

УДК 551.432:551.24.02 (470.3)

АНАЛИЗ НОВЕЙШИХ СТРУКТУР ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫЛА МОСКОВСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ: СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

Г.В. Брянцева, Н.С. Фролова, Н.В. Лубнина, Н.И. Косевич

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 11.10.16

Для изучения новейших структур юго-западного крыла Московской синеклизы был использован структурно-геоморфологический метод анализа топографических карт. Он позволил выделить новейшие поднятия и впадины, а также зоны трещиноватости. Поднятия частично совпадают с выступами фундамента. Над крупными разломами фундамента, а иногда на некотором расстоянии от них располагаются зоны трещиноватости и цепочки валообразных поднятий. Физическое и математическое моделирование сдвигов, сбросо-сдвигов и взбросо-сдвигов показывает, что системы трещин на поверхности смещаются в сторону от разлома при разной скорости движения крыльев, либо в случае наклонного разрыва, а цепочки поднятий представляют собой структуры типа push-up, или валов сжатия, регулярно повторяющихся над сдвигом основания. Все эти структуры свидетельствуют об активизации разломов фундамента в новейшее время.

Ключевые слова: неотектоника, структурно-геоморфологический анализ, Московская синеклиза, физическое моделирование, разломы, фундамент.

Bryantseva G.V., Frolova N.S., Lubnina N.V., Kosevich N.I. Analysis of modern structures of Moscow Syncline south-western wing. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2016. Volume 91, part 4–5. P. 61–71.

For the study of modern structures in the south-western wing of the Moscow Syncline the structural-geomorphological method for the analysis of topographic maps was used. It allowed highlighting the latest uplifts and depressions, as well as the fractured zones. Comparing the last with the known faults of the basement shows their overlap in space. Physical modeling of shear zones of different orientation shows that over the faults of the basement at the top of the case a system of fissures located above the active fault in the basement are formed, or shifted to, and often chain near arched uplifts. The article shows that the newest structure is connected with motion activated faults of the basement.

Key words: neotectonics, structural-geomorphological analysis, Moscow Syncline, physical modeling, faults, basement.

Московская синеклиза расположена в центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и представляет собой депрессию, выполненную осадочной толщей различной мощности, залегающей на породах фундамента. По тектонике ВЕП существует большое количество публикаций: хорошо известны работы Н.С. Шатского (1946), М.В. Муратова и др. (1962), В.Е. Хаина (1977), Т.Н. Херасковой (2005; Хераскова и др., 2005), Р.Г. Гарецкого (2005), Ф.Н. Юдахина и др. (2003) и многих других. Однако в работах, посвященных новейшей тектонике и опубликованных разными авторами, имеются противоречия в выделении границ новейших структурных форм (Костюченко и др., 1997; Макаров, 1999; Николаев, 1988; Объяснительная записка..., 1979 и др.). Основная трудность при исследовании новейших структур платформенных областей связана с тем, что амплитуды новейших движений очень незначительны, а обусловленный ими рельеф обычно сnivelирован экзогенными процессами.

С другой стороны, важной является проблема связи новейших структурных форм, зон повышенной трещиноватости или линеаментов в осадочном чехле с тектонически активными структурами кристаллического фундамента. Несмотря на появившиеся в последние годы публикации по этой теме (Анисимова, Короновский, 2007; Гогогенков и др., 2007; Гогогенков, Тимурзиев, 2010; Короновский и др., 2009), задача выявления указанной связи для различных платформенных территорий остается актуальной.

Целью настоящей работы является анализ построенной нами детальной структурно-геоморфологической карты, обзор имеющихся к настоящему моменту материалов предшественников для исследуемого региона, сравнение новейших структур чехла со структурами фундамента для выявления их связи, а также попытка объяснения некоторых особенностей такой связи с помощью физического моделирования.

Геологическое строение

Изученная территория расположена в центральной части платформы, в пределах Русской плиты и охватывает юго-западную часть Московской синеклизы. Она характеризуется относительно спокойным, слабо расчлененным выровненным рельефом и малой амплитудой современных тектонических движений. Четвертичные отложения различного генезиса покрывают большую часть площади платформы. Для этого региона характерно изменение глубин залегания кровли фундамента, а также наличие значительных по размерам разломов, ограничивающих авлакогены. Крупные тектонические элементы осложнены более мелкими структурами.

Структурно-геоморфологический анализ

Для построения структурно-геоморфологической карты была применена методика, предложенная и разработанная Н.П. Костенко (Корчуганова и др., 2001), позволяющая анализировать позднекайнозойские деформации земной коры, т.е. образовавшиеся за неотектонический этап развития. Объектом исследований являются развивающиеся структурные формы, различно проявленные в рельефе. Изучение таких орографически выраженных тектонических деформаций проводится в плане путем специализированного дешифрирования топографических карт и в вертикальных сечениях с помощью геолого-геоморфологических профилей.

Основным исходным фактическим материалом послужили карты масштаба 1:1 000 000 и цифровые модели рельефа. Кроме морфометрических характеристик рельефа, выявлялись и анализировались такие геоморфологические признаки, как спрямленные участки рек, цепочки одинаковых форм рельефа и т.д. Для анализа рельефа были построены комплексные геолого-геоморфологические профили как по простиранию, так и вкрест простирания возвышенностей и низменностей. К сожалению, анализ профилей для платформ не всегда эффективен, поскольку вертикальные смещения здесь незначительны и для того, чтобы установить эти смещения, требуется недопустимо большое искажение масштаба, но, несмотря на это, они в некоторых случаях позволили уточнить границы структур.

Структурно-геоморфологическое дешифрирование и интерпретация его результатов позволили составить структурно-геоморфологическую карту, которая отражает новейшую тектонику региона и ее современный структурный план. На этой карте нами был выделен ряд возвышенностей и низменностей, которым даны условные названия, а также согласные с их простиранием или секущие зоны, которые по ряду геоморфологических признаков мы интерпретируем как зоны повышенной трещиноватости.

В результате структурно-геоморфологического анализа выделены Белозерская (I), Даниловская (II),

Харовская (III), Бежецкая (IV), Московская (V), Среднерусская (VI) возвышенности (рис. 1) и Рыбинская (VII), Кубенская (VIII), Угличская (IX), Мещерская (X) низменности. В связи с незначительными неотектоническими движениями возвышенности данного региона характеризуются высотами от 150 до 250 м, а низменности имеют отметки ниже 150 м, на отдельных участках в долинах крупных рек абсолютные высоты снижаются до 50 м.

Белозерская возвышенность (I), расположенная на севере исследуемого района, заходит в его пределы только своей южной частью. Она может быть подразделена на две структуры второго порядка северо-западного простирания – Судскую (I₁), имеющую высоты, редко превышающие отметку 150 м, и Андогскую (I₂), с высотами более 200 м.

Граница Белозерской возвышенности с Рыбинской впадиной (VII) хорошо выражена в рельефе и имеет северо-восточное и субширотное простирание. Большая часть возвышенности сложена преимущественно доломитами среднекаменноугольного-нижнепермского возраста.

Даниловская возвышенность (II) расположена к востоку от Рыбинского водохранилища; ее средние высоты изменяются от 150 до 200 м, а отдельные поднятия превышают отметку 200 м. Она сложена преимущественно породами триасового возраста, представленными глинами, алевролитами, песками и конгломератами, перекрытыми мореной московского возраста. С юго-запада эта возвышенность ограничена Рыбинской впадиной, с северо-востока – Кубенской, а на юге граничит с Мещерской низменностью. В пределах Даниловской возвышенности можно выделить *Валдайское* (II₁) и *Буйское* (II₂) поднятия, имеющие, соответственно, северо-западное и северо-восточное простирание. Валдайское поднятие осложнено рядом зон трещиноватости северо-восточного простирания. Граница с Костромской впадиной, расположенной южнее, хорошо маркируется по изменению высот.

Харовская возвышенность (III) входит в пределы исследуемой территории только частично и расположена на крайнем северо-востоке района. Она имеет значительные высоты в центральной части, превышающие 200 м, сложена глинами, алевролитами, мергелями и другими осадочными породами верхнего отдела пермской системы, перекрытыми ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями московского горизонта. Данная возвышенность ограничена с юго-востока и юго-запада Кубенской низменностью.

Бежецкая возвышенность (IV), ограниченная с севера Рыбинской, а с юга – Угличской впадинами, расположена на западе рассматриваемой территории. В ее пределах можно выделить *Овищенское* (IV₁) и *Медведицкое* (IV₂), поднятия, а также разделяющую их *Мологскую впадину* (IV₃), имеющие северо-восточное простирание. Мологская впадина характеризуется высотами от 100 до 180 м. Ови-

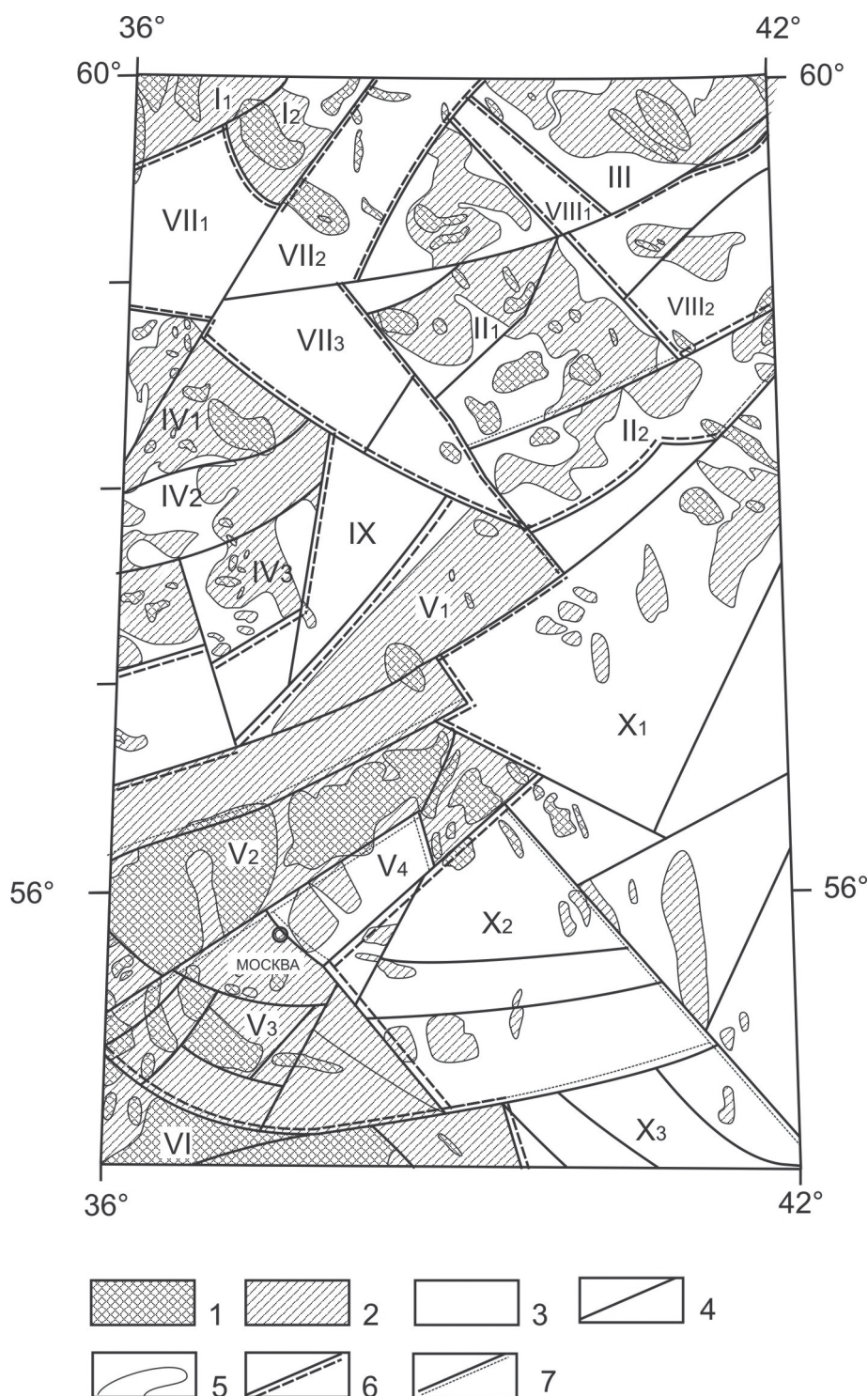


Рис. 1. Структурно-геоморфологическая карта юго-западного крыла Московской синеклизы. Орографические формы, структурно-обусловленные: 1, 2 – основные возвышенности, абсолютные отметки: 1 – более 200 м, 2 – 150–200 м; 3 – низменности и их сопряженные склоны с возвышенностями; 4 – зоны трещиноватости; 5 – границы отдельных структур; 6 – границы структур 1-го порядка; 7 – границы структур 2-го и более высоких порядков. Цифрами на карте обозначены возвышенности: I – Белозерская (I₁ – Судское поднятие, I₂ – Андогское поднятие), II – Даниловская (II₁ – Валдайское поднятие, II₂ – Буйское поднятие), III – Харовская, IV – Бежецкая (IV₁ – Овищенское поднятие, IV₂ – Мологская впадина, IV₃ – Медведицкое поднятие), V – Московская (V₁ – Борисоглебское поднятие, V₂ – Клинско-Дмитровская гряда, V₃ – Можайское поднятие, V₄ – Ногинская впадина), VI – Средне-Русская; низменности: VII – Рыбинская (VII₁ – Чагодощская, VII₂ – Шекснинская, VII₃ – Дарвинская), VIII – Кубенская (VIII₁ – Устюганская, VIII₂ – Авниганская), IX – Угличская, X – Мещерская (X₁ – Костромская, X₂ – Шатурская, X₃ – Касимовская)

щенское и Медведицкое поднятия представляют собой возвышенности со средними высотами около 200 м и многочисленными локальными поднятиями,

высоты которых превышают 200 м. Эти поднятия сложены алевролитами, глинами, песчаниками среднепермского возраста, а к наиболее возвышенным

участкам приурочены выходы известняков и доломитов среднего и верхнего карбона. В пределах Мологской впадины вскрываются глины, алевролиты и пески нижнего триаса.

Московская возвышенность (V), расположенная в центральной части района и характеризующаяся значительными высотами, имеет преимущественно северо-восточное простирание. Северо-восточный склон возвышенности — *Борисоглебское поднятие* (V_1) с высотами, не превышающими 200 м, в то время как центральная часть поднятия — *Клинского-Дмитровская гряда* (V_2) — имеет высоты 200–250 м и выше и интенсивно расчленена эрозией. Борисоглебское поднятие четко выражено в дочетвертичных отложениях. Данная структура сложена породами юрской и меловой систем, причем меловые отложения приурочены в основном к возвышенным участкам. К югу от Москвы высоты снижаются, образуя отдельные *Можайские поднятия* (V_3) с высотами от 150 до 200 м, часто сложенные краевыми моренными холмами и грядами, а к северо-востоку располагается частная *Ногинская впадина* (V_4) с отдельными небольшими локальными поднятиями.

Среднерусская возвышенность (VI) расположена на северном пологом крыле Воронежской антеклизы и имеет практически субмеридиональное простирание с высотами, превышающими 250 м, которые снижаются к востоку. В данной работе рассматривается только незначительная северная часть данной структуры. Дочетвертичные отложения представлены меловыми терригенными морскими осадками, которые перекрыты четвертичными отложениями донского горизонта нижнего плейстоцена только на севере и востоке. По окраинам данная структура интенсивно расчленена эрозией, там, в глубоких долинах, вскрываются породы юрского и девонского возраста. Зоны трещиноватости, выявленные в пределах данной структуры, имеют как северо-западное, так и северо-восточное простирание. Впадины, выявленные в результате структурно-геоморфологического дешифрирования, расположены преимущественно на севере, а также на востоке.

Рыбинская впадина (VII) находится на севере исследуемого района, имеет сложное строение и четко подразделяется на три сегмента: *Чагодощский* (VII_1), разделяющий Белозерскую и Бежецкую возвышенности, *Шекснинский* (VII_2) и *Дарвинский* (VII_3). Шекснинский сегмент впадины имеет северо-восточное простирание, а Дарвинский — северо-западное. Во впадине распространены преимущественно болотные отложения голоцена и аллювиально-озерные отложения верхнего плейстоцена.

Кубенская впадина (VIII), расположенная к востоку от Рыбинской впадины, также имеет сложное строение и два сегмента: *Устюганский* ($VIII_1$) и *Авнигский* ($VIII_2$). Устюганский сегмент имеет северо-западное простирание, а Авнигский — северо-восточное. В пределах последнего наблюдается значительное

частное поднятие с высотами, превышающими 200 м при средних высотах впадины 100–150 м. Четвертичные отложения, слагающие данную структуру, представлены преимущественно болотными осадками голоцена и аллювиально-озерными отложениями верхнего плейстоцена, присутствуют и водно-ледниково-озерные отложения осташковского горизонта.

Угличская впадина как бы продолжает к югу Рыбинскую. Она имеет северо-восточное простирание и разбита на сегменты зонами трещиноватости практически субмеридионального простирания. Четвертичные отложения представлены преимущественно водно-ледниковыми и озерно-водно-ледниковыми отложениями московского горизонта.

Мещерская впадина (X), занимающая весь восток района, имеет сложное строение и разбита многочисленными зонами трещиноватости. Северная часть впадины — *Костромская* (X_1) — имеет северо-восточное простирание и на востоке осложнена частными Галичскими поднятиями с высотами от 150 до 200 м, а на юге — Окско-Цнинским валом, имеющим практически субмеридиональное простирание. На северо-восточном склоне впадины на границе с Даниловской возвышенностью поверхность понижается до 50–100 м. В центральной части впадины с условным названием *Шатурская* (X_2) зоны трещиноватости имеют субширотное простирание. Центральная часть впадины сложена породами пермской и каменноугольной систем, а по ее бортам вскрываются породы юры и мела. Перекрывающие их четвертичные отложения представлены водно-ледниковыми и озерными отложениями донского горизонта нижнего плейстоцена.

Сравнение новейших структур чехла со структурами фундамента

Для сравнения выявленных с помощью структурно-геоморфологического метода новейших структур (рис. 1) со структурами фундамента был создан ГИС-проект, который позволил провести пространственный и тематический анализ собранных материалов в единой картографической системе. Анализ имеющихся к настоящему моменту материалов предшественников на исследуемый регион позволил нам составить первоначальную структуру ГИС. Структура нашего проекта включает три блока: базовый, тематический, результаты. Базовый блок содержит информацию об орографическом, геологическом и тектоническом строении региона работ. Тематический блок включает информацию, полученную в результате камеральной обработки топографических, геологических и тектонических данных на исследуемый регион (карта рельефа фундамента ВЕП масштаба 1:2 500 000 (Карта рельефа..., 1986), карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей масштаба 1:5 000 000 (Карта новейшей..., 1979), карта дочетвертичных образований масштаба 1:1 000 000, карта четвертичных

образований масштаба 1:1 000 000, Tectonic map of the basement of the East-European Craton 1:10 000 000 (1984) и др.) На этой основе получены результирующие карты (структурно-геоморфологическая и др.).

Анализ карт показал, что наиболее крупные формы рельефа соответствуют тектоническим структурам того же масштаба. Так, Среднерусская возвышенность располагается на склоне Воронежской антеклизы, а преимущественно низменный рельеф северной части исследуемого района приурочен к крылу Московской синеклизы.

Выделенные по рельефу возвышенности меньших размеров также наследуют выступы фундамента: Белозерская возвышенность частично отвечает Пестовскому и Андомскому выступам, Харовская возвышенность может соответствовать склону выступа Ветреного пояса Мезенской впадины фундамента, имеющему субмеридиональное простирание, Медведицкое поднятие в пределах Бежецкой возвышенности расположено на склоне Торжокского выступа фундамента, Московская возвышенность соответствует Истринскому выступу фундамента. Однако границы возвышенностей не всегда совпадают с контурами выступов фундамента.

Что касается впадин, выраженных в рельефе, то они лишь иногда расположены над понижениями фундамента. Так, Шекснинский и Дарвинский сегменты Рыбинской впадины наследуют Любимско-Солигаличскую впадину фундамента, однако их общее простирание не совпадает с простиранием этой впадины. В то же время Чагодошский сегмент впадины расположен над Пестовским выступом.

На структурно-геоморфологическую карту были также нанесены крупные разломы фундамента (рис. 2), показанные на карте рельефа докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы, составленной В.В. Бронгулеевым с соавторами (Рельеф..., 1983). Почти все эти разломы ограничивают авлакогены. Сравнение разломов с изображенными на карте зонами трещиноватости показывает, что последние протягиваются частично (например, в районе Подмосковского авлакогена) или почти полностью (в районе Валдайского и Пачелмского авлакогенов) вдоль разломов фундамента. Иногда вдоль разломов прослеживаются границы выделенных новейших структур (Южный Солигаличский разлом), что может свидетельствовать о том, что эта граница также представляет собой зону трещиноватости.

При этом, как правило, зоны трещиноватости расположены не прямо над разломами, а немного смещены в сторону от них. Явная связь древних разломов фундамента со структурами, выраженными в рельефе, свидетельствует о том, что в новейшее время происходила активизация этих разломов; при этом, вероятно, преобладала сдвиговая составляющая смещений. С каждым годом появляется все больше публикаций о роли горизонтальных сдвигов фундамента древних и молодых платформ в новейшей тектонике. Так, в результате

исследований в Каспийском регионе коллектив авторов (Леонов и др., 2010) пришел к выводу, что крупные региональные нарушения имеют значительные горизонтальные перемещения и большинство из них активны в настоящее время. А.И. Тимурзиев (2009) обосновал наличие сдвигов фундамента в пределах нескольких разновозрастных осадочных бассейнов Земли и показал, что такие сдвиги, независимо от возраста основания, являются деформациями новейшего этапа. К аналогичным выводам пришли и другие исследователи (Копп, 2004; Сим, Михайлова, 2008; Сим и др., 2007).

Экспериментальные данные о развитии зон трещиноватости над сдвигами фундамента

Начало физического моделирования зон сдвига было положено классическими работами Г. Клооса и В. Риделя в 1928 и 1929 гг. С тех пор в разных лабораториях мира были проведены тысячи экспериментов. Достаточно полная сводка зарубежных работ приведена в статье (Dooley, Schreurs, 2012). У нас в стране обзор многих экспериментов по моделированию сдвигов и их анализ осуществили Ю.Л. Ребецкий с соавторами (2008). Зоны простого сдвига чаще всего моделируют, используя так называемую «модель Риделя». Это две жесткие плиты («фундамент»), смещающиеся одна относительно другой вдоль «разлома». На плитах лежит «чехол» из того или иного эквивалентного материала. Как видно, это как раз та обстановка, которая возникает при активизации разломов фундамента платформ. Первые опыты проводились с использованием влажной глины в качестве эквивалентного материала, а затем стал широко применяться и песок. Были тщательно изучены все аспекты развития комплекса разрывов разного ранга (структурный парагенез), формирующегося в чехле при сдвиге в фундаменте. В нашей стране большой вклад в экспериментальное изучение зон сдвига внес коллектив исследователей лаборатории тектонофизики Института земной коры РАН, некоторые результаты его работы уже обобщены (Семинский, 2003; Борняков и др., 2014).

При сдвиговых смещениях по разлому основания в чехле из эквивалентного материала формируется так называемая область активного динамического влияния разлома, расширяющаяся вверх от разлома фундамента. Ее ширина зависит от многих параметров, но в целом сопоставима с мощностью чехла. В зависимости от возрастающей во времени амплитуды смещения по разлому выделяется несколько стадий развития разломной зоны — от появления первых («опережающих») трещин до формирования магистрального разлома. В условиях платформ величина сдвигания не может быть велика и структурообразование обычно останавливается на ранней стадии. В это время в чехле формируются сколы Риделя — R и R' в экспериментах с влажной глиной, имитирующей чехол (рис. 3), и

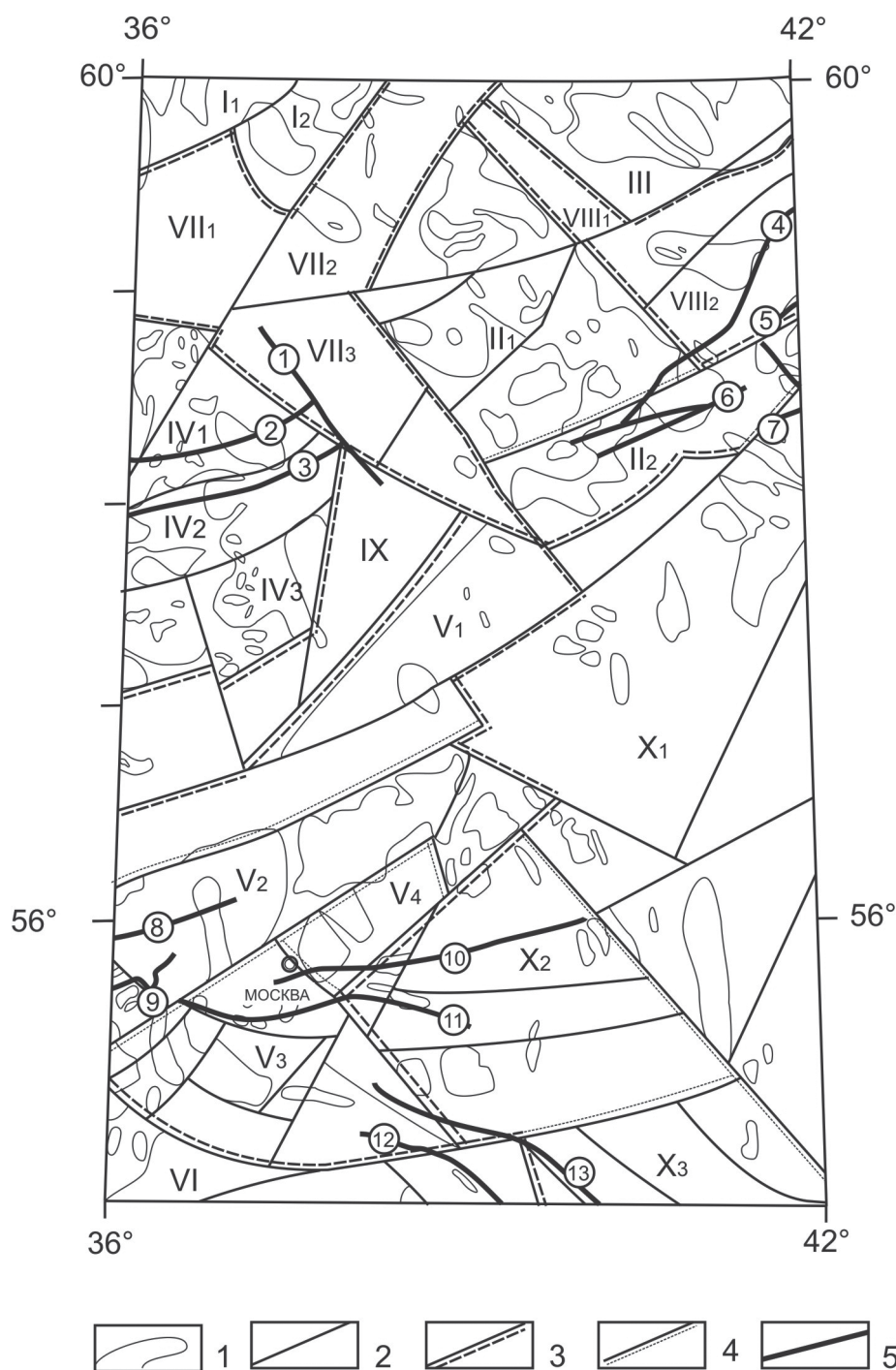


Рис. 2. Структурно-геоморфологическая карта юго-западного крыла Московской синеклизы с разломами фундамента: 1 – границы разновысотных возвышенностей и низменностей; 2 – зоны трещиноватости; 3 – границы структур 1 порядка; 4 – границы структур 2-го и более высоких порядков; 5 – разломы фундамента, по (Рельеф докембрийского..., 1983). Цифрами на карте обозначены разломы фундамента: 1 – Рыбинский, 2 – Северо-восточный Валдайский, 3 – Юго-восточный Валдайский, 4 – Северный Солигаличский, 5 – Северный Рослятинский, 6 – Южный Солигаличский, 7 – Южный Рослятинский, 8 – Северный Гжатский, 9 – Южный Гжатский, 10 – Северный Подмосковский, 11 – Южный Подмосковский, 12 – Юго-Западный Пачелмский, 13 – Северо-Западный Пачелмский

только R в экспериментах с песком или другим гранулированным материалом. Лишь изредка могут появляться трещины P и L, характерные для следующей, поздней дизъюнктивной стадии.

В основном происходит продвижение фронта структурообразования вверх от разлома фундамента к поверхности. Однако математическое моделирование (Ребецкий, 1987) показало, что близ

поверхности имеется еще один небольшой максимум напряжений, ответственных за формирование трещин (рис. 4, а). Эксперименты с влажной глиной, проведенные А.В. Михайловой (Сим, Михайлова, 2008), подтвердили, что разрушение происходит в двух направлениях (рис. 4, б–г). Таким образом, даже при небольших амплитудах смещения по сдвигу в фундаменте платформы на поверх-

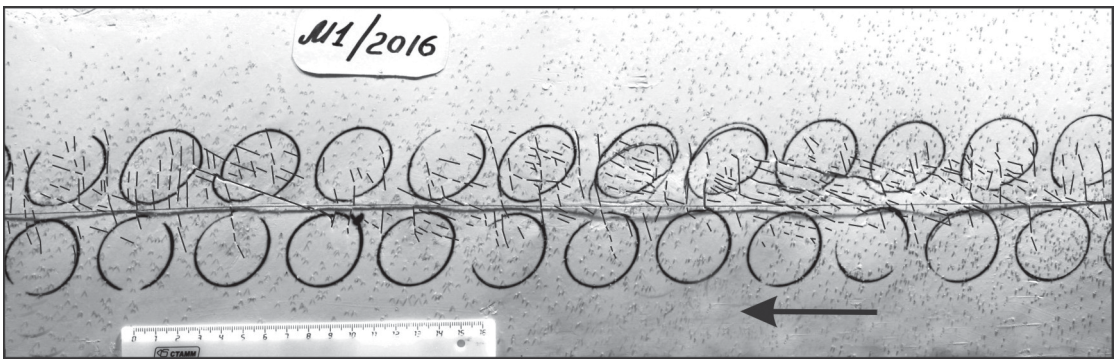


Рис. 3. Развитие трещиноватости в зоне простого сдвига. Опыт M1/2016. «Чехол» — влажная (около 40%) каолиновая глина мощностью 6 см, «фундамент» — две деревянные доски. Одна из них (со стрелкой) движется со скоростью примерно 8 см/час. Смещение 4,1 см. Ранняя дизъюнктивная стадия, развиты лишь опережающие сколы R и R'. Проекция «разлома» на поверхность показана ниткой, протягивающейся вдоль всего образца. Трещиноватость сосредоточена преимущественно на неподвижном крыле сдвига

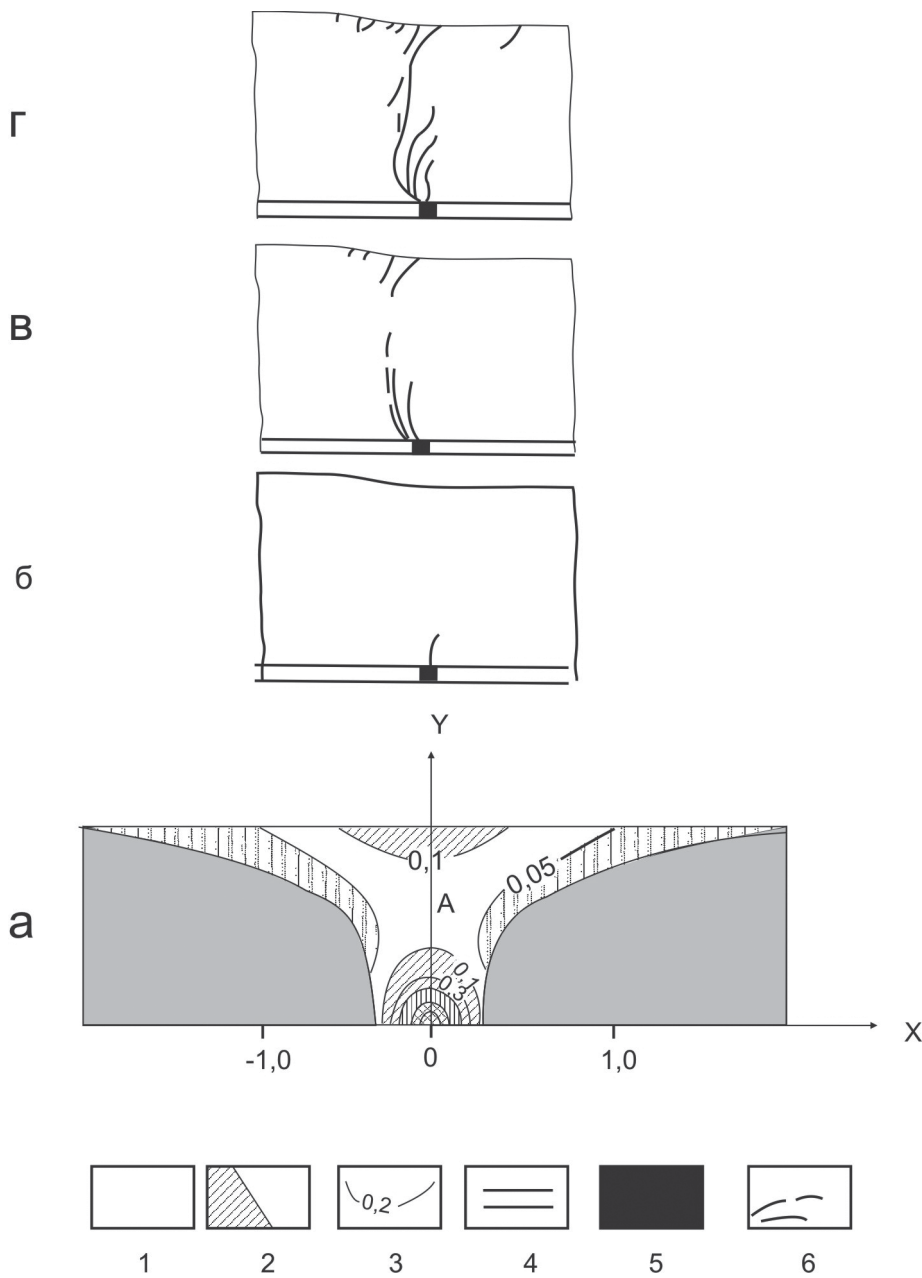


Рис. 4. Разрушение слоя над сдвигом в его основании, по (Сим, Михайлова, 2008):
а — расчетные эквивалентные напряжения, ответственные за разрушение;
б–г — последовательные стадии развития разрывов в эксперименте: б — зарождение разрыва в слое над областью сдвига в основании, в — развитие разрывов двумя группами (снизу и сверху), г — объединение обеих групп разрывов. 1 — область отсутствия разрывов; 2 — область скалывания; 3 — изолинии эквивалентных напряжений; 4 — блоки фундамента в основании; 5 — зона дробления; 6 — разрывы (на разрезе)

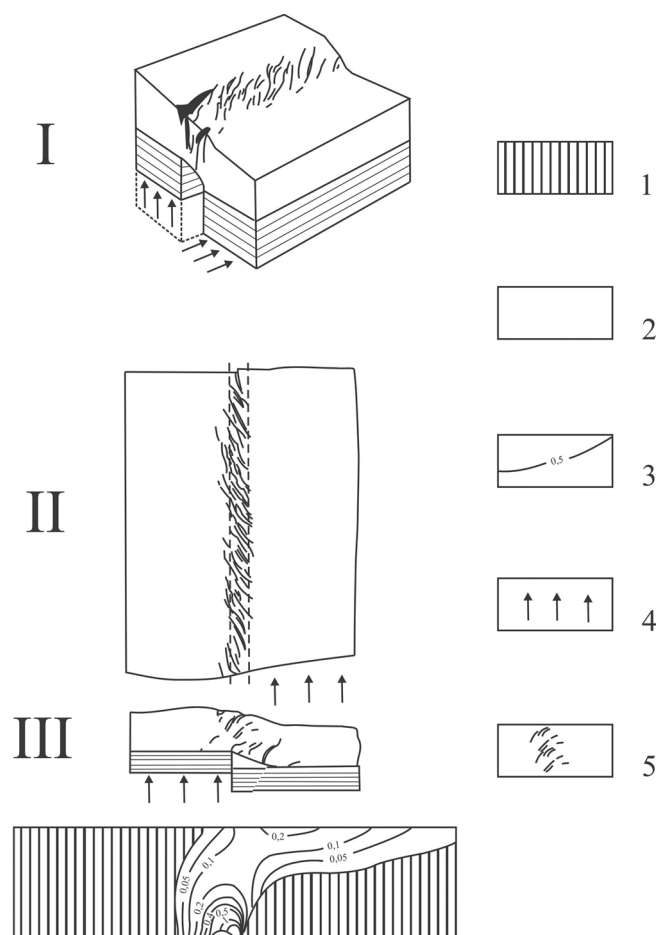


Рис. 5. Разрушение в модели сбросо-сдвига с разломом в основании слоя, по (Михайлова, 2002): I — пространственное изображение; II — изображение на поверхности модели; III — распределение эквивалентных напряжений, ответственных за разрушение (по Мору), полученных в результате расчета. 1 — область отсутствия разрушения; 2 — область скалывания; 3 — изолинии эквивалентных напряжений; 4 — направления перемещения блоков основания модели; 5 — трещины и разрывы

ности чехла может сформироваться зона трещиноватости. Такая зона является ослабленной, и если активизация разломов происходила в новейшее время, то она может разрабатываться речной и овражной сетью.

Выше уже говорилось, что на изученной части ВЕП предполагаемые зоны трещиноватости, выделенные на основании геоморфологических признаков, часто не совпадают с проекцией разлома фундамента на поверхность, а протягиваются на некотором удалении от них. Это может происходить по двум причинам.

Многочисленные эксперименты, проведенные нами в лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ имени М.В. Ломоносова, по воспроизведению сдвиговых зон Риделя с использованием влажной глины и песка в качестве эквивалентного материала показали, что зона динамического влияния разлома на поверхности всегда немного смещена в сторону неподвижного крыла (рис. 3). Представление о том, что в зависимости от абсолютной кинематики разломов структурообразование на противоположных

крыльях может идти по-разному, было высказано в работе (Гончаров и др., 2007); для случая сдвиговых деформаций оно получило экспериментальное подтверждение.

Второй причиной отклонения зоны трещиноватости на поверхности чехла от проекции разлома на ту же поверхность может быть наличие вертикальной составляющей перемещений по такому разлому. Изучением особенностей формирования структур разрушения в чехле над активным разломом фундамента для разных кинематических типов разломов занималась А.В. Михайлова (2002). На основании математического и аналогового моделирования она показала, что для вертикальных разрывов, а также разрывов с вертикальной составляющей так называемая «зона скалывания» (область, где соотношения напряжений благоприятны для развития трещин скалывания и где в экспериментах они действительно развиваются) имеет асимметричный характер. В качестве примера на рис. 5 приведен сбросо-сдвиг, и хорошо видно, что максимальная концентрация трещин в верхней части чехла имеет место на некотором расстоянии от проекции разлома фундамента на поверхность.

До сих пор речь не шла о структурах третьего порядка, плохо различимых на структурно-геоморфологической карте (рис. 1). На рис. 6 показан ее увеличенный фрагмент, на котором изображена часть Московской возвышенности с пересекающим ее Южным Подмосковным разломом. Вдоль этого разлома протягивается цепочка вытянутых поднятий. Наличие таких поднятий, которые в отечественной литературе принято называть валами, на платформах было отмечено уже давно. Как пишут В.Е. Хаин и М.Г. Ломизе (2005), часто они развиты в бортах авлакогенов над границными разрывами (это как раз такой случай). Выраженность в рельефе и пространственная связь с разломами фундамента приводят исследователей к логичному выводу, что эти поднятия сформировались при активизации таких разломов в новейшее время. Однако мнения о механизме формирования поднятий расходятся. В данном случае морфология и расположение поднятий свидетельствуют о том, что они не могли сформироваться ни в связи с опусканием крыльев по краевым сбросам авлакогенов, ни в связи с инверсией авлакогена. Точку зрения, что возникновение валов обусловлено вертикальными колебательными движениями восходящего характера, проявившимися вдоль ослабленной зоны фундамента (Успенская, 1952), опровергнуть труднее. Тем не менее так же, как и многие современные исследователи, мы исходим из предположения, что при активизации разломов фундамента преобладает сдвиговая составляющая. В экспериментах по воспроизведению сдвиговых зон над разломом фундамента всегда формируются в той или иной степени выраженные эшелонированные (кулисообразные) поднятия.

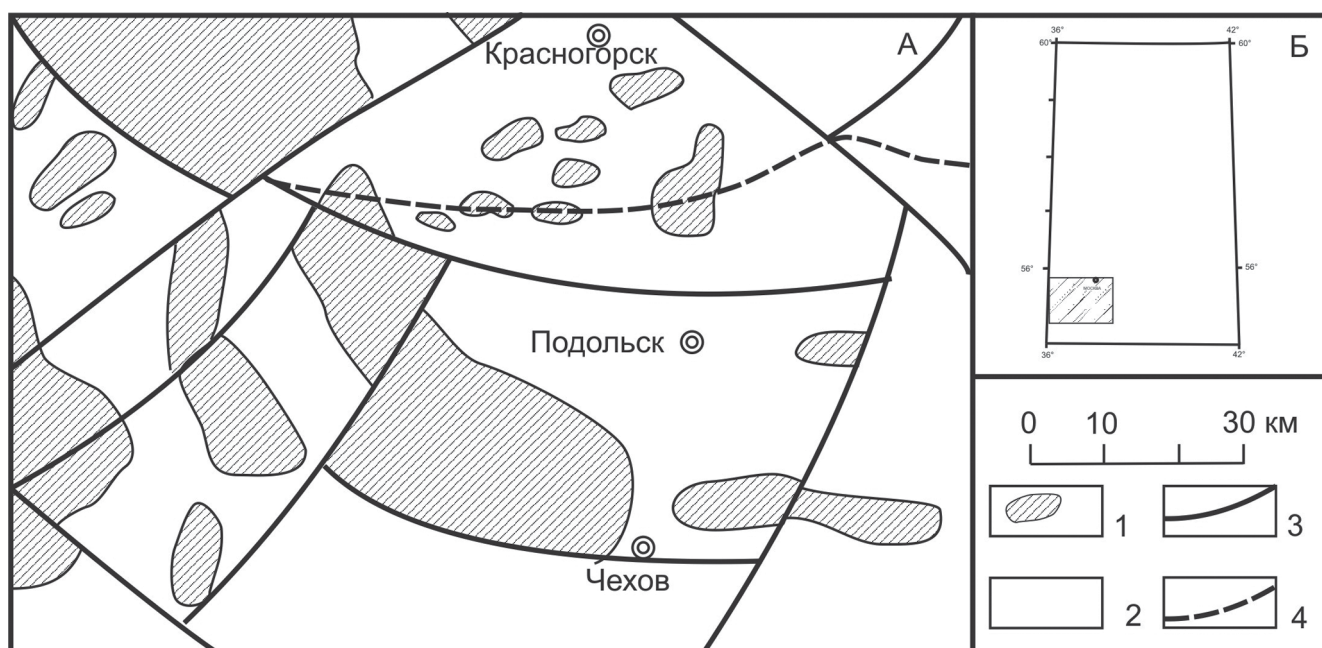


Рис. 6. Структурно-геоморфологическая схема Московской возвышенности (А): 1 — возвышенности с высотами более 200 м; 2 — низменности и их сопряженные с возвышенностями склоны; 3 — границы структур, выделенные по геоморфологическим данным; 4 — Южный Подмосковский разлом фундамента. Положение структурно-геоморфологической схемы Московской возвышенности на структурно-геоморфологической схеме юго-западного крыла Московской синеклизы (Б)

Такие поднятия бывают двух типов. Первый тип — брахискладки. В экспериментах они формируются в глинистых слоистых материалах и располагаются эшелонированно на небольшом расстоянии друг от друга (Фролова и др., 2016а). Оси этих брахискладок перпендикулярны оси максимального сжатия в зоне сдвига, и, таким образом, они являются складками продольного укорочения. Именно такие складки входят в качестве члена структурного парагенеза сдвиговых зон во все учебные пособия, посвященные структурной геологии (часто их называют складками присдвигового волочения, но «волочение» в данном случае не играет никакой роли). Впервые этот тип складок был описан в районе сдвига Сан-Андреас, а их подробный анализ приведен в известной работе (Sylvester, 1988).

Второй тип — поднятия. В экспериментах по воспроизведению зон сдвига формируются также валообразные поднятия, оси которых ориентированы под небольшим углом к оси сжатия, следовательно, эти валы никак не могут быть складками продольного укорочения — их формирование связывают с поднятиями между концами смежных сколов Риделя. Природным аналогом описываемых структур, по-видимому, являются нефтегазоносные валы, известные на севере Западно-Сибирской плиты (Фролова и др., 2016а). В лаборатории тектонофизики МГУ имени М.В. Ломоносова проведена серия экспериментов для изучения механизма формирования и морфологии валообразных поднятий в чехле над сдвигом фундамента (Фролова и др., 2016б).

«Фундаментом» в экспериментах служили две доски длиной 90 см, смещающиеся друг относительно

друга со скоростью 0,7 мм/мин. в специальном приборе. «Чехлом» служил песок различной зернистости, сухой и влажный, а также с примесью солидола. Мощность «чехла» составляла 3 или 4,5 см. Песок широко используется зарубежными исследователями для моделирования верхних частей земной коры, и мы считаем, что большинство структур сдвиговых зон больше похоже на модели из песка.

При небольшой амплитуде сдвига формировался вал по всей длине «разлома в фундаменте» (рис. 7, а), при этом в сухом песке он был хорошо выражен, а во влажном едва заметен. Появление этого вала вызвано увеличением объема гранулированного материала при деформации (дилатансия). При увеличении амплитуды сдвига постепенно начинали формироваться сколы Риделя, а единый вал распадался на ряд более мелких асимметричных вытянутых эшелонированных поднятий, расположенных между этими сколами (рис. 7, б); их форма, степень вытянутости и конфигурация могут быть разнообразными. При дальнейшем движении поднятия постепенно увеличивали высоту и все больше разобщались. В конце концов их рост прекращался, но они продолжали отодвигаться друг от друга, располагаясь уже не кулисообразно, а четковидно (рис. 7, в). Это очень важный результат, поскольку до сих пор считалось, что только эшелонированное расположение ряда поднятий может свидетельствовать об их формировании в зоне сдвига. Наши эксперименты показали, что это не всегда так.

Описанные структуры аналогичны известным локальным поднятиям типа *push-up* (*pop-up*), которые формируются между двумя разломами сдви-

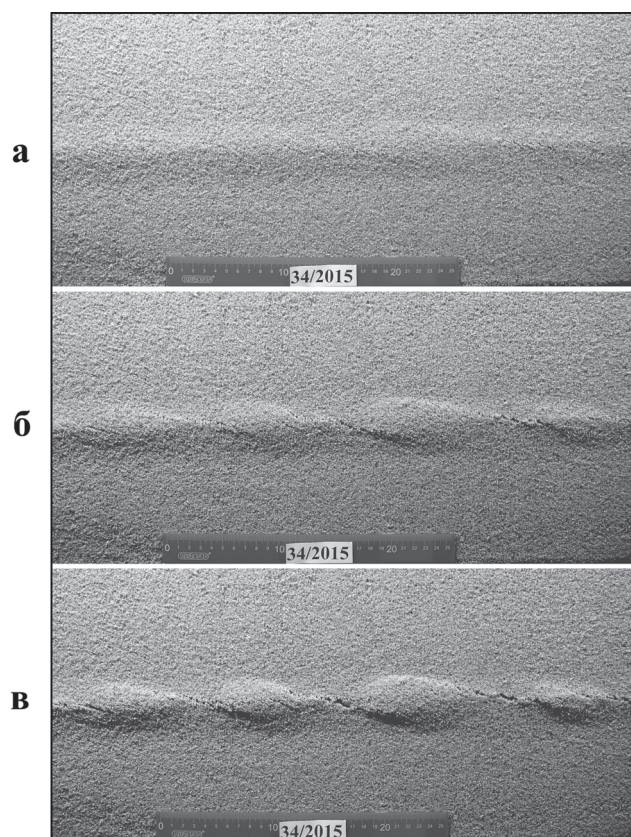


Рис. 7. Валообразные поднятия, развивающиеся в чехле над сдвигом в основании. Опыт 34/2015. Крупнозернистый песок с примесью солидола (1%) и толщиной 3 см, скорость сдвига 3 см/час. Пояснения в тексте

гового типа в обстановке транспрессии. Разница заключается в том, что в нашем случае транспрессионное поле напряжений является полем второго ранга и регулярно повторяется вдоль единого разлома.

Сравнение валообразных поднятий, расположенных вдоль Южного Подмосковского разлома фундамента (рис. 6), с результатами экспериментов позволяет высказать предположение, что эти поднятия могли являться следствием сдвиговых перемещений по названному разлому во время его новейшей активизации.

Анисимова О.В., Короновский Н.В. Линеаменты центральной части Московской синеклизы и их связь с разломами фундамента // Геотектоника. 2007. № 4. С. 71–90.

Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю. и др. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 823–861.

Гарецкий Р.Г. Основные черты тектоники и геодинамики Восточно-Европейской платформы // Актуальные проблемы геологии нефти и газа. М.: Нефть и газ, 2005. С. 19–56.

Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные движения фундамента Западной Сибири // Геол. нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–18.

Заключение

Структурно-геоморфологический анализ топографических карт позволил выделить в пределах юго-западного крыла Московской синеклизы новейшие возвышенности и низменности, а также зоны трещиноватости. Сравнение с картами рельефа фундамента показывает, что чаще всего возвышенности расположены над выступами фундамента, хотя их контуры могут и не совпадать. Это свидетельствует о частичной унаследованности положительных структурных форм.

Установлено также, что на участках, где под чехлом расположены крупные разломы фундамента, зоны трещиноватости на поверхности полностью или частично протягиваются вдоль этих разломов, что говорит о новейшей активизации последних. Предполагается, что смещение по разломам носило в значительной мере сдвиговый характер. Расположение некоторых зон трещиноватости на небольшом расстоянии относительно проекции разлома в фундаменте получает объяснение, если предположить, что либо одно крыло разлома двигалось с большей скоростью, чем другое, либо имела место вертикальная составляющая перемещений. В тех экспериментах по воспроизведению зон сдвига в системе «чехол–фундамент», в которых подвижным являлось лишь одно крыло, максимум трещиноватости всегда смещался в сторону крыла неподвижного. Математическое и аналоговое моделирование разрывообразования в чехле над разломом основания показывает, что в случае сбросо- или взбросо-сдвига область формирования сколовых трещин также асимметрична.

Цепочка валообразных поднятий над одним из разломов фундамента также получает простое объяснение с помощью аналогового моделирования — это валы push-up (pop-up) типа, формирующиеся в обстановке транспрессии между концами смежных сколов Риделя. Их наличие свидетельствует об активизации разломов фундамента и о движениях сдвигового характера в новейшее время.

ЛИТЕРАТУРА

Гогоненков Г.Н., Тимурзиев А.И. Сдвиговые деформации в чехле Западно-Сибирской плиты и их роль при разведке и разработке месторождений нефти и газа // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 3. С. 384–400.

Гончаров М.А., Фролова Н.С., Рожин П.Н., Селезнева Н.Н. Проблема выявления абсолютной кинематики противоположных крыльев разрывных нарушений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 2007. № 4. С. 12–19.

Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. М-б 1:5 000 000 / Сост. Н.И. Николаев, А.А. Наймарк. М.: Мингео СССР, 1979.

Карта рельефа дорифейского фундамента Восточно-Европейской платформы. М-б 1:5 000 000 / Отв. сост. В.В. Бронгулеев, И.С. Остапук. М.: Картографическое предприятие ПГО «Центргеология», 1986.

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 339 с.

Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А. и др. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур «пропеллерного» типа // Геотектоника. 2009. № 5. С. 50–64.

Корчуганова Н.И., Костенко Н.П., Макарова Н.В. Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. М.: МПР РФ, Геокарт, МГГА, 2001. 212 с.

Костюченко С.Л., Солодиков Л.Н. К геологическому строению Московии: глубинная структура и тектоника // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1997. Т. 72, вып. 5. С. 6–9.

Леонов Ю.Г., Волож Ю.А., Антипов М.П. и др. Консолидированная кора Каспийского региона: опыт районирования. М.: ГЕОС, 2010. 51 с.

Макаров В.И. Об активных разломах и их рельефообразующей роли на Русской платформе // Геоморфология. 1999. № 3. С. 39–41.

Михайлова А.В. Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными разломами фундамента в свете учения М.В. Гзовского // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 212–224.

Муратов М.В., Микунов М.Ф., Чернова Е.С. Основные этапы тектонического развития Русской платформы // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1962. № 11. С. 3–28.

Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 491 с.

Объяснительная записка к карте новейшей тектоники СССР и сопредельных областей масштаба 1:5 000 000 / Сост. Н.И. Николаев, А.А. Наймарк и др. М.: Мингео СССР, 1979.

Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С. 41–56.

Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонофизического моделирования // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2008. С. 103–140.

Рельеф докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Объяснит. зап. к карте масштаба 1:2 500 000 / Сост. В.В. Бронгулеев, И.В. Воробьев и др. М.: Моск. ун-т, 1983. 77 с.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 244 с.

Сим Л.А., Михайлова А.В. Разломы осадочного чехла платформ и методы их исследования // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2008. С. 141–148.

Сим Л.А., Михайлова А.В., Войтенко В.Н. Сдвиговая тектоника платформ (по данным моделирования и реконструкции неотектонических напряжений) // Мат-лы Всерос. совещ. «Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии». 18–24 сентября 2007 г. Т. 2. Иркутск, 2007. С. 147–151.

Тимурзиев А.И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью): Автореф. дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. М., 2009. 40 с.

Успенская Н.Ю. Некоторые закономерности нефтегазонакопления на платформах. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1952. 155 с.

Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Некоторые структурные следствия новейших сдвиговых движений по древним разломам фундамента платформ. Аналогия с результатами физического моделирования // Мат-лы III Всерос. совещ. и II Всерос. молодежной школы по современной геодинамике «Современная геодинамика центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе». Иркутск: ИЗК СО РАН, 2016а. С. 120–125.

Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка // Мат-лы Всерос. конф. с международным участием «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016б. Т. 2. С. 385–392.

Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и западная Азия. М.: Недра, 1977. 379 с.

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.

Хераскова Т.Н. Значение работ Н.С. Шатского по тектонике древних платформ и их нефтегазоносности в свете современных взглядов // Геотектоника. 2005. № 4. С. 3–24.

Хераскова Т.Н., Андреева Н.К., Воронцов А.К., Каграманян Н.А. История развития осадочного бассейна Московской синеклизы в раннем палеозое // Литосфера. 2005. № 2. С. 172–191.

Шатский Н.С. Основные черты строения и развития Восточно-Европейской платформы. Сравнительная тектоника древних платформ. Статья 1 // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1946. № 1. С. 3–36.

Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 300 с.

Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intra-plate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. Vol. 574–575. P. 1–71.

Sylvester A.G. Strike slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull. 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.

Tectonic Map of the Basement of the East European Craton. Scale 1:10 000 000. 1984.

Сведения об авторах: Брянцева Галина Владимировна — канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: bryan.bryan@yandex.ru; Фролова Наталья Сергеевна — канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: n.s.frolova@mail.ru; Лубнина Наталья Валерьевна — докт. геол.-минерал. наук, проф. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: natlubnina@yandex.ru; Косевич Наталья Игоревна — канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: nkosevich@googlemail.com