросами, мезограбенами и трещинами отрыва, ориентированными в северо-восточном направлении (см. рис. 18, стереограммы 1а–5а, 12а–16а; см. рис. 14, стереограммы 9а, 11а). Структуры сжатия и системы сопряженных сдвигов имеют второстепенное значение. Преобладает сдвиго-сбросовый режим деформаций. Ориентировка оси растяжения преимущественно в горизонтальном северо-западном направлении позволяет предполагать правосдвиговые трастензионные деформации Среднерусской зоны. В рассмотренный парагенез входят конседиментационные сбросы, выявленные в линзах песчаников верхней части разреза татарского яруса. Соответственно, можно предположить позднепермское (позднетатарское) время проявления деформаций.

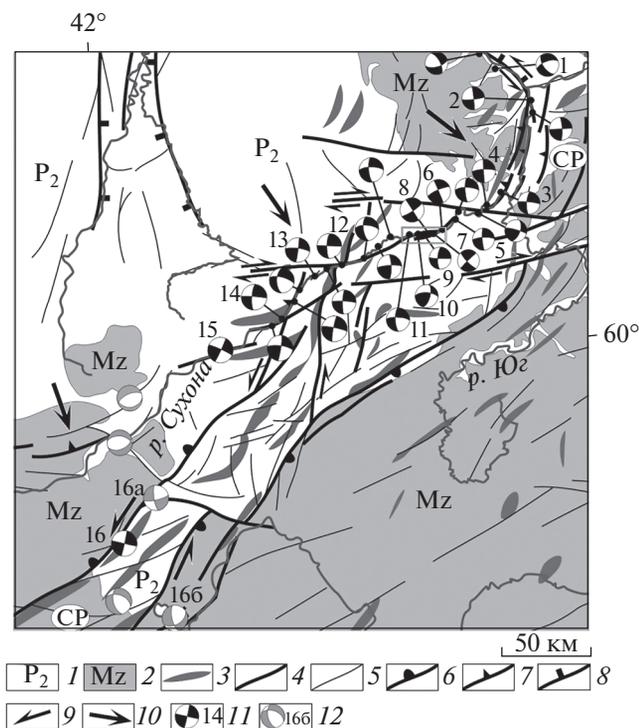


Рис. 17. Структурно-кинematическая схема северо-восточной части Среднерусской зоны деформаций. Обозначена тектоническая зона (аббревиатура): СР – Среднерусская.

1–2 – осадочные отложения: 1 – верхней перми, 2 – мезозоя; 3 – тектонические валы; 4–8 – разрывы: 4 – главные, 5 – второстепенные, 6 – взрезы, 7 – взбросы, 8 – сбросы; 9–10 – направления перемещений: 9 – сдвиговых, 10 – латеральных; 11–12 – мини-стереограммы ориентировки палеонапряжений для главного парагенеза структур и их номера (сегмент растяжения (черный), сегмент сжатия (белый)), 11 – в отложениях верхней перми и нижнего триаса, 12 – в отложениях квартала

Группа 3. Структуры группы 3 наименее распространены и встречаются в отложениях палеозоя, мезозоя и квартала. Структуры растяжения (сбросы, мезограбены, трещины отрыва) образуют субмеридиональные системы, правые и левые сдвиги имеют северо-западную и северо-восточную ориентировку, соответственно (см. рис. 18, стереограммы 16–56, 126, 136, 166; см. рис. 14, стереограммы 96, 116). Реже встречаются субширотные взбросы и надвиги. Исключение составили два пункта замеров нарушений в отложениях квартала, где были выявлены иные ориентировки нарушений (см. рис. 18, стереограммы 146, 156). Реконструированные режимы деформаций разнообразны: сдвиго-сбросовые, сбросовые и сдвиговые. Горизонтальная субширотная ориентировка оси растяжения позволяет предполагать левосдвиговые перемещения вдоль Среднерусской зоны. Учитывая, что парагенез имеет сквозное развитие во всех комплексах пород, включая

квартал, время проявления деформаций соответствует новейшему этапу.

СВОЙСТВА СДВИГОВЫХ ЗОН И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Структурные рисунки тектонических зон Среднерусского пояса, а также результаты тектонофизических исследований указывают на их развитие преимущественно в условиях транспрессионных и транспрессионных деформаций, чередовавшихся во времени. Для Южно-Молоковского разлома выявлено девять импульсов перемещений, соответствующих последовательным транспрессионным и транспрессионным деформациям Среднерусской зоны (см. рис. 9). Деформации проявлялись на протяжении байкальского, каледонского, раннегерцинского, позднегерцинского – альпийского, а также новейшего этапов. С каждым из них были связаны последовательные стадии проявления транспрессии (обычно в начале этапа) и транспрессии. Явления кинематических инверсий были выявлены Ю.А. Морозовым [29] и являются характерным свойством многих сдвиговых зон Восточно-Европейской платформы [17, 18].

Зоны деформаций Восточно-Европейской платформы относятся к классу сдвиговых нарушений, которые имеют ряд признаков, установленных эмпирически и на основе моделирования [33, 55, 56, 58, 59]. Одним из главных свойств сдвиговых зон является асимметричная организация структурных рисунков. В инфраструктуре фундамента сдвиговые нарушения проявлены в асимметрии расположения магнитных аномалий и по смещениям их осей (см. рис. 1). Для кровли фундамента характерны асимметричные в плане цепочки грабенов и структур пулл-апарт, образующих транспрессионные структурные рисунки авлакогенов (см. рис. 2). В толщах осадочного чехла в структуре сдвиговых зон отмечаются кулисное расположение диагональных складок и валов, синтетических и антитетических сдвигов, сбросов и взбросо-надвигов (см. рис. 3, см. рис. 5, см. рис. 14). На флангах сдвиговых зон развиты асимметрично расположенные имбрикационные вееры, компенсирующие сдвиговые перемещения (см. рис. 2, см. рис. 5).

В апикальной части сдвиговых зон деформации часто имеют латентный характер и представлены начальными стадиями развития разрывных и складчатых нарушений в толщах чехла. Распространены ромбовидные системы сопряженных трещин скалывания, а также кулисные ряды сколов Риделя, которые при развитии деформаций постепенно объединяются в линейно-линзовидные структуры (см. рис. 12, б).

В разрезе поверхности разрывов часто имеют ступенчатый характер, что связано с преломлени-

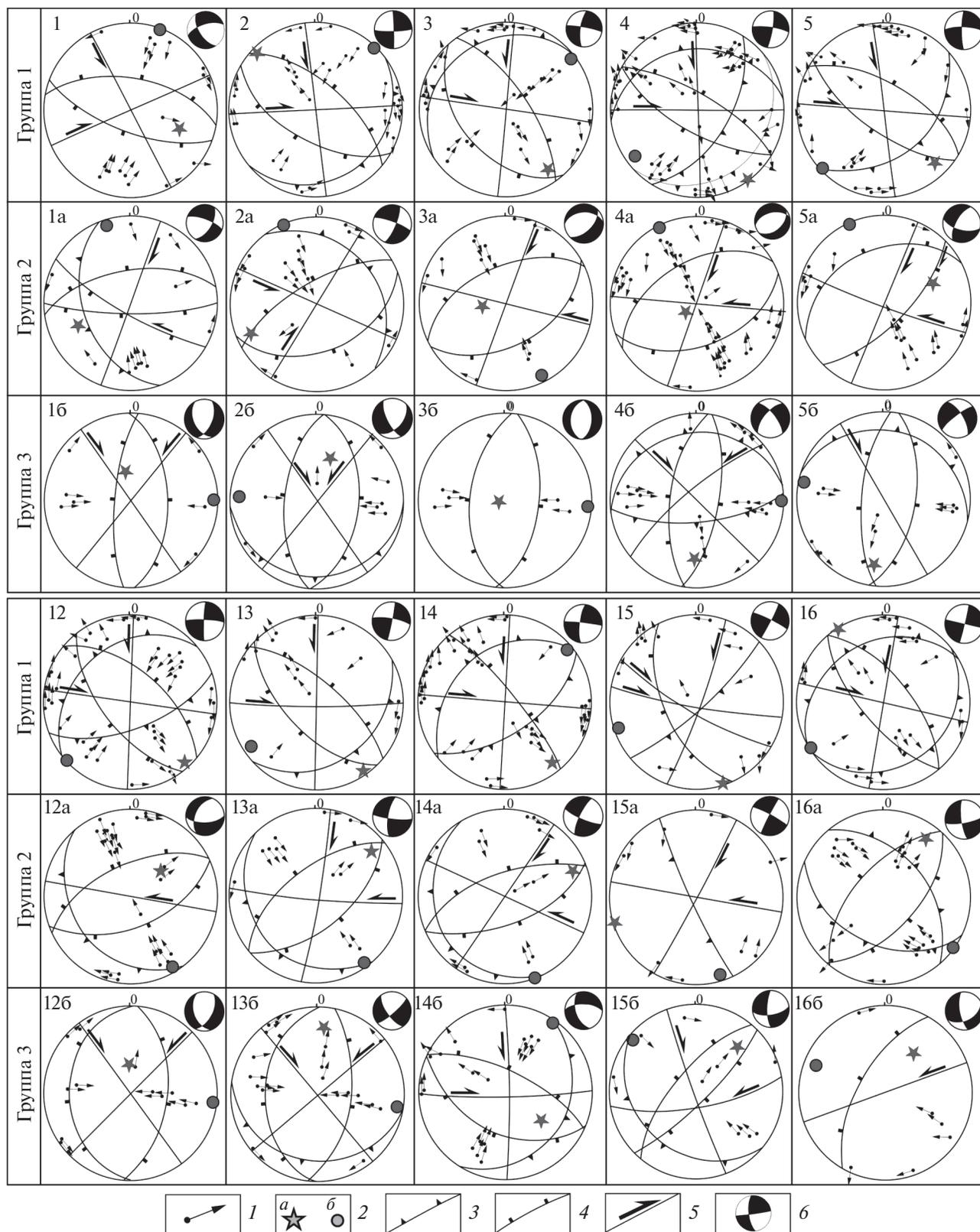


Рис. 18. Равноплощадные стереографические проекции (нижняя полусфера) полюсов разрывов с векторами перемещения висячего крыла для структур различных этапов деформаций.

1 – полюса плоскостей разрывов и векторы перемещения висячего крыла; 2 – главные оси палеонапряжений: *a* – сжатия, *b* – растяжения; 3–5 – усредненные позиции плоскостей нарушений: 3 – взбросов и надвигов, 4 – сбросов, 5 – сдвигов; 6 – министереограммы ориентировки палеонапряжений (сегмент растяжения (черный), сегмент сжатия (белый))

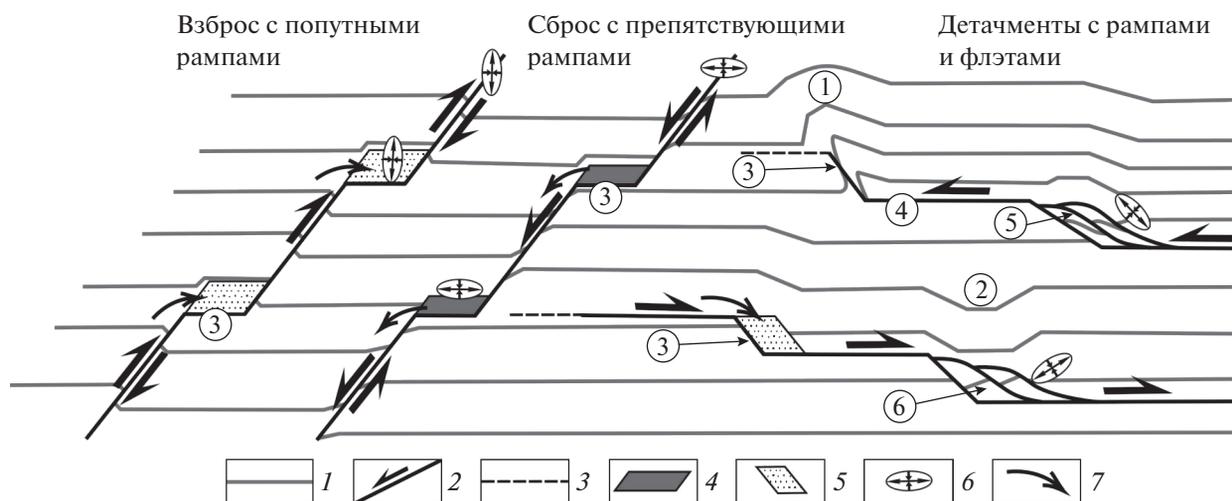


Рис. 19. Структурные парагенезы, связанные с сегментами изгиба разрывов (разрез).

На схеме (цифры): 1 – надрамповая антиклиналь, 2 – надрамповая синклиналь, 3 – рамп, 4 – флэт, 5 – дуплексы сжатия, 6 – дуплексы растяжения.

1 – слоистость; 2 – разрывы и направления смещений; 3 – отрезки угасания разрывов; 4–5 – сегменты изгиба нарушений и динамически связанные с ними области: 4 – повышенной компрессии; 5 – декомпрессии; 6 – ориентировка осей сжатия и растяжения; 7 – направления перемещения подвижных и пластичных компонентов

ем нарушений на границах слоев разной вязкости и значительным влиянием реологического фактора на ранние процессы дизъюнктивной деформации [70] (см. рис. 13, см. рис. 12, в, г). Резкие изгибы поверхностей разрывов приводят к появлению попутных и препятствующих смещению рамповых структур, с которыми связаны разнообразные проявления структурных и вещественных преобразований (рис. 19). Вдоль попутных рамповых изгибов формируются структуры локальной декомпрессии и разгрузки, в приоткрытые полости которых происходит выдавливание пластичных пород и флюидов. В препятствующих смещению рампах, повышенная компрессия приводит к выжиманию подвижных и низковязких компонентов пород. В случаях развития субслоистых детачментов результатом реакции на торможение скольжения вдоль препятствующих рампов являются асимметричные рамповые складки и надвиговые дуплексы. С попутными рампами связаны декомпрессионные структуры (см. рис. 19). Учитывая, что тектонические нарушения Среднерусской зоны испытывали многократные кинематические инверсии, можно полагать, что локальные условия сжатия–растяжения вдоль рамповых структур также часто менялись. Данный тектонодинамический процесс может рассматриваться как один из факторов мобилизации и миграции флюидов, в частности, углеводородов.

В строении сдвиговых зон участвуют тектонические валы, расположенные над осевыми частями палеорифтов (см. рис. 10, см. рис. 8). Данные структуры рассматриваются в качестве инверси-

онных складок, связанных с наложенными деформациями сжатия на рифейские рифты [6, 8, 38]. Существуют представления о развитии этих структур в связи с зонами локального разуплотнения и гравитационного всплывания пород фундамента, подверженных мигматизации или дроблению [43]. Сравнительный анализ особенностей тектоники складчато-разрывных нарушений Среднерусской зоны с другими зонами сдвига позволяет уточнить существующие модели.

В строении Среднерусской зоны обособлены Рыбинско-Сухонский мегавал, который осложняют складки более высоких порядков, образующие продольные и диагонально-кулисные системы. Наклон осевых поверхностей мегавала и второстепенных складок закономерно меняется вдоль простираения зоны (рис. 20, а). Как было показано на примерах многих тектонических зон, переменную вергентность и кулисную ориентировку структуры приобретают при сдвиговых смещениях вдоль нарушений, по мере их проникания из фундамента в отложения чехла [20, 30, 37, 53, 59] (см. рис. 20, б). Вверх по восстанию сдвиговой зоны в плане и в разрезе отмечается нарастание степени отклонения второстепенных складчато-разрывных структур от плоскости магистрального сдвига в фундаменте. Также возрастает общая асимметрия структуры, выраженная системами кулисно расположенных контрвергентных взбросо-надвигов и складок. Вблизи поверхности плоскости складчато-разрывных структур приближаются к горизонтальному положению (см. рис. 20, б). Для Среднерусской зоны сдвига эти особенности выражены в развитии субслоистых детачментов и

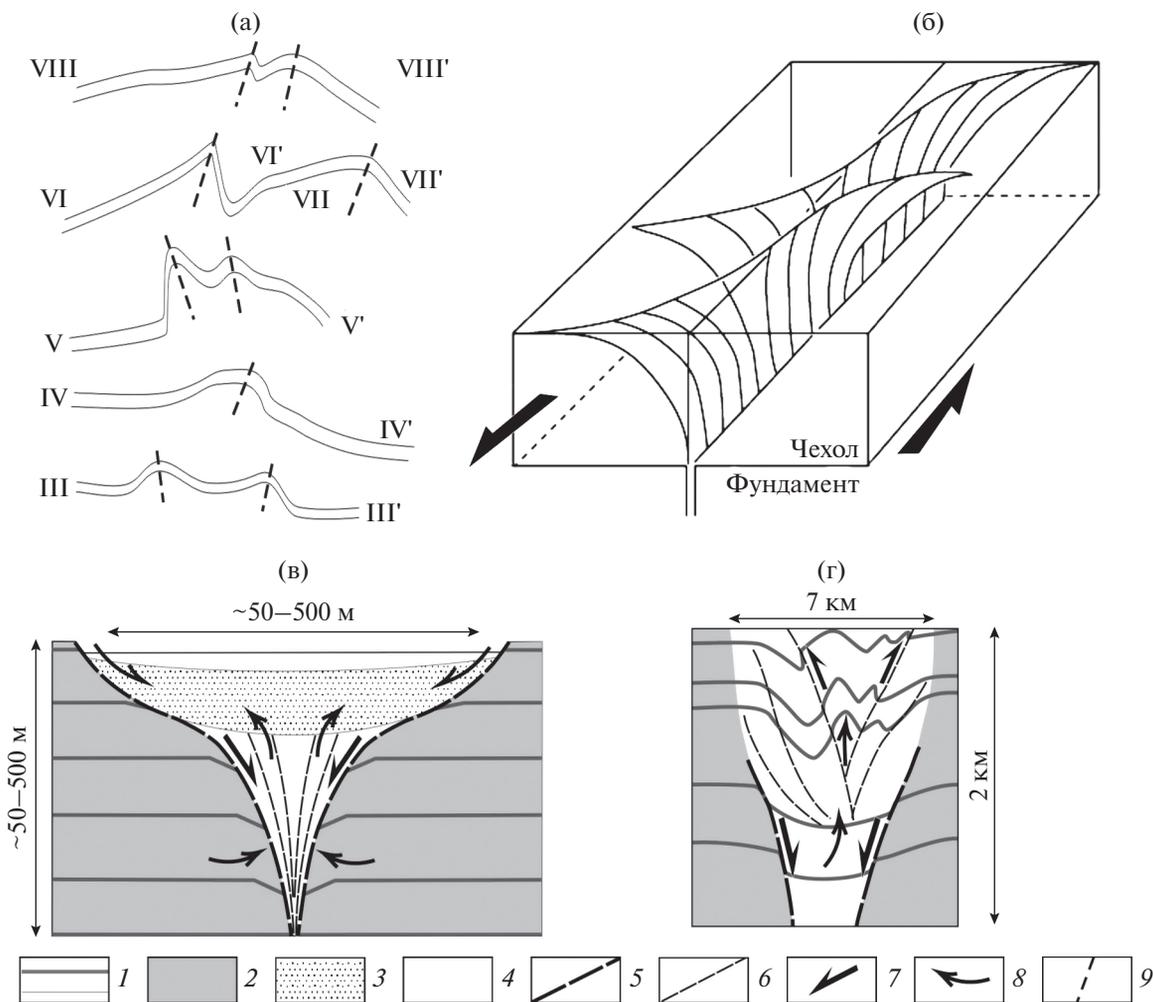


Рис. 20. Закономерные элементы структурных ансамблей сдвиговых зон.
 (а) – Изменение наклона осевых поверхностей складок вдоль простирания Среднерусской зоны сдвига;
 (б) – изменение наклона осевых поверхностей складок и разрывов, установленное для тектонотипичных зон сдвига и на основе моделирования, по [59];
 (в) – модель конседиментационной отрицательной структуры цветка в отложениях чехла Среднерусской зоны;
 (г) – отрицательная структура цветка, осложненная вложенной в нее положительной инверсионной цветковой структурой (Среднерусская зона).
 1 – слоистость; 2 – слабо нарушенные породы; 3 – синкинематические осадки; 4 – область интенсивных деформаций;
 5–6 – разрывы: 5 – главные, 6 – малоамплитудные; 7–8 – направления перемещений: 7 – по разломам, 8 – подвижных компонентов; 9 – осевые плоскости складок

связанных с ними асимметричных складок, вергентность которых меняется в противоположных бортах сдвигового нарушения (см. рис. 14, см. рис. 15). Крутопадающий магистральный сдвиг, контролирующий складки, выражен в латентной форме: сдвиговые смещения рассредоточены, испытывают перераспределение и отчасти реализуются в субслоино-горизонтальных движениях и складчатых деформациях. Сдвиговые смещения приводят к развитию асимметричных контрвергентных складок, имеющих пропеллерообразную морфологию осевых поверхностей, фрактально подобную более крупным структурам сдвиговой зоны (см. рис. 20, б).

Положительные и отрицательные структуры цветка являются признаком проявления, соответственно, транспрессионных и транстенсионных деформаций [25, 59]. В строении Среднерусской зоны сдвига эти структуры широко распространены (см. рис. 7, см. рис. 11, см. рис. 20, в, г). В практическом отношении интересны случаи развития конседиментационных структур цветка в режиме транстенсии (см. рис. 20, в). С этими структурами пространственно связаны линзы песков, которые являются хорошими коллекторами для флюидов. В условиях декомпрессии и при наличии экранирующих горизонтов такие структуры цветка могут быть ловушками углево-

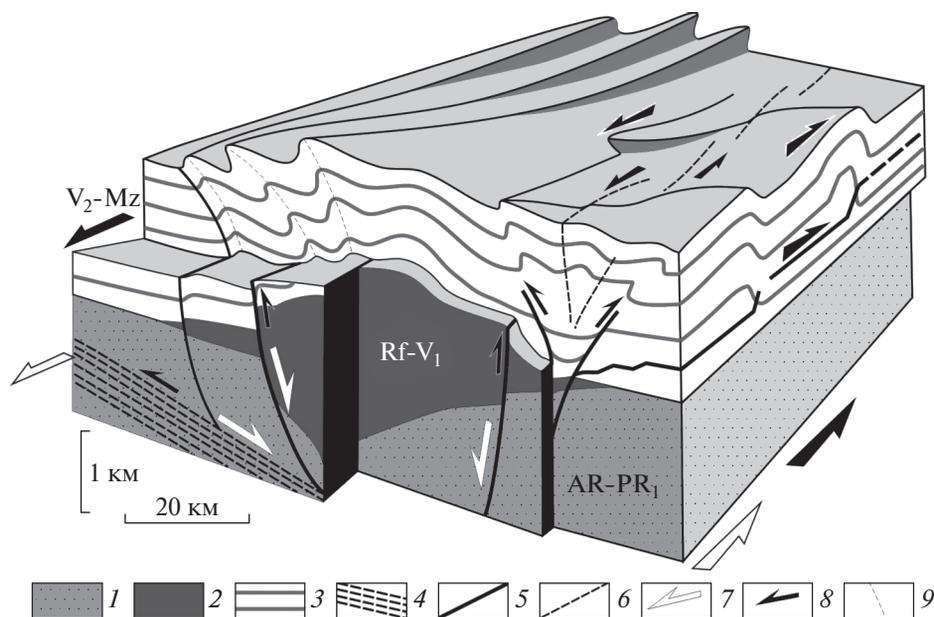


Рис. 21. Идеализированная 3D модель строения Среднерусской зоны сдвига и пространственные соотношения наиболее типичных структурных ансамблей.
 1 – фундамент; 2 – проточехол; 3 – чехол; 4 – зона детачмента; 5–6 – разрывы: 5 – главные, 6 – малоамплитудные; 7–8 – преобладающие направления перемещений на стадиях развития: 7 – в конце протерозоя, 8 – в фанерозое; 9 – осевые плоскости складок

дородов. При инверсии и трансформации отрицательных структур цветка в положительные структуры, происходит выдавливание флюидов к поверхности (см. рис. 11, см. рис. 20, г). Если имеются экранирующие слои, то такие ситуации благоприятны для накопления углеводородов в ловушках антиклинального типа.

Пространственные соотношения наиболее типичных структур Среднерусской зоны сдвига иллюстрирует идеализированная модель (рис. 21). Показан фрагмент трансорового детачмента, контролировавшего формирование листрических сдвиго-сбросов и рифтогенного грабена в позднем протерозое. На плитном этапе в условиях левосдвиговой транспрессии рифт трансформировался в инверсионную структуру, которая в осадках чехла представлена мегавалом и осложняющими его складками, разломами и структурами цветка. Разрывно-складчатые нарушения в плане образуют кулисные системы, их осевые плоскости имеют пропеллерообразную морфологию, вергентность структур меняется вдоль простирания сдвиговой зоны. Вверх по восстанию зоны степень отклонения нарушений от плоскости магистрального сдвига в фундаменте нарастает. Вблизи поверхности структуры выполаживаются и в осадках чехла проявляются субслойные детачменты, а также сопровождающие их рамповые структуры и асимметричные складки волочения. Вергентность складок и разрывных структур зеркально

меняется в противоположных бортах главных и второстепенных сдвиговых нарушений.

Рассмотренный структурный ансамбль соответствует тектонике типичных сдвиговых зон, формировавшихся в условиях последовательного проявления обстановок транстенсии и транспрессии. Развитие складок и поднятий в центральных частях зон транспрессии является закономерным [25, 59]. Механизм развития поднятий в зонах сдвига был рассмотрен для медианных хребтов трансформных разломов центральной Атлантики. На основании математического моделирования было показано, что в центральной части зоны трансформного сдвига при значительных деформациях происходит упрочнение пород и формируется линзовидное тело повышенной вязкости [20, 57]. При транспрессионных деформациях это жесткое мегавключение является областью концентрации напряжений и испытывает выдавливание к поверхности в виде медианного хребта. Эффект упрочнения области деструкции в основании Среднерусской авлакогена мог привести к аналогичному результату – формированию Рыбинско-Сухонского мегавала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среднерусский пояс деформаций выражен в строении всех этажей Восточно-Европейской платформы, структуре фундамента и его кровли, тектонике плитного чехла и морфологии совре-

менного рельефа (см. рис. 6, а). Каждый структурный уровень проявления деформаций отличается стилем тектоники. В комплексах архей–палеопротерозойского фундамента пояс представлен коллизионным орогеном, в строении которого участвуют дивергентные системы тектонических покровов и надвигов, сдвиговые нарушения и горизонтальные протрузии (см. рис. 1). В краевых частях орогена развиты фрагменты средней-нижней палеопротерозойской коры: гранулиты-гнейсы и мафитовые интрузии, связанные с развитием надвигов и транскоровых detachментов [11].

Системы рифей–ранневендских грабенов и авлакогенов, осложняющие строение кровли фундамента, почти строго повторяют внешние контуры и многие элементы структуры палеопротерозойского орогена (см. рис. 2, см. рис. 6, а). Среднерусский авлакоген, образующий главную ветвь Среднерусской рифтовой системы, приурочен к выходам на поверхность гранулитовых комплексов и глубинных надвигов северного крыла орогена и динамически связан с развитием транскорового detachмента (см. рис. 6, а, см. рис. 7). Структурный рисунок рифта указывает на проявление в позднем рифее – раннем венде сдвиговых трансензионных деформаций [43] (см. рис. 2). Палеорифтовые структуры Среднерусской системы имеют признаки сочетания элементов тектоники сдвиговых зон и пологих detachментов, свидетельствующих о проявлении трансензионных деформаций в реологически и тектонически расслоенной коре. Выходы на поверхность кровли фундамента ниже- и среднекоровых гранулитов, вероятно, являются маркерами приповерхностного размещения транскоровых detachментов. Смещения вдоль detachментов способствовали развитию листрических сдвиго-сбросов и авлакогенов в соответствии с механизмом простого сдвига [60]. Пространственное совмещение рифейских рифтов и Среднерусского коллизионного пояса произошло в результате длительного развития транскоровых detachментов в условиях косой коллизии в палеопротерозое, последующих событий коллапса орогена и трансензионного рифтогенеза в рифее.

Крупнейшие зоны деформаций платформенного чехла обнаруживают пространственную связь с палеопротерозойскими коллизионными и рифей–ранневендскими рифтогенными структурами (см. рис. 6, а). Эти зоны представляют собой верхние уровни проявления глубинных нарушений фундамента и являются результатом их активизации на платформенном этапе развития. По отношению к докембрийским структурам интенсивность деформаций в осадках чехла существенно меньше и плавно снижаются вверх по разрезу [6, 8]. Деформации чехла чаще представлены латентными формами – рассредоточенными в широкой полосе малоамплитудными разрыва-

ми и зонами трещиноватости. В строении отдельных зон доминируют мегавалы и интенсивные разрывно-скалчатые нарушения.

Тектоническая эволюция Среднерусского пояса следует принципу унаследованного развития протоплатформенных и плитных структур в результате активизации древних, преимущественно, палеопротерозойских тектонических зон. Причины унаследованного развития структур объясняются по-разному: наличием реологически ослабленных участков коры в пределах древних тектонических швов, гравитационным коллапсом коллизионных орогенов, вариациями мощностей земной коры и коровой анизотропией в областях сочленения коровых сегментов Восточно-Европейской платформы [6, 43, 47]. Не исключая этих факторов, унаследованное развитие структур различного возраста и генезиса можно рассмотреть в связи с явлениями более высокого ранга. Одним из проявлений реологической и тектонической расслоенности континентальной коры является формирование в ее пределах транскоровых detachментов [1, 6]. Системы detachментов Восточно-Европейской платформы являются долгоживущими мегаструктурами, которые испытывали многократную активизацию и кинематическую инверсию, начиная с раннего палеопротерозоя. На одних этапах они функционировали в качестве глубинных надвигов, на других – как пологие сбросы (модель простого сдвига, по [60]). На поверхности пологие зоны detachментов оказывали динамическое воздействие на широкую область верхней коры, в пределах которой активизация отдельных тектонических зон была связана с локальными условиями напряженного состояния коры, а также реологическими и гравитационными неоднородностями в ее строении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среднерусский пояс деформаций представляет собой долгоживущую структуру, в строении которой обособлены крупные тектонические зоны, пронизывающие комплексы фундамента и чехла. В эволюции зон нарушений прослеживаются следующие этапы:

- коллизия и формирование сутурных, надвиговых и транспрессионных зон в конце палеопротерозоя (свекофеннский этап);
- рифтогенез и становление системы рифей–ранневендских авлакогенов в режиме трансензии (раннебайкальский этап);
- формирование надрифтовых инверсионных структур в процессе развития бассейна Московской синеклизы (каледонский–раннегерцинский этапы);

– сдвиговые перемещения в обстановках транс-прессии и транстенсии (позднегерцинский–альпийский и новейший этапы).

В этой последовательности событий отмечается циклическая смена обстановок сжатия и растяжения (транспрессии и транстенсии), что повторяется с более высокой частотой в рамках каждого этапа.

Деформации осадков чехла Среднерусского пояса обычно представлены в латентной форме – рассредоточенными в широкой полосе малоамплитудными разрывами и зонами трещиноватости. Встречаются также зоны, в строении которых доминируют мегавалы и интенсивные разрывно-складчатые нарушения.

Среднерусская зона деформаций, приуроченная к северному крылу одноименного пояса, является крупнейшим внутриплитным нарушением Восточно-Европейской платформы. В строении этой эталонной структуры сочетаются элементы тектоники типичных транспрессионных и транстенсионных сдвиговых зон, рифтов и пологих detachментов. От позднего рифея и до новейшего времени зона испытала более девяти импульсов подвижности и не менее шести кинематических инверсий. Для позднегерцинского, альпийского и новейшего этапов кинематически охарактеризованы три стадии деформаций, связанные преимущественно с левосдвиговой транспрессией, и локальными по времени проявления обстановками правосдвиговой транстенсии (в конце татарского времени) и левого сдвига (новейший этап).

Дальнейшее изучение Среднерусского пояса деформаций на основе сейсморазведки, буровых работ и тектонофизических методов раскрывает широкие перспективы в обнаружении структурных ловушек углеводородов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-05-00485 и 18-05-00733), госбюджетной темы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзберг Р.Е., Гарецкий Р.Г. Листрическая тектоника платформ // Докл. РАН. 1996. Т. 346. № 4. С. 501–504.
2. Аксаментова Н.В. Магматизм и палеогеодинамика раннепротерозойского Осницко-Микашевичского вулканоплутонического пояса. – Минск: ИГН НАН Беларуси, 2002. 175 с.
3. Валеев Р.Н. Тектоника и минерагения рифея и фанерозоя Восточно-Европейской платформы. – М.: Недра, 1981. 215 с.
4. Вербицкий В.Р., Вербицкий И.В., Васильева О.В., Саванин В.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Сер. Центральнo-Европейская. Лист О-35 – Псков, (N-35). Лист О-36 – Санкт-Петербург. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 510 с.
5. Владимирова Т.И., Капустин И.Н., Орлов В.П., Федоров Д.Л. Объяснительная записка к Гипсометрической карте поверхности кристаллического фундамента центральной и северной частей Восточно-Европейской платформы масштаба 1 : 2500000. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. 71 с.
6. Гарецкий Р.Г. Особенности тектоники и геодинамики Восточно-Европейской платформы // Литасфера. 2007. № 2(27). С. 3–13. (на русском).
7. Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Астапенко В.Н., Данкевич И.В. Геолого-геофизическая характеристика Полоцко-Курземского пояса разломов // Литасфера. 2004. № 2(21). С. 10–27. (на русском).
8. Гарецкий Р.Г., Нагорный М.А. Главные этапы развития Московской синеклизы // Литасфера. 2006. № 2. С. 14–24. (на русском).
9. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука. 1975. 535 с.
10. Гипсометрическая карта поверхности кристаллического фундамента центральной и северной частей Восточно-Европейской платформы. М-б 1 : 2500000. – Под ред. В.П. Орлова, Д.Л. Федорова – СПб.: ВСЕГЕИ, 2001.
11. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС / Под ред. А.Ф. Морозова. М.: ГЕОКАРТ–ГЕОС, 2010. Т. 2. 400 с.
12. Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре. – Под ред. В.Л. Масайтиса, Л.А. Певзнера – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 599 с.
13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1000000 (новая серия). Лист N-37,(38) (Москва). Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 344 с.
14. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1000000 (новая серия). Лист О-37,(38) (Нижний Новгород). Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 261 с.
15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1000000 (третье поколение). Лист О-37 (Ярославль). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 356 с.
16. Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Тектоника фундамента // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. 2018. № 2. С. 5–13.
17. Колодяжный С.Ю., Некрасов А.И. Структурные и динамические закономерности размещения месторождений нефти в центральной части Волго-Уральской антеклизы // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 11(1). С. 123–140.
18. Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н., Балуев А.С. Структурно-кинематические парагенезы и динамическая модель эволюции Балтийско-Мезенской зоны в фанерозое // Геотектоника. 2020. № 2. С. 48–74.
19. Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. – Под ред. Ю.Г. Лео-

- нова — М.: Наука, 2004. 340 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 552.).
20. *Короновский Н.В., Гогоненко Г.Н., Гончаров М.А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С.* Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур “пропеллерного” типа // *Геотектоника*. 2009. № 5. С. 50–64.
 21. *Костюченко С.Л., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н.* Тектоническая модель докембрия Московской синеклизы по результатам комплексных региональных исследований // *Разведка и охрана недр*. 1995. № 5. С. 8–12.
 22. *Крапивнер Р.Б.* Безкорневые неотектонические структуры. — М.: Недра, 1986. 204 с.
 23. *Кузьмин А.Н., Кириков В.П., Лукьянова Н.В., Максимов А.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Лист N-37 (Москва). Объяснительная записка. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 462 с.
 24. *Лаврушин Ю.А.* Строение и формирование основных морен материковых оледенений. М.: Наука, 1976. 237 с.
 25. *Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А.* Зоны концентрированной деформации (структуры цветка): натурные наблюдения и данные моделирования // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 3. С. 693–720.
 26. *Леонов М.Г., Копп М.Л., Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С., Рязанцев А.В., Дегтярев К.Е., Баженов М.Л.* Латеральные тектонические потоки в литосфере Земли. — Под ред. М.Г. Леонова — М.: ГЕОС, 2013. 318 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 604).
 27. *Лукьянов А.В.* Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. — М.: Наука, 1965. 212 с.
 28. *Милановский Е.Е.* Древние платформы и метаплатформенные области. — В кн.: *Геология СССР*. — М.: МГУ, 1987. Ч. 1. 416 с.
 29. *Морозов Ю.А.* Цикличность кинематических инверсий в подвижных поясах в свете лунно-земных связей // *Геотектоника*. 2004. № 1. С. 21–50.
 30. *Никишин А.М., Старцева К.Ф.* Пример детального объемного строения сдвиговых зон по данным интерпретации 3D-сейсмических данных // *Геология нефти и газа*. 2015. № 4. С. 29–33.
 31. *Разломы земной коры Беларуси.* / Под ред. Р.Е. Айзберга. Минск: Красико-Принт, 2007. 372 с.
 32. *Селемев С.И.* Структура земной коры центральной части Русской платформы по комплексу геолого-геофизических данных. — Автореф. дис. ... к. г.-м. н. — М.: МГУ, 2006. 25 с.
 33. *Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. — Под ред. С.И. Шермана — Новосибирск: СО РАН, 2003. 244 с.
 34. *Сим Л.А.* Новейшие поля напряжений Восточно-Европейской платформы // *Литасфера*. 1996. № 5. С. 100–107. (на русском).
 35. *Сим Л.А., Маринин А.В.* Методы полевой тектонофизики по определению палеонапряжений. В кн.: *Современная тектонофизика. Методы и результаты*. — Под ред. Ю.Л. Ребецкого — М.: ИФЗ. 2015. Т. 2. С. 47–76.
 36. *Соколов В.Я.* Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Тверской области // *Геология нефти и газа*. 1999. № 9(10). С. 36–42.
 37. *Тимурзиев А.И.* Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидо-динамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью). — Автореф. дис. ... д. г.-м. н. — М.: МГУ, 2009. 40 с.
 38. *Устинова М.А.* Геологическая история валообразных структур Центральных районов Русской плиты. — Автореф. дис. ... к. г.-м. н. — М.: МГУ, 2001. 24 с.
 39. *Федоров Д.Л., Костюченко С.Л., Солодилов Л.Н.* Среднерусский авлакоген — тектонический трансфер в системе Прикаспийской и Баренцевоморской нефтегазоносных впадин // *Отечественная геология*. 1996. № 2. С. 50–61.
 40. *Хераскова Т.Н., Андреева Н.К., Воронцов А.К., Каграманян Н.А.* Развитие осадочного бассейна Московской синеклизы в раннем палеозое // *Литология и полезные ископаемые*. 2005. № 2. С. 172–191.
 41. *Хераскова Т.Н., Волож Ю.А., Заможняя Н.Г., Каплан С.А., Сулейманов А.К.* Строение и история развития западной части Восточно-Европейской платформы в рифее—палеозое по данным геотрансекта ЕВ-1 (Лодейное Поле—Воронеж) // *Литосфера*. 2006. № 2. С. 65–94.
 42. *Цыганов В.А.* Геолого-тектоническое строение верхней части разреза кристаллического фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы и его отражение в структурах верхней части осадочного чехла // *Георесурсы*. 2002. Т. 4. № 12. С. 38–45.
 43. *Чамов Н.П.* Строение и развитие Среднерусско-Беломорской провинции в неопротерозое. — Под ред. Ю.Г. Леонова — М.: ГЕОС, 2016. 233 с.
 44. *Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). — Под ред. Б.М. Чикова — Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
 45. *Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. — Под ред. Н.П. Лаверова — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.
 46. *Bogdanova S.V.* Segments of the East European Craton. — In: *EUROPROBE in Jablonna 1991*. — Ed. by D. G. Gee, M. Beskholmén, (Warszawa: Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., 1993). P. 33–38.
 47. *Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbachev R., Orlyuk M.I.* Riphean rifting and major Paleoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: Geology and geophysics // *Tectonophysics*. 1996. 268. P. 1–21.
 48. *Hanmer S., Passchier C.* Shear-sense indicators: A review. (*Geol. Surv. Canada. Ottawa, 1991. Pap. 90-17*). P. 72.
 49. *Kostyuchenko S.L., Egorokin A.V., Solodilov L.N.* Structure and genetic mechanisms of the Precambrian rifts of the East-European Platform in Russia by integrated

- study of seismic, gravity, and magnetic data // *Tectonophysics*. 1999. Vol. 313. P. 9–28.
50. Ligi M., Bonatti E., Gasperini L., Poliakov A.N.B. Oceanic broad multifault transform plate boundaries // *Geology*. 2002. Vol. 30 P. 11–14.
51. Mann P. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2007. Vol. 290. No. 1. P. 13–142.
52. Marrett R.A., Allmendinger R.W. Kinematic analysis of fault-slip data // *J. Struct. Geol.* 1990. Vol. 12. P. 973–986.
53. Naylor M.A., Mandle G., Sijpenstein C.H.K. Fault geometries basement induced wrench faulting under different initial stress states // *J. Struct. Geol.* 1986. Vol. 8. No. 7. P. 737–752.
54. Nikishin A.M., Ziegler P.A., Cloething S., Stephenson R.A., Furne A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Koraev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev I., Shipilov E.V., Lankrejer A., Shalimov I.V. Late Precambrian to Triassic history of the east European Craton: Dynamics of sedimentary basin evolution // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 268. P. 23–63.
55. Ramsay J.G. Shear zone geometry: A review // *J. Struct. Geol.* 1980. Vol. 2. No. 1–2. P. 83–99.
56. Ramsay J.G., Huber M.I. The Techniques of Modern Structural Geology. – In: *Folds and fractures*, (London–N.Y.: Acad. Press., 1987. Vol. 2). P. 392.
57. Skolotnev S.G., Sanfilippo A., Peyve A.A., et al. Large-scale structure of the Doldrums multi-fault transform system (7–8° N equatorial atlantic): preliminary results from the 45th expedition of the *r/v A.N. Strakhov* // *Ofioliti*. 2020. Vol. 45. No. 1. P. 25–41.
58. Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. – Ed. by K.T. Biddle, N. Christie-Blick, (Soc. Econ. Paleontol. Miner. Spec. Publ. 1985. Vol. 37). P. 386.
59. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *GSA Bull.* 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.
60. Wernicke B. Uniform sense normal simple shear of the continental lithosphere // *Canad. J. Earth Sci.* 1985. Vol. 22. P. 789–795.

Latent Tectonics of the Central Russian Deformation Belt of the East European Platform

S. Yu. Kolodyazhny^{a, *}, A. V. Poleshchuk^a, D. S. Zykov^a

^a*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, bld. 7, Pyzhevsky per., 119017 Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: kolod63@mail.ru*

The features of the tectonics of the Central Russian deformation belt located in the central part of the East European Platform are considered. The belt is traced in a wide (up to 350 km) strip in the East-North-East direction for more than 1000 km. In the study of this structure, methods of remote and structural analysis were used. Based on the available data, analysis of potential fields and decoding of digital relief maps, a set of tectonic schemes of the Early Precambrian basement, proto-platform and plate cover has been compiled. The features of the tectonics of various tiers of the platform are considered, as well as a comparison of structures located at different deep levels is carried out. The analysis showed that the Central Russian belt is a long-lived structure, in the structure of which large tectonic zones are isolated, expressed in the modern relief surface and penetrating the complexes of the basement and cover. In the structure of the belt at different deep levels, combined elements of the tectonics of shear zones and transcrustal detachments are manifested, which developed in various dynamic settings: (i) a collisional events at the end of the Paleoproterozoic (svetofennsky stage); (ii) transtensional rifting in the Riphean and Early Vendian (Early Baikal stage); (iii) the development of inversion structures during the formation of the basin of the Moscow syncline (Caledonian – Early Hercynian stages); (iv) shearing in the conditions of transpression and transtension (Late Hercynian – modern stages). Deformations of the sediments of the cover of the Central Russian belt are usually presented in a latent form (dispersed low-amplitude disturbances), but there are also zones with the vigorous fault-fold structures. A detailed study of the Central Russian deformation zone, which forms the northern part of the belt of the same name, showed that it is characterized by elements of tectonics of typical shear zones. The structural and kinematic parageneses of the zone and models of its structure are considered. Structural and dynamic signs favorable for the accumulation of the hydrocarbons are noted. Since the Late Riphean and up to modern times, the Central Russian zone has experienced more than nine mobility pulses and at least six kinematic inversions. For the Late Hercynian, Alpine and modern stages, three stages of deformations have been established, mainly associated with sinistral transpression, and local in short time periods of dextral transtension and sinistral simple shearing manifestations.

Keywords: intraplate tectonics, geodynamics, shear zone, detachment, kinematics, structural paragenesis, Central Russian belt, East European platform