

УДК 551.243 (571.1)

К ВОПРОСУ О ГЕНЕЗИСЕ ПУЧЕЖ-КАТУНКСКОЙ СТРУКТУРЫ (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА)

С.Ю. Колодяжный

Геологический институт РАН, Москва

Поступила в редакцию 09.04.13

Пучеж-Катунская (ПК) структура сформировалась в результате последовательного проявления тектонических и импактных (либо эксплозивных) событий. В ее строении обособлен крупный, вероятно, метеоритный кратер, который локализован в пределах Владимирско-Вятской зоны дислокаций, разделяющей крупнейшие структуры Восточно-Европейской платформы. Длительная эволюция ПК структуры включает четыре стадии: 1) покровно-складчатые и 2) транс-прессионные деформации герцинского этапа; 3) импактное формирование кратерной воронки и системы радиально-концентрических нарушений в ранней юре; 4) тектоническая активизация киммерийско-альпийского этапа. «Прицельное» попадание метеорита в крупнейшую тектоническую зону выглядит маловероятным. Однако имеющиеся материалы (амплитуды импактного воздействия (до 50 ГПа) и закономерное их снижение с глубиной) не позволяют отказаться от метеоритного генезиса ПК структуры.

Ключевые слова: структура, тектоническая эволюция, импактная структура, Нижегородская обл.

Введение

В последнее время проблемы глобальных катастроф Земли волнуют широкие круги научного сообщества. Среди них особое место занимают космогенные (метеоритные) и геолого-геофизические потенциальные события, способные привести к тотальному ущербу в биосфере. К счастью, за историческое время наблюдений крупных катастроф такого рода не происходило. Судить о характере их проявления и последствиях возможно лишь на основании изучения древних импактных и различных геологических структур.

Одним из примеров проявления палеокатастроф служат своеобразные Пучеж-Катунские дислокации пород осадочного чехла и ассоциирующие с ними брекчии, расположенные почти в центре Восточно-Европейской платформы (ВЕП) в области Среднего Поволжья (рис. 1). Они были отмечены еще в XIX в. Р.И. Мурчисоном и на протяжении более ста лет представляли собой геологическую загадку. Обзор исследований и основных взглядов на происхождение Пучеж-Катунской (ПК) структуры приводится во многих работах (Глубокое..., 1999; Горецкий, 1962). По мере накопления геологических материалов эти дислокации рассматривались в качестве древних оползней, гляциодислокаций, проявлений диапиризма, как результат инъекционной или гравитационной тектоники.

После того как буровыми работами в пределах ПК структуры был выявлен Воротиловский выступ архейского фундамента, их происхождение стали связывать с тектоническими процессами, в частности с вертикальными перемещениями кристаллического цоколя и явлениями оползания осадков чехла на склонах поднятия (Нечитайло и др., 1959). Одновременно появи-

лись гипотезы о взрывном и вулканотектоническом происхождении данной структуры, сопоставляемой в последнем случае с трубкой взрыва (Варданянц, 1961; Нечитайло и др., 1959; Соловьёв, 1958). Эти взгляды получили развитие в представлениях Р.Р. Туманова о многофазной эксплозивной структуре, развивавшейся от поздней перми до средней юры (Туманов, 1973). Серьезными доводами в пользу этих представлений являются приуроченность ПК структуры к протяженной зоне тектонических нарушений и длительный период ее развития (Валеев, 1968, 1978; Геология..., 1967; Государственная..., 2000; Маракушев и др., 1993).

Альтернативой тектоническим и эксплозивным моделям явилась гипотеза импактного происхождения ПК структуры, основанная на ее морфологическом сходстве с воронками метеоритных кратеров (Масайтис, 1980; Фирсов, 1965). Эти представления были обоснованы материалами бурения Воротиловской скважины (5374 м) в области одноименного выступа фундамента. На их основе были составлены модели строения ПК импактной структуры, выявлены признаки ударного метаморфизма пород, а тектонические брекчии, развитые в области метеоритного кратера, были идентифицированы как коптогенные комплексы (Глубокое..., 1999).

Гипотеза метеоритного происхождения ПК структуры была принята многими исследователями, и как следствие одноименная зона дислокаций исчезла на современных тектонических и геологических картах. Однако, по мнению ряда геологов, отсутствие прямых признаков метеоритного вещества в составе «коптогенных» комплексов и приуроченность ПК структуры к протяженной зоне тектонических нарушений

по-прежнему оставляют вопрос о ее происхождении открытым (Государственная..., 2000).

Не имея цели подтвердить или опровергнуть ту или иную гипотезу в отношении ПК структуры, нами были проведены структурные исследования по изучению крупной тектонической зоны, с которой она связана. В процессе полевых работ использовались методы структурно-кинематического и парагенетического анализов, приемы которых были рассмотрены ранее (Лукьянов, 1965; Колодяжный, 2006, 2010; Копп, 2005).

Тектоническая позиция Пучеж-Катунской структуры

Пучеж-Катунская структура приурочена к протяженной зоне тектонических нарушений, которая проявлена в пределах всех структурных этажей платформы и хорошо выражена в конфигурации полей магнитных и гравиметрических аномалий. Согласно работе М.В. Минца с соавторами (Глубинное..., 2010), данная зона является крупнейшей тектонической границей для комплексов кристаллического фундамента ВЕП. Этими исследователями она рассматривается в качестве «пограничной» сутурной зоны, обрамляющей с юго-востока Среднерусский палеопротерозойский коллизионный пояс (рис. 1). Зона маркируется выходами краевых вулканогенно-осадочных (сутурных) поясов. Примерно от г. Владимира и до верхнего течения р. Вятки краевые пояса почти полностью выклиниваются, и данная зона нарушений служит непосредственной границей Среднерусского пояса и Волго-Уральского

архейского кратона ВЕП. В дальнейшем этот сегмент тектонического нарушения будет рассматриваться под названием Владимирско-Вятской зоны дислокаций (рис. 1).

Владимирско-Вятская зона (ВВЗ) также выражена в особенностях строения осадочного чехла ВЕП. Она разделяет Московскую синеклизу и Волго-Уральскую антеклизу (рис. 2, А). Ее тектоническая позиция согласуется с региональной структурой осадочного чехла, в частности с конфигурацией стратоизогипис верейского горизонта среднего карбона (рис. 2, А). В северо-восточной части ВВЗ плавно сливается с Вятско-Казанской зоной, расположенной над рифейскими трогами Вятско-Кажимского авлакогена (Государственная..., 1999; Копп, 2012).

Дешифрирование материалов дистанционных съемок позволило выделить в составе ВВЗ систему линеаментов, образующих пояс шириной от 30 до 60 км. В пределах центрального и северо-восточного сегментов ВВЗ линеаменты образуют структурный рисунок закономерного сочетания магистральных (продольных) и вторичных оперяющих (диагональных) сдвигов R и R' типов (рис. 2, Б). Здесь в строении зоны выявлены продольно и диагонально ориентированные к ее простиранию тектонические валы (Государственная..., 1999, 2000). Все это в целом свидетельствует о проявлении сдвиговых дислокаций. В юго-западном секторе зоны, где отмечается ее общий сигмообразный изгиб в плане, дешифрируются дугообразные фестончатые системы нарушений и ортогонально секущие их линеаменты, сочетание которых образует струк-

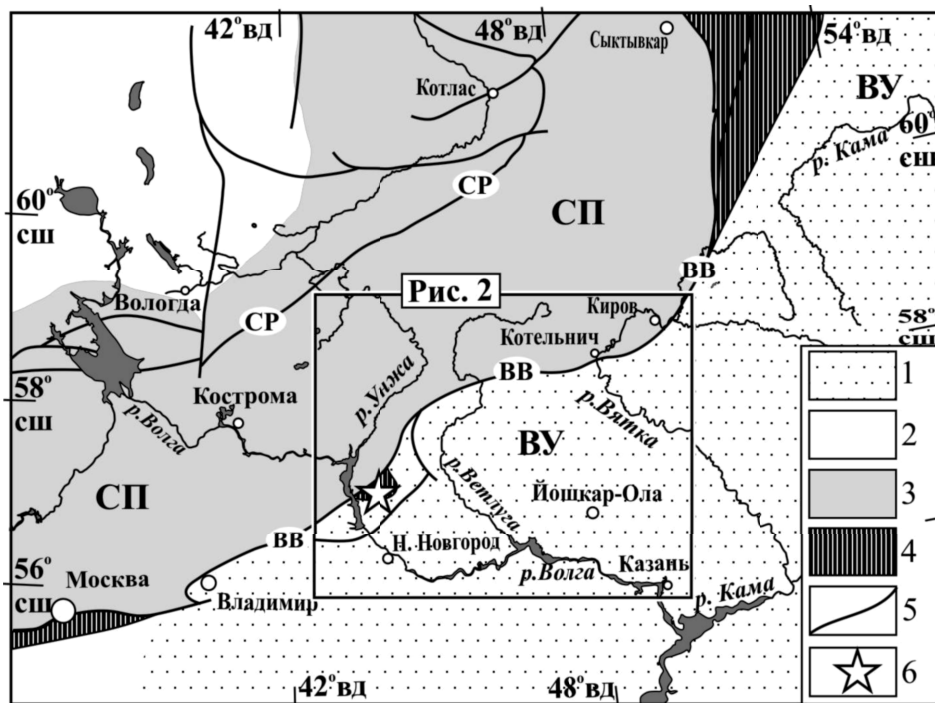


Рис. 1. Схема тектонического районирования фундамента ВЕП (на основе (Глубинное..., 2010)):

1–2 — архейские кратоны: 1 — Волго-Уральский, 2 — Карельский и др.; 3 — Среднерусский коллизионный пояс; 4 — палеопротерозойские сутурные пояса; 5 — крупнейшие зоны нарушений; 6 — местоположение Пучеж-Катунской структуры. ВУ — Волго-Урاليا, СП — Среднерусский пояс; СВ — Среднерусская зона; ВВ — Владимирско-Вятская зона

турный рисунок, характерный для сдвига-надвиговых систем дислокаций (рис. 2, Б). Именно к этому сегменту ВВЗ приурочена Пучеж-Катунская кольцевая депрессия. Результаты дешифрирования были заверены полевыми наблюдениями в долинах Волги, Унжи, Ветлуги и Вятки (см. ниже).

В пределах ВВЗ обнажаются отложения верхней перми, нижнего триаса, юры и нижнего мела, дислоцированные в различной степени. Наиболее значительные складчато-разрывные деформации отмечаются в пермских осадках юго-западного сегмента ВВЗ в обрамлении ПК структуры. В отложениях мезозоя их интенсивность заметно снижается: изредка отмечаются пологие складки и участки моноклинального (до 20–30°) залегания слоев, но широко развиты зоны трещиноватости и брекчирования, иногда тектонический меланж.

Геологическое строение Пучеж-Катунской структуры

Рассмотрим особенности геологического строения ПК структуры (депрессии) на основе синтеза современных и более ранних материалов (Валеев, 1968, 1978; Геология..., 1967; Глубокое..., 1999; Горетский, 1962; Государственная..., 2000). Область ее проявления отличается высокой степенью расчлененности поверхности кристаллического фундамента (рис. 3, А). В ее структуре намечаются системы линейно-дугообразных поднятий, облекающих контрастно выраженный штокообразный Воротиловский выступ фундамента. При амплитуде 2 км он «протыкает» осадки чехла в центре ПК депрессии, почти достигая современной эрозионной поверхности.

Субизометричная в плане ПК кольцевая депрессия, имеющая диаметр порядка 70 км, обособлена в комплексах осадочного чехла по структурным и литологическим признакам (рис. 3, Б, В). В ее строении выделяются цокольный, коптогенный, заполняющий и перекрывающий комплексы. Сложно дислоцированные кристаллические породы архея и перекрывающего их чехла, включая отложения от венда до нижнего триаса, составляют цоколь, в теле которого сформирован кратер. В его морфологии обособлено центральное поднятие (Воротиловский выступ) и обрамляющий его кольцевой желоб диаметром 40–42 км и глубиной, предположительно, до 1900 м (Глубокое..., 1999). По внешнему периметру кольцевой депрессии развита зона ступенчатых уступов и надстраивающая их по

периферии кратера кольцевая терраса (рис. 3, В). Кольцевая воронка отчасти заполнена нижнеюрским коптогенным комплексом — различного типа брекчиями и импактитами, возникшими в процессе образования кратера за счет пород цокольного комплекса. Образования средней–верхней юры, нижнего мела и кайнозоя рассматриваются в качестве заполняющего и перекрывающего комплексов (Глубокое..., 1999).

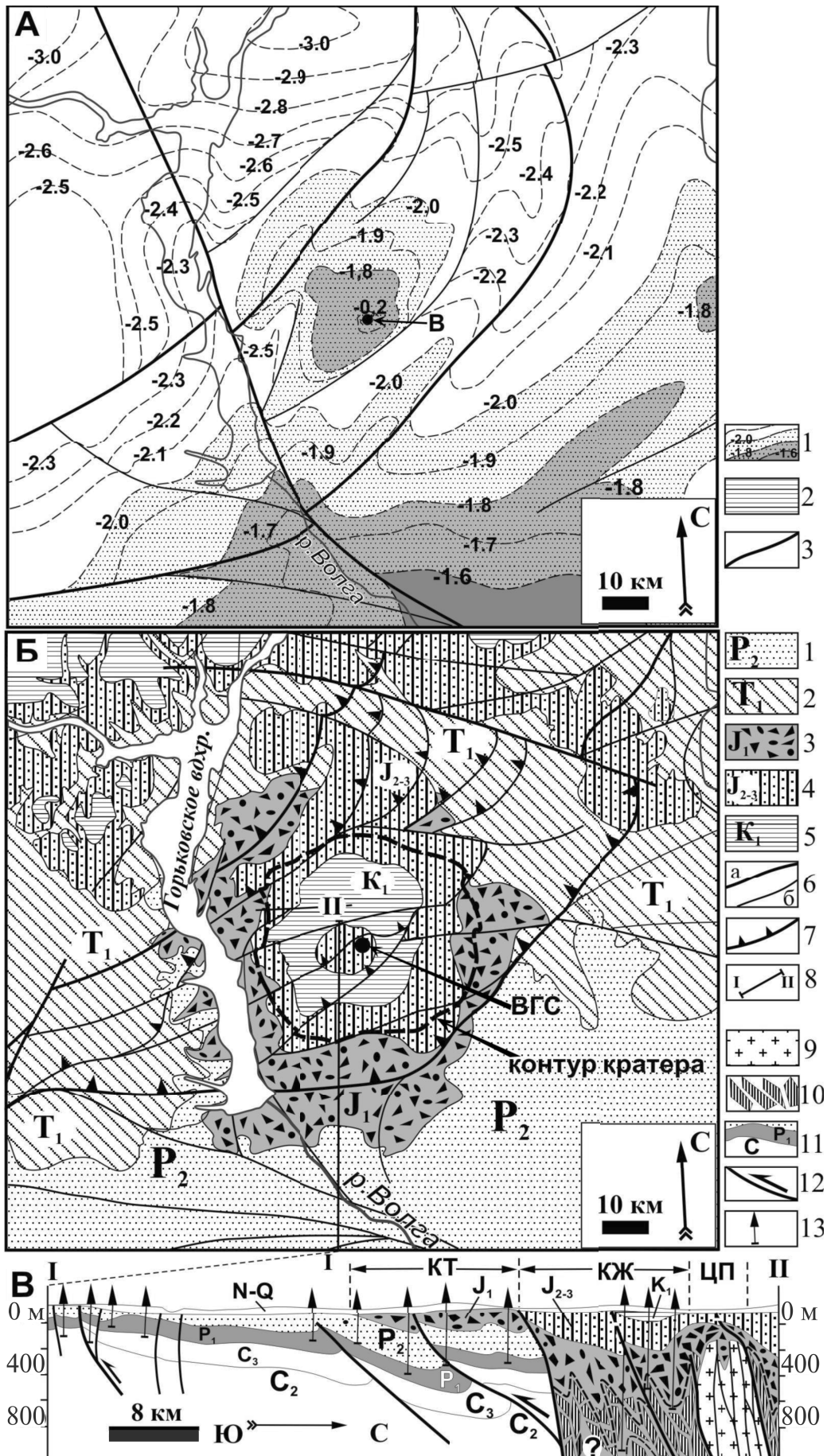
Внешняя граница кольцевой террасы определяется контурами распространения нижнеюрских аллогенных брекчий (рис. 3, Б, В). Материалы сейсмического профилирования показывают, что в палеозойских толщах цоколя террасы намечается ряд кольцевых валов и сопряженных с ними взбросов, затухающих по мере удаления от эпицентра ПК структуры (рис. 3, В) (Глубокое..., 1999). Подобного рода структуры осложняют и днище кольцевого желоба. Поверхность кольцевой террасы осложняет также система радиальных желобов, в которых отмечается резкое увеличение мощности коптогенных брекчий (Глубокое..., 1999).

Кольцевой желоб в основном заполнен коптогенными «мегаблоковыми брекчиями», образованными надвинутыми друг на друга пластинами и блоками пород венда, девона, карбона и нижней перми размером до сотен метров (рис. 3, В). Мощность этих «субкоренных» образований варьирует от 0,8 до 1,5 км. Граница их с материнскими породами цоколя условная (Глубокое..., 1999). В более ранних работах эти образования рассматривались в качестве широкой зоны складчато-надвиговых дислокаций, обрамляющей Воротиловский выступ (Валеев, 1968, 1978; Геология..., 1967; Горетский, 1962). В современных построениях эти структуры рассматриваются как коптогенный комплекс (Глубокое..., 1999), что, с одной стороны, «решило» проблему складчатости, а с другой — позволило нарастить мощность коптогенных образований и соответственно глубину ПК кратера почти в пять раз.

Мегаблоковые брекчии последовательно перекрываются щебенчато-глыбовыми полимиктовыми брекчиями, местами зювитами и коптокластитами мощностью до 300 м. В краевых частях депрессии и в области кольцевой террасы широко развиты щебенчато-глыбовые пестроцветные брекчии, состоящие преимущественно из обломков пермских и триасовых пород. В пределах кольцевой депрессии эти типично коптогенные образования перекрыты среднеюрскими песчано-глинистыми осадками кратерного озера (до 340 м), которые в свою очередь перекрываются осадками верхней юры, нижнего мела и кайнозоя (до 162 м).

Рис. 3. Структурные схемы Пучеж-Катунской структуры (на основе (Валеев, 1968, 1978, Геология..., 1967, Глубокое..., 1999, Государственная..., 2000)). Местоположение см. на рис. 2, Б. А — структурная схема кровли фундамента. Б — геолого-структурная карта со снятым неоген-четвертичным чехлом. В — геолого-структурный разрез по линии I–II.

На схеме А: 1 — изогипсы кровли фундамента; 2 — рифейские авлакогены; 3 — разрывные нарушения. В — Воротиловский выступ. На схеме Б: 1–5 — области выходов отложений: 1 — верхней перми, 2 — нижнего триаса, 3 — нижней юры (коптогенные брекчии), 4 — средней–верхней юры, 5 — нижнего мела; 6 — главные (а) и второстепенные (б) разрывы (сдвиги и взбрососдвиги); 7 — взбросы и надвиги; 8 — линия разреза I–II. На схеме В: 9 — архейские гнейсы; 10 — мегаблоковые брекчии (складчато-надвиговые структуры?); 11 — отложения карбона (C₂₋₃) и перми (P₁₋₂); 12 — разрывы и направления перемещений; 13 — скважины. В — Воротиловский выступ, ВГС — Воротиловская скважина, КТ — кольцевая терраса, КЖ — кольцевой желоб, ЦП — центральное поднятие



В кристаллических породах фундамента в области Воротиловского выступа и в обломках пород коптогенного комплекса установлены многочисленные признаки ударно-термального преобразования пород. Согласно материалам бурения Воротиловской скважины, кристаллические породы архея сильно раздроблены, пронизаны жилами тагамитов, ветвистыми зонами псевдотахилитов и катаклазитов (Глубокое..., 1999). Ударные преобразования выражены в появлении конусов разрушения, трещиноватости и брекчирования, в форме диаплектовых изменений минералов, в переходе их в разупорядоченные и высокоплотные фазы (отмечены импактные алмазы), а также в плавлении. К–Аг-датировки импактных стекол и тагамитов охватывают промежуток времени от 200 ± 3 до 183 ± 5 млн лет (Глубокое..., 1999). По оценкам амплитуд ударного воздействия максимальные их значения (45–50 ГПа) отмечаются в верхней части ствола Воротиловской скважины, постепенно снижаясь к забою (до 15–20 ГПа) (Глубокое..., 1999). Аналогичным образом с глубиной уменьшается количество жил тагамитов и псевдотахилитов.

Строение западного борта Пучеж-Катунской структуры

Структурные ансамбли западного борта ПК структуры были изучены в разрезах, обнаженных вдоль обрывов р. Волги по берегам Горьковского водохранилища. Здесь вскрыты пестроцветные отложения татарского яруса верхней перми и нижнего триаса, образующие цокольный комплекс кольцевой террасы, а также перекрывающие их со структурно-стратиграфическим несогласием щебенчато-глыбовые коптогенные брекчии нижней юры (рис. 3, Б). Весь комплекс отложений осложнен складчато-разрывными нарушениями, характер и интенсивность проявления которых варьируют в латеральном направлении и в пределах различных стратиграфических комплексов пород.

Наиболее интенсивные деформации наблюдаются в пермских осадках южной части Горьковского водохранилища в полосе шириной до 30 км. Здесь породы пронизаны частой системой зон нарушений субширотного и восточно-северо-восточного простирания, в пределах которых слои испытывают интенсивное смятие. Ширина зон достигает сотен метров. В их бортах складчато-разрывные деформации постепенно затухают. В целом по разрезу наблюдается чередование полос интенсивных и слабых деформаций, связанных постепенными переходами.

Анализ структурных особенностей пермских отложений татарского яруса свидетельствует о проявлении в них полистадийных деформаций. Их слои, представленные реологически контрастным переслаиванием аргиллитов, мергелей, известняков и песчаников, образуют складки различной морфологии, нарушенные сложной системой разрывов разных генераций (рис. 4). При полевых исследованиях были изучены соотношения (характер пересечений и наложений

разрывов и складок) структур разных генераций, что показано на разрезах соответствующими индексами (D_1, D_2, D_3, D_4) (рис. 4). Это послужило основой для систематизации и разбраковки данных замеров ориентировки различных структур.

Статистический анализ ориентировки слоистости пермских отложений показывает, что ее полюса образуют два главных и один второстепенный пояса рассеивания (рис. 4, В, диаграмма I). Первый из них соответствует дуге большого круга и характеризует цилиндрические складки (F_1), осевая плоскость которых имеет восточно-северо-восточную ориентировку и наклонена к северо-северо-западу. Второй пояс приурочен к дуге малого круга и соответствует складкам конической морфологии с субширотной ориентировкой осевой плоскости (F_2). Третий слабо выраженный пояс вдоль дуги большого круга, возможно, свидетельствует о проявлении третьей генерации складок. Первые две системы складок почти коаксиальны: угол между их осевыми плоскостями составляет 20° . Замеры ориентировки шарниров мелких складок в основном согласуются с геометрически найденными полого ориентированными шарнирами складок.

Статистический анализ ориентировки и направлений штрихов (борозд, заусенец) на поверхности зеркал скольжения показал, что «валовая» обработка этих данных не корректна. В соответствии со структурными наблюдениями была предпринята разбраковка этих данных, в результате чего были выявлены четыре кинематические группы нарушений. Первой группе (генерации) соответствуют полого падающие к северо-северо-западу надвиги, висячие крылья которых надвинуты к юго-юго-востоку (рис. 4, В, диаграмма II). Вторая группа объединяет комплексный парагенез структур: дивергентные системы взбросов, сдвиговзбросов и надвигов, а также сдвигов, соответствующих обстановке субмеридионального сжатия (транспрессии) (см. рис. 4, В, диаграмма III). Полученные с помощью программы FaultKin6 (Marrett, Allmendinger, 1990) направления горизонтального сжатия для этих двух групп нарушений, хорошо согласуются с данными по ориентировке складчатых структур (рис. 4, В, диаграммы I–III). Третья кинематическая группа нарушений отражает полную кинематическую инверсию главных осей деформации. Она соответствует преимущественно сбросам, характеризующим обстановку горизонтального растяжения в направлении северо-северо-запад–юго-юго-восток (см. рис. 4, В, диаграмма IV). Четвертая группа нарушений в кинематическом отношении почти полностью идентична структурам второй и отчасти первой генераций. В пермских слоях она проявлена в реактивизации этих ранних разрывов, выраженных в малоамплитудных смещениях.

Структурные парагенезы и этапы деформации

В обрамлении ПК депрессии отмечаются четыре генерации структурных парагенезов, связанных с различными причинами.

Структурные парагенезы первой генерации (D_1) представлены покровно-складчатыми структурами и зонами тектонического меланжа, сохранившимися в реликтовых формах на фоне наложенных деформаций. Ранние опрокинутые, лежащие и ныряющие складки ассоциируют с надвигами и зонами меланжа, которые частично или полностью срезают их крылья (рис. 4, А — центр и север; 4, Б — север). Горизонтальные амплитуды этих складок-покровов составляют многие десятки метров. Зоны тектонического меланжа, обрамляющие покровные складки, прослеживаются на многие десятки метров (рис. 4, А). Видимая их мощность достигает 7–8 м. Они выполнены линзовидно-сланцеватым и меланжированным глинистым матриксом, включающим линзы и цепочки будин мраморизованных известняков (рис. 4, А — юг). В целом для зон тектонического меланжа реконструируется пологое залегание, осложненное наложенными складчато-разрывными структурами. В результате этого наложения ранние складчатые покровы во многом утратили свои первичные кинематические признаки. Судя по характеру расположения фрагментов замков лежащих антиклиналей, надвигание происходило по направлению к юго-юго-восток.

Структурные парагенезы второй генерации (D_2) представлены взбросами, взбросодвигами и надвигами, а также складками различной морфологии (рис. 4). Наиболее распространены асимметричные сжатые, иногда опрокинутые складки. Ассоциирующие с ними взбросы и надвиги подрезают их крылья и нарушают ядра этих структур. Изредка проявляется кливаж параллельный либо веерообразный по отношению к осевым плоскостям складок. В замковых сегментах пликативных структур отмечаются признаки проявления более ранних складчатых деформаций: структуры типа «замок в замке», пересечения разноориентированных систем сланцеватости и кливажа (рис. 4).

Данная система складок и взбросонадвигов часто образует дивергентные «пальмовые» структуры, свойственные обстановке транспрессии. В их пределах складчатые взбросонадвиговые пакеты расположены симметрично относительно крутопадающих взбросодвиговых зон интенсивного расланцевания пород шириной до 10 м (рис. 4, Б — центр). Оперяющие эти нарушения взбросы, расходясь в стороны от «стволовой» зоны, часто выполаживаются и трансформиру-

ются в надвиги и системы надвиговых дуплексов. Между смежными дивергентными структурами возникают вторичные зоны конвергенции — структуры «сшивания» (рис. 4, Б — юг — центр).

Для структур первой и второй генераций характерна почти коаксиальная позиция осей горизонтального сжатия, ориентированных преимущественно в направлении северо-северо-запад–юго-юго-восток (рис. 5, А — диаграммы). Структурные парагенезы этих стадий наблюдались только в осадках верхней перми. В залегающих выше отложениях мезозоя они не обнаружены. В результате проявления самой поздней стадии деформаций (D_4) разрывные нарушения рассматриваемой системы (D_{1-2}) испытали некоторую реактивизацию и проникли в мезозойские отложения (рис. 5, А; 3, Б, В). Но на этих верхних уровнях это уже совсем другие малоамплитудные разрывные нарушения, для которых не свойственна полно развитая складчатость. Такие «подновленные» разрывы достигают современной поверхности и дешифрируются в рельефе в качестве разрывов последней стадии деформаций (D_4).

Структурные парагенезы третьей генерации (D_3) представлены системой сбросовых и сбросораздвиговых нарушений, поверхности которых в целом конформны более ранним надвигам и взбросам. Почти во всех обнажениях отмечается, что сбросы секут и смещают надвиги и взбросы ранних генераций, а также зоны тектонического меланжа (рис. 4). Отмечаются крутые и пологие сбросы с наклоном в противоположных направлениях. В результате их сопряженного развития иногда образуются ступенчатые системы полуграбенов (рис. 4, А — юг). В отличие от ранних структур горизонтального сжатия, локализованных вдоль крупных зон нарушений, структуры растяжения относительно равномерно распределены по всему изученному разрезу перми и триаса. Они проявлены и на участках почти полного отсутствия ранних складчатых деформаций. Здесь хорошо видно, что сбросы этой системы представляют собой листрические структуры с антитетическим вращением блоков пород в их крыльях (рис. 6, А). С глубиной они постепенно выполаживаются, сливаясь с плоскостями слоистости. Также широко распространены мезоструктуры со сбросовой кинематикой: многочисленные сколы с зеркалами скольжения и сопряженные Х-образные минисбросы, указывающие на горизонтальную

Рис. 5. Структурно-динамические схемы, иллюстрирующие особенности структурных парагенезов различных стадий формирования Пучеж-Катунской структуры (основа по (Глубокое..., 1999; Государственная..., 2000)). А — структурные парагенезы ранних (D_1 – D_2) стадий деформаций и поздней (D_4) стадии реактивизации ранних структур. Б — импактные структурные парагенезы стадии D_3 . Местоположение см. на рис. 2, Б.

На схеме А: 1–3 — области выходов отложений: 1 — верхней перми, 2 — мезозоя, 3 — нижнеюрских коптогенных брекчий; 4 — изогипсы подошвы заполняющих остаточную впадину озерных отложений средней юры; 5 — внешние контуры кольцевой депрессии; 6 — валобразные структуры; 7 — сдвиги и направления перемещений; 8 — взбросы и надвиги; 9 — линейность удлинения; 10, 11 — номера точек наблюдений и установленная в них субгоризонтальная позиция главных осей деформации ранних (D_1 – D_2) и поздних (D_4) стадий: 10 — оси сжатия, 11 — осей сжатия и растяжения. На схеме Б: 12 — центральные области радиальных трогов; 13 — изогипсы подошвы коптогенных брекчий, включая мегаблоковые брекчий; 14 — номера точек наблюдений и установленная в них субгоризонтальная позиция оси растяжения. Стереографические проекции на нижнюю полусферу полюсов сколов и разрывов с векторами перемещения висячего крыла: на схеме А — для структур ранних стадий деформаций (D_1 – D_2), на схеме Б — для стадии формирования импактных структур (D_3).

Условные обозначения см. на рис. 4

позицию оси растяжения (рис. 6, Б). Плоскости сместителей сбросов часто «притертые», но иногда открыты и заполнены глинистым веществом. При увеличении раздвиговой составляющей смещений вдоль сбросов формируются кластические дайки мощностью до 0,5 м (рис. 6, Г).

Амплитуды смещений вдоль сбросов достигают многих десятков метров. Принципиально важный случай проявления амплитудного сброса представлен на рис. 6, В. Здесь нарушение этого типа срезает слабо дислоцированные осадки татарского яруса и контролирует южный борт крупного грабена, заполненного нижнеюрскими коптогенными брекчиями (рис. 6, В). Позиция этой грабен-структуры соответствует радиальной системе нарушений ПК кратера (рис. 5, Б). Все сказанное указывает на генетическую связь рассматриваемых структур горизонтального растяжения с раннеюрскими импактными событиями.

Таким образом, для данного этапа деформаций отмечается следующий парагенез структур: кратерная кольцевая воронка и обрамляющая ее терраса, центральное поднятие Воротиловского выступа и опоясывающие его концентрические системы валов (структуры сжатия), а также сбросы и грабены (структуры растяжения), образующие радиально-лучистую систему нарушений в пределах кольцевой террасы (рис. 5, Б). Этот структурный парагенез неразрывно связан с коптогенным нижнеюрским комплексом. В западном борту ПК структуры импактные брекчии характеризуются хаотичным строением: разновеликие глыбы и плиты пермско-триасовых пород беспорядочно сгружены в щебенчато-глинистый маловязкий матрикс, образуя мегапудинговую текстуру (рис. 6, В, Д). Слоистость в пределах коптогенной толщи обычно не выражена, но иногда проявляется псевдослоистость, связанная с вторичными процессами диагенеза. Отмечаются признаки ранней (до формирования брекчий) складчатости. Например, в некоторых глыбах первичная слоистость осложнена мелкими складками, срезанными неправильными гранями глыбового тела (рис. 6, Д). Некоторые обломки сложены плотносцементированной брекчией, представляя в целом структуру типа «брекчия в брекчии».

На основании кинематического анализа сбросо-раздвиговых структур (D_3) в районе Горьковского водохранилища было установлено плавное изменение ориентировки оси растяжения от северо-западного до северо-северо-восточного направления по мере огибания ПК депрессии с юга на север (рис. 5, Б — диаграммы). Такой радиально-концентрический характер распределения палеонапряжений хорошо согласуется с позицией эпицентра импактного кратера и радиальной системой грабенообразных провалов (рис. 5, Б).

Структурные парагенезы четвертой генерации (D_4) представлены малоамплитудными взбросами, взбрососдвигами и надвигами, а также различными мезоструктурами. В пермских и триасовых отложениях

разрывы данной генерации секут и смещают импактные структуры (D_3) — сбросы и кластические дайки (рис. 6, Г; 4). В пределах коптогенных образований нижней юры деформации этой стадии проявлены в ряде локальных зон. Они выражены в процессах вращения небольших глыб. Мелкие обломки глинистого состава приобретают при этом сигмообразную форму с соответствующим внутренним расщеплением (рис. 6, Д). Встречаются структуры снежного кома, появляются признаки линейной ориентировки удлиненных обломков.

Ротационным преобразованиям сопутствует проявление малоамплитудных надвиговых, взбросовых и сдвиговых нарушений. Вдоль поверхностей взбросов и надвигов проявляются мелкие асимметричные приразломные складки, сминающие псевдослоистость (рис. 6, В, Д). Эти разрывы подрезают и смещают глыбы аргиллитов, включения компетентных пород они облекают. Наблюдаемые амплитуды смещений обычно не превышают первых метров. Отмечаются зоны ступенчатости взбросонадвиговых структур, в которых коптогенные образования приобретают облик тектонического меланжа. Наиболее значительные дислокации наблюдаются в областях прилегания коптогенных образований к стенкам вмещающих их грабенов (рис. 6, В). Это объясняется наличием жесткой рамы (пермские слои), ограничивающей сильно дезинтегрированные и малокомпетентные толщи и обуславливающей концентрацию напряжений на границе сред разной вязкости.

Статистический анализ структур скольжения для нарушений, осложняющих коптогенные брекчии, показывает, что они формировались в условиях горизонтального сжатия в направлении северо-северо-запад—юго-юго-восток (рис. 7, диаграммы III—VI). Аналогичная позиция оси сжатия была отмечена в осадках триаса (рис. 7, диаграммы I и II). Структурно-геологические признаки показывают, что данный взбросонадвиговый парагенез (D_4) сформировался после проявления раннеюрских импактных событий.

Обсуждение результатов исследований

Структурные ансамбли ПК структуры имеют признаки длительного формирования в связи с проявлением четырех стадий деформаций, связанных с различными факторами.

Ранние стадии деформаций (D_{1-2}) были связаны с условиями горизонтального сжатия. На первой стадии (D_1) произошло формирование покровно-складчатых структур и зон меланжа с надвиганием масс к юго-юго-востоку; на второй (D_2) — в условиях транспрессии (сдвиг + сжатие) сформировались дивергентно-построенные складчато-надвиговые и сдвиговзбросовые пальмообразные структуры. Для обеих стадий деформаций данного этапа характерна почти коаксиальная позиция осей горизонтального сжатия, ориентиро-

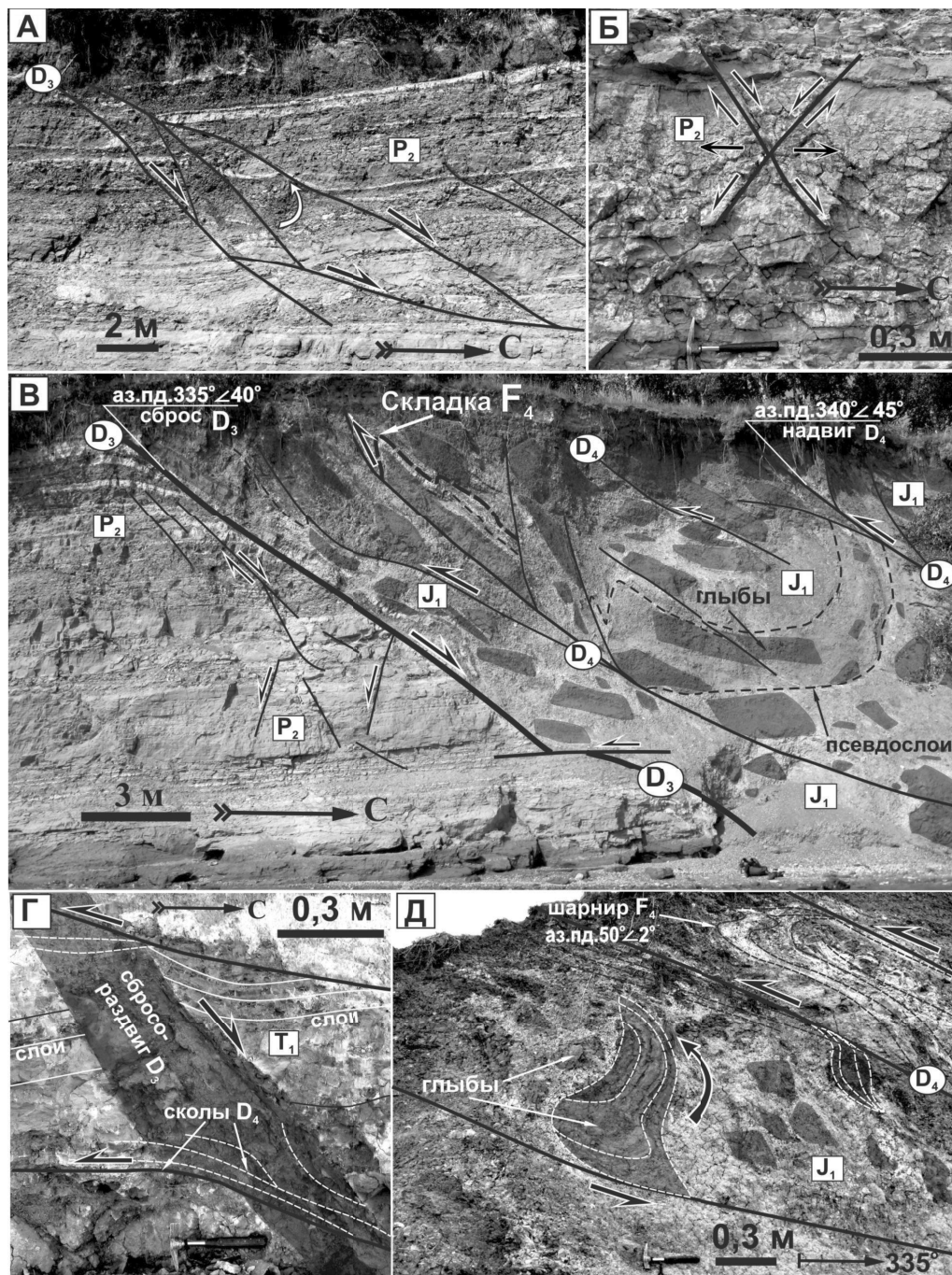


Рис. 6. Фотографии структур дислоцированных толщ перми, триаса и нижней юры в районе Горьковского водохранилища. А — антитетические листрические сбросы (вращение блоков — белая стрелка) стадии D_3 . Б — системы сопряженных X-образных сколов, связанные с горизонтальным растяжением стадии D_3 . В — сброс (D_3), образующий южный борт грабена, заполненного коптогенными брекчиями нижней юры, которые нарушены малоамплитудными надвигами поздней стадии деформаций (D_4). Местоположение см. пикет п35 на рис. 5, Б. Г — кластическая дайка (сбросо-раздвиг D_3) в осадках нижнего триаса, нарушенная сколами стадии D_4 . Д — коптогенные брекчии нижней юры, дислоцированные (вращение блоков, приразломные минискладки) в результате проявления надвиговых смещений стадии D_4 . Пояснения знаков см. на рис. 4

ванных преимущественно в направлении северо-северо-запад—юго-юго-восток (рис. 5, А — диаграммы). Это не согласуется (примерно на 90°) с предполагаемой позицией палеонапряжений, связанных с прохождением предполагаемой ударной волны от эпицентра ПК кратера. Все это свидетельствует о независимом проявлении ранних деформаций (D_{1-2}) и наложенных импактных преобразований (D_3).

Судя по результатам бурения, тектонические структуры этих стадий пронизывают осадки чехла от основания (отложения венда) до отложений верхней перми, проникая в архейский фундамент (рис. 3, В). Остается неясным, участвуют ли в этих дислокациях осадки нижнего триаса, но образования нижней юры по отношению к этим деформациям являются «запечатывающим» комплексом. Таким образом, тектони-

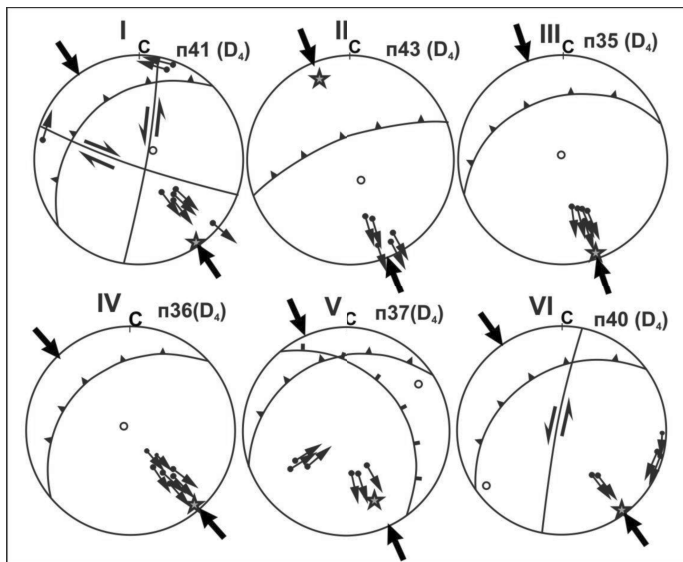


Рис. 7. Стереографические проекции (нижняя полусфера) полюсов сколов и разрывов с векторами перемещения висячего крыла для поздней стадии деформаций D_4 : I–II — в отложениях триаса, III–VI — в коптогенных брекчиях нижней юры. Местоположение пикетов п35 — п43 см. на рис. 5, А. Условные обозначения см. на рис. 4

ческий этап горизонтального сжатия (D_{1-2}) проявился в послепермское время. Нижнеюрские коптогенные образования (возможно, нижнетриасовые) служат верхним возрастным пределом этих деформаций, которые в целом могут рассматриваться как проявления герцинского тектонического этапа.

Третья стадия деформаций (D_3) связана с раннеюрскими импактными событиями. В результате падения метеоритного тела сформировались кратерная кольцевая воронка, обрамляющая ее терраса, центральное поднятие Воротиловского выступа и система радиальных и концентрических нарушений (рис. 5, Б). Изотопный (K–Ar) возраст сформировавшихся при этом коптогенных образований позволяет соотнести это катастрофическое событие с интервалом времени 200–183 млн лет (Глубокое..., 1999). Возраст перекрывающих коптогенные брекчии отложений соответствует средней юре (ковернинская свита: байос — бат). Однако на основании того, что коптогенные брекчии и брекчированные породы венда и девона содержат споро-пыльцевые комплексы байосского яруса, в работе (Глубокое..., 1999) делается вывод, что импактное событие произошло в байосе (164–170 млн лет). При этом предполагается, что микроспоры проникли в глубокие горизонты совместно с водами из импактной воронки. Но все это можно объяснить и более поздней миграцией грунтовых и гидротермальных растворов вдоль активизированной системы разрывов. Байосский возраст импактной катастрофы опровергают данные, свидетельствующие об отсутствии массового вымирания организмов в это время (Palfy, 2004). Поэтому логичнее опираться на K–Ar изотопный возраст ПК импактной структуры.

Четвертая стадия деформаций (D_4) проявилась после импактного события в качестве процессов реактивизации ранних разрывов (D_{1-2}). Наблюдениями отмечены небольшие амплитуды смещений (первые метры) вдоль взбросонадвиговых и сдвиговых нарушений в коптогенных брекчиях нижней юры. Ввиду малых амплитуд смещений и коаксиального характера деформаций стадий D_{1-2} и D_4 в осадках перми эти структуры идентифицируются нечетко. Структурные парагенезы, аналогичные структурам стадии D_4 , были отмечены в пределах ВВЗ в отложениях нижнего триаса и келловейского яруса верхней юры в долинах Ветлуги и Унжи. Отмечаются признаки подновления процессов воздымания Воротиловского выступа фундамента в конце мезозоя или более позднее время, что подчеркивается куполообразным выступом среднеюрских отложений из-под осадков нижнего мела в центре ПК структуры (рис. 3, Б). Таким образом, нижним возрастным пределом этой стадии деформаций служит позднемезозойское время. Учитывая, что ВВЗ хорошо дешифрируется и проявлена в особенностях современного рельефа, можно предположить ее некоторую активизацию и на неотектоническом этапе развития, что согласуется с последними данными М.Л. Коппа (2012) для смежной Вятско-Казанской зоны дислокаций.

Кинематический анализ структур стадии D_4 показывает, что они формировались в условиях горизонтального сжатия, ориентированного преимущественно в северо-северо-западном–юго-юго-восточном направлении (рис. 7). Причем эта тенденция с небольшими вариациями соблюдается на всем протяжении ВВЗ. Примерно в тех же динамических условиях развивались ранние складчато-надвиговые структуры (D_{1-2}). По результатам замеров обрушений в стенках ствола Воротиловской скважины установлена позиция оси современного напряжения максимального горизонтального сжатия в направлении северо-запад–юго-восток ($N 137^\circ E \pm 15^\circ$) (Huber et al., 1997). Это согласуется с полученными кинематическими данными и служит косвенным признаком связи структур стадии деформаций D_4 с неотектоническими процессами.

Динамические интерпретации. Пучеж-Катунская структура приурочена к крупной Владимирско-Вятской зоне дислокаций. Последняя обнаруживает признаки длительного развития и периодической активности, начиная от этапа формирования Среднерусского коллизионного пояса в палеопротерозое, а также в процессе герцинского, киммерийского или, вероятно, киммерийско-альпийского тектонических циклов. Суперпозиционные (последовательно наложенные друг на друга) структурные парагенезы герцинского (D_{1-2}) и киммерийско-альпийского (D_4) этапов деформаций в пределах ВВЗ формировались в сходных динамических условиях. Это, видимо, свидетельствует о существовании чрезвычайно длительного тектонического мегацикла, который периодически проявлялся в пределах данного сегмента ВЕП на плитном этапе ее развития.

При протяженности более 600 км ВВЗ имеет неоднородное строение. На юго-западе в пределах ПК сегмента эта зона образует сигмообразный изгиб (сдвиговый дуплекс сжатия) и отличается наиболее интенсивными складчато-разрывными дислокациями, связанными с режимом транспрессии (рис. 8). По направлению к северо-востоку транспрессионный сегмент сменяется системой рассредоточенных сдвиговых дислокаций. Это подчеркивается закономерным сочетанием магистральных и диагональных разрывов второго порядка, ориентированных по принципу синтетических (R) и антитетических (R') сколов, а также диагональной позицией тектонических валов (рис. 8). Этот типично правосдвиговый структурный рисунок согласуется с результатами мезоструктурных наблюдений. Кинематический анализ нарушений данного сдвигового сегмента зоны показывает, что деформации здесь развивались в условиях сжатия по направлениям северо-запад-юго-восток и северо-северо-запад-юго-юго-восток, что соответствует правостороннему характеру смещений вдоль ВВЗ (рис. 8).

В целом ВВЗ протягивается субпараллельно Среднерусской зоне дислокаций, развитой в 200 км к северу (рис. 1). Вероятно, она участвует вместе с ней в единой динамической системе горизонтальных пере-

мещений, направленных к юго-востоку, что рассматривается в (Колодяжный, 2010, 2012а, б). Можно полагать, что ВВЗ также динамически сопряжена с зоной Вятско-Казанских нарушений, подробно рассмотренной М.Л. Коппом (2012), с которой она сливается на северо-западе (рис. 8).

Пучеж-Катунская импактная структура приурочена к самому центру наиболее интенсивных деформаций транспрессионного сегмента ВВЗ (рис. 8). Такое «прицельное» попадание метеоритного тела не просто в тектоническую зону, разделяющую крупнейшие структуры ВЕП, но и в ее самый динамически напряженный сегмент, выглядит фантастическим и маловероятным. Нужно отметить, что такая тектоническая приуроченность свойственна многим «астроблемам» (Песков, 1992). Тем не менее имеющиеся материалы не позволяют отказаться от метеоритной гипотезы. Оценки амплитуд импактного воздействия (до 50 ГПа) и закономерное их снижение с глубиной сложно связать с эндогенными процессами (Глубокое..., 1999). Однако такие попытки предпринимаются. В частности, привлекается модель приповерхностного плазменного взрыва, мощность которого может быть велика, а размещение в напряженном сегменте тектонической зоны вполне закономерно (Государственная..., 2000).

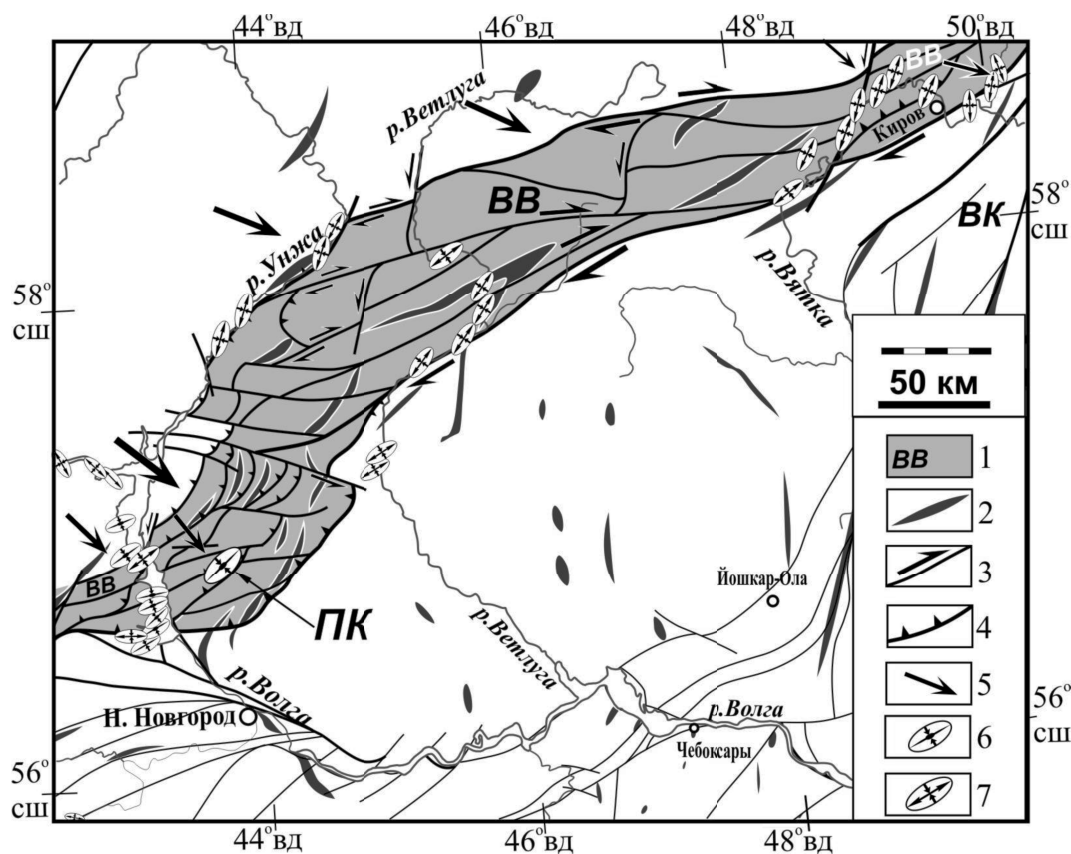


Рис. 8. Структурно-кинематическая схема Владимирско-Вятской зоны:

1 — Владимирско-Вятская зона дислокаций; 2 — валообразные структуры; 3, 4 — зоны нарушений: 3 — сдвиги, 4 — взбросы и надвиги; 5 — предполагаемые направления горизонтального перемещения; 6, 7 — установленная наблюдениями субгоризонтальная позиция главных осей деформации ранних (D_1-D_2) и поздних (D_4) стадий: 6 — оси сжатия, 7 — осей сжатия и растяжения. Буквы на схеме см. на рис. 2

Выводы

1. Пучеж-Катунская структура в целом является следствием длительного проявления тектонических процессов в пределах одной из крупнейших зон дислокаций ВЕП и, возможно, случайного импактного события, «поразившего» один из самых тектонически напряженных сегментов этой зоны. На данный момент нельзя отрицать метеоритный фактор в развитии ПК структуры, но следует также принимать во внимание гипотезы о приповерхностном плазменном взрыве.

2. В развитии ПК структуры обособлено четыре стадии деформаций: 1) покровно-складчатые дислокации и 2) транспрессионные деформации герцин-

ского этапа; 3) импактное формирование кратерной воронки и системы радиально-концентрических нарушений в ранней юре (200–183 млн лет); 4) малоамплитудная тектоническая активизация разрывных структур герцинского этапа, имевшая место на киммерийско-альпийском этапе развития.

3. Владимирско-Вятская зона, контролирующая ПК структуру, представляет собой долгоживущую систему дислокаций с преимущественно правосдвиговым характером перемещений на плитном этапе ее развития. Эволюция зоны проходила циклично, начиная с коллизионных событий палеопротерозоя, вплоть до киммерийско-альпийского этапа активизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-05-00298 и Программы ОНЗ № 10.

ЛИТЕРАТУРА

- Валеев Р.Н.* Тектоника Волго-Камского междуречья // Тр. Геол. ин-та. Казань. Вып. 12. М.: Недра, 1968. 117 с.
- Валеев Р.Н.* Авлакогены Восточно-Европейской платформы. М.: Недра, 1978. 152 с.
- Варданыц Л.А.* Трубка взрыва в центральной части Русской платформы // Изв. АН АрмССР. 1961. Т. 14, № 2. С. 57–62.
- Геология СССР. Т. 11. Поволжье и Прикамье. Ч. 1. Геологическое описание. М.: Недра, 1967. 872 с.
- Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Т. 2. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. 400 с.
- Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре / Ред. В.Л. Масайтис, Л.А. Певзнер. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 599 с.
- Горецкий Г.И.* К познанию природы Пучежско-Балахинских дислокаций (о проявлениях инъективной тектоники на Русской платформе) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1962. Т. 37, вып. 5. С. 80–110.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (Н.С.). Лист О-38, (39). Киров. Объяснит. зап. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 331 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000 (Н.С.). Лист О-37, (38). Нижний Новгород. Объяснит. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 261 с.
- Колодяжный С.Ю.* Структурно-кинематическая эволюция юго-восточной части Балтийского щита в палеопротерозое. М.: ГЕОС, 2006. 332 с.
- Колодяжный С.Ю.* Структурно-кинематические парагенезы в осадках фанерозойского чехла Среднерусской зоны дислокаций // Геотектоника. 2010. № 2. С. 56–76.
- Колодяжный С.Ю.* Структуры латерального течения северо-восточной части Восточно-Европейской платформы. Ст. 1. Особенности геологического строения, структурные парагенезы фундамента // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2012а. Т. 87, вып. 1. С. 15–24.
- Колодяжный С.Ю.* Структуры латерального течения северо-восточной части Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Структурные парагенезы осадочного чехла // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2012б. Т. 87, вып. 2. С. 3–16.
- Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С., Леонов М.Г.* Структурно-кинематические парагенезы фундамента и чехла юго-восточной окраины Балтийского щита // Геотектоника. 2007. № 6. С. 3–22.
- Копп М.Л.* Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005. 340 с.
- Копп М.Л.* Вятские дислокации: динамика формирования и выражение в новейшей структуре (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. 2012. № 6. С. 55–77.
- Лукьянов А.В.* Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Наука, 1965. 212 с.
- Маракушев А.А., Богатырев О.С., Феногенов А.Д. и др.* Формирование Пучеж-Катунской кольцевой структуры на Русской платформе // Докл. АН. 1993. Т. 328, № 3. С. 364–368.
- Масайтис В.Л.* Пучеж-Катунская астроблема // Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. С. 59–69.
- Нечитайло С.К., Веселовская М.М., Скворцова Е.Н.* Материалы по геологии Городецко-Ковернинской тектонической зоны. М.: Гостоптехиздат, 1959. 128 с.
- Песков Е.Г.* Пояса взрывных структур («астроблем») // Геотектоника. 1992. № 5. С. 20–26.
- Соловьёв В.К.* Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Лист О-38 (Горький). М.: Госгеолтехиздат, 1958. 112 с.
- Структурная карта кровли верейского горизонта московского яруса среднего отдела каменноугольной системы Восточно-Европейской платформы / Гл. ред. В.В. Бронгулеев. М.: Недра, 1986.
- Туманов Р.Р.* Новые данные о строении Городецко-Ковернинской тектонической зоны // Мат-лы по геологии востока Русской платформы. Вып. 5. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1973. С. 112–125.
- Фирсов Л.В.* О метеоритном происхождении Пучеж-Катунского кратера // Геотектоника. 1965. № 2. С. 106–118.
- Huber K., Fuchs K., Palmer J. et al.* Analysis of borehole televiewer measurements in the Vorotilov drillhole, Russia — first results // Tectonophysics. 1997. Vol. 275, N 1–3. P. 261–272.
- Marrett R.A., Allmendinger R.W.* Kinematic analysis of fault-slip data // J. Structural Geol. 1990. Vol. 12. P. 973–986.
- Palfy J.* Did the Puchezh-Katunki impact trigger an extinction? // H. Dypvik (ed). Cratering in Marine Environments and on Ice. Berlin: Springer, 2004. P. 135–148.

**ABOUT GENESIS OF PUCHEZH-KATUNKY STRUCTURE
(EAST EUROPEAN PLATFORM)**

S. Yu. Kolodyazhny

The Puchezh-Katunki (PK) structure was formed as a result of the successive tectonic and impact (or explosive) events. The meteoritic or explosive crater of this structure is localized within the Vladimir-Vyatka dislocation zone, which partition the largest patterns of the East European platform. Prolonged evolution of the PK structure includes four stages: 1) fold-nappe formation and 2) transpressional deformations of the Hercynian stage; 3) impact forming of the crater and the system of the radial-concentric structures in the early Jurassic time; 4) tectonic activization of the Cimmerian-Alpine stage. Such «aimed» hitting of a meteorite in the largest tectonic zone looks improbable. However, available materials (amplitudes of the impact affecting (up to 50 GPa) and their regular decrease with depth) do not allow refusing from the meteoritic genesis of the PK structure.

Key words: structure, tectonic evolution, impact structure, Nizhniy Novgorod Region.

Сведения об авторе: *Колодяжный Сергей Юрьевич* — канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. ГИН РАН; *e-mail:* kolod@ginras.ru