

УДК 550.34+552.4 (470.5)

Ал.В. Тевелев¹, Арк.В. Тевелев², А.О. Хотылев³, И.А. Прудников⁴,
И.А. Кошелева⁵, Е.А. Володина⁶, В.М. Мосейчук⁷

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РАЙОНЕ КАТАВ-ИВАНОВСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕНТЯБРЕ 2018 Г. (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Рассмотрены структурные особенности Катавско-Юрюзанской зоны разрывов. По анализу мезоструктур определены палеополя напряжений, в которых преобладало горизонтальное северо-западное сжатие. Проанализированы данные о землетрясениях, произошедших в сентябре 2018 г. в районе г. Катав-Ивановск. Выявлены противоречия в определении координат эпицентров и механизмов очагов землетрясений, вычисленных разными геологическими службами. Показано, что обстановка правосторонней транспрессии, при которой сформировалась структура северо-западной части Башкирского мегантиклинория, сохраняется и в настоящее время.

Ключевые слова: землетрясение, механизм очага, поле напряжения, нодальная плоскость, транспрессия, Катав-Ивановск, Южный Урал.

The structural features of the Katavsko-Yuryuzan faults zone are considered. According to the analysis of mesostructures, paleopole stresses, where horizontal northwest compression prevailed, were determined. Data on earthquakes, that occurred in September 2018 near the town of Katav-Ivanovsk, has been analyzed. Contradictions in determining the coordinates of epicenters and mechanisms of earthquakes foci calculated by different geological services were revealed. It is shown, that the situation of right-sided transpression, in which the structure of the northwestern part of the Bashkir meganticlinorium was formed, continues up to the present moment.

Key words: earthquake, source mechanism, stress field, nodal plane, transpression, Katav-Ivanovsk, Southern Urals.

Введение. Западный склон Южного Урала отличается очень слабой сейсмичностью, хотя небольшие, но заметные землетрясения (магнитуда от 4 до 6) случаются. Последние такие землетрясения произошли 4 и 29 сентября 2018 г. в районе г. Катав-Ивановск. Их магнитуда по разным оценкам составляла от 4,2 до 5,4. Землетрясения не привели к разрушениям, однако некоторые серьезные последствия толчков все-таки были: трещины в стенах, осыпавшаяся штукатурка, разбитая посуда, а также возникновение грязевого потока и резкое изменение дебита родников, вплоть до их полного пересыхания.

По данным [IRIS..., 2018] (Incorporated Research Institutions for Seismology, USA), с 1990 г. по настоящее время на Южном Урале зафиксировано 54 землетрясения, из которых только 5 имели магнитуду ≥ 4 , причем 2 из них произошли

еще 28 мая 1990 г. Таким образом, между более или менее сильными землетрясениями прошло почти 30 лет, т.е. это явление на Южном Урале действительно редкое.

Задача исследования состояла в том, чтобы установить соотношение современного поля напряжений, вызвавшего упомянутые землетрясения, с палеополями напряжений, выявленными в результате изучения мезоструктурных элементов рифейских комплексов, слагающих район землетрясений.

Структурные особенности района землетрясений. Упомянутые землетрясения были локализованы в зоне сочленения Башкирского мегантиклинория, сложенного рифейскими образованиями, и Предуральского краевого прогиба, сложенного флишево-молассовыми комплексами среднего карбона–перми (рис. 1). Структура Башкирского

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: atevelev@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: arctevelev@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, ассистент; канд. геол.-минер. н. e-mail: akhotylev@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, аспирант; e-mail: prydnukov@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, ст. инженер; e-mail: foxalbit@rambler.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, бакалавр; e-mail: ekaterina.volodina2015@yandex.ru

⁷ ООО НТПП «Геопоиск» (г. Челябинск), ген. директор; e-mail: geopoisk2004@mail.ru

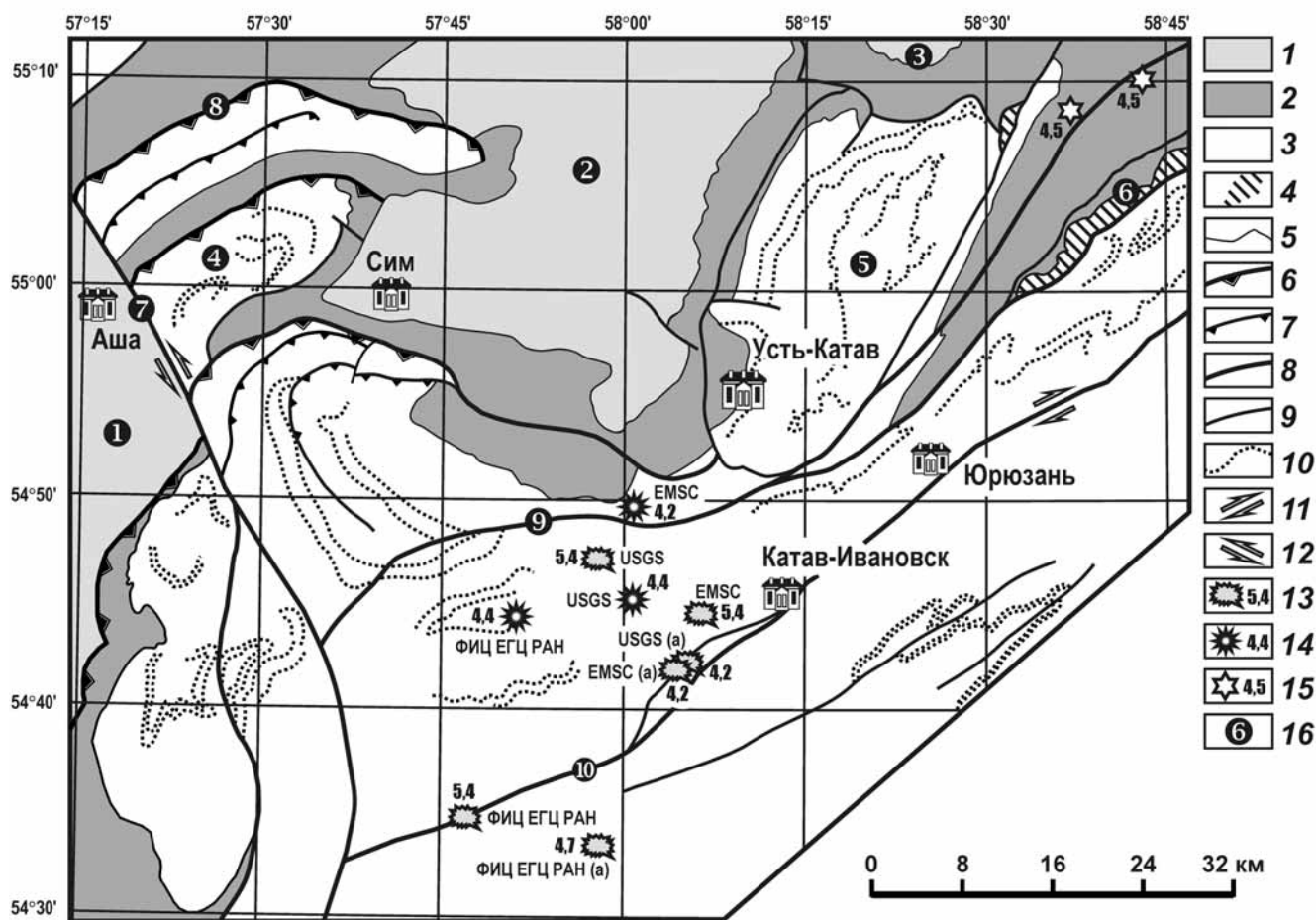


Рис. 1. Структурная схема района землетрясений 1990 и 2018 гг.: 1 — верхнепалеозойские комплексы Предуральского краевого прогиба; 2 — девонско-раннекаменноугольные комплексы чехла Восточно-Европейской платформы; 3 — рифейские комплексы Башкирского мегаантиклинория; 4 — пакеты маломощных надвиговых пластин; 5 — стратиграфические границы; 6–7 — надвиги: 6 — главные, 7 — второстепенные; 8, 9 — прочие разрывы: 8 — главные, 9 — второстепенные; 10 — маркирующие горизонты; 11–12 — сдвиги: 11 — правые, 12 — левые; 13–15 — эпицентры землетрясений и их магнитуды: 13 — 05.09.2018, 14 — 29.09.2018, 15 — 28.05.90; 16 — номера структур (1–3 — впадины Предуральского краевого прогиба: 1 — Бельская, 2 — Симская, 3 — Юрюзано-Сылвинская; 4 — Каратауский выступ; 5 — Сулеймановская антиклиналь; 6 — Петропавловский пакет надвигов; 7 — Ашинский левый сдвиг; 8 — Каратауский надвиг; 9, 10 — правые взбросо-сдвиги (9 — Сулейнский; 10 — Бакало-Саткинский))

мегаантиклинория осложнена двумя выступами, расположенными северо-западнее, — Каратауским блоком и Сулеймановской антиклиналью. Эти выступы разделяют три структурных элемента Предуральского краевого прогиба: Юрюзано-Сылвинскую, Симскую и Бельскую впадины. Рифейские комплексы интенсивно деформированы и непосредственно в пределах Башкирского мегаантиклинория, и в пределах Каратауского выступа. Сулеймановская антиклиналь деформирована существенно меньше, но вместе с Каратауским выступом составляет единый тектонический блок, выдавленный на север [Тевелев и др., 2018]. Этот блок имеет форму тупого клина, сужающегося к югу. Он ограничен на западе Ашинским левым сдвигом, на востоке — Первомайской правосторонней зоной транспрессии, а на севере — фронтальным Каратауским надвигом.

Эпицентры землетрясений локализованы южнее выступов в довольно узкой Катавско-Юрюзанской зоне, ограниченной двумя крупными раз-

рывами восток-северо-восточного простирания — Сулейнским и Бакало-Саткинским. Немного южнее параллельно этой зоне проходит гипотетическая граница форланда тиманид [Пучков, 2010]. Кинематика этих разрывов детально изучена нами ранее по мезоструктурным элементам при проведении региональных геологических исследований, связанных с составлением Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (лист N-40-XI) [Тевелев и др., 2018]. В частности, в районе г. Катав-Ивановск изучены 4 объекта: 1) карьер Башлес, 2) карьер Катав-Ивановского цементного завода, 3) небольшой карьер на северной окраине Катав-Ивановска и 4) серия мелких карьеров на его северо-восточной окраине (рис. 2). Основные выводы из проведенных исследований, важные для решения поставленной задачи, сводятся к следующему.

Складчатая структура рифейских комплексов во многом подчеркивает правосторонние смещения по всей этой зоне: картируются много-

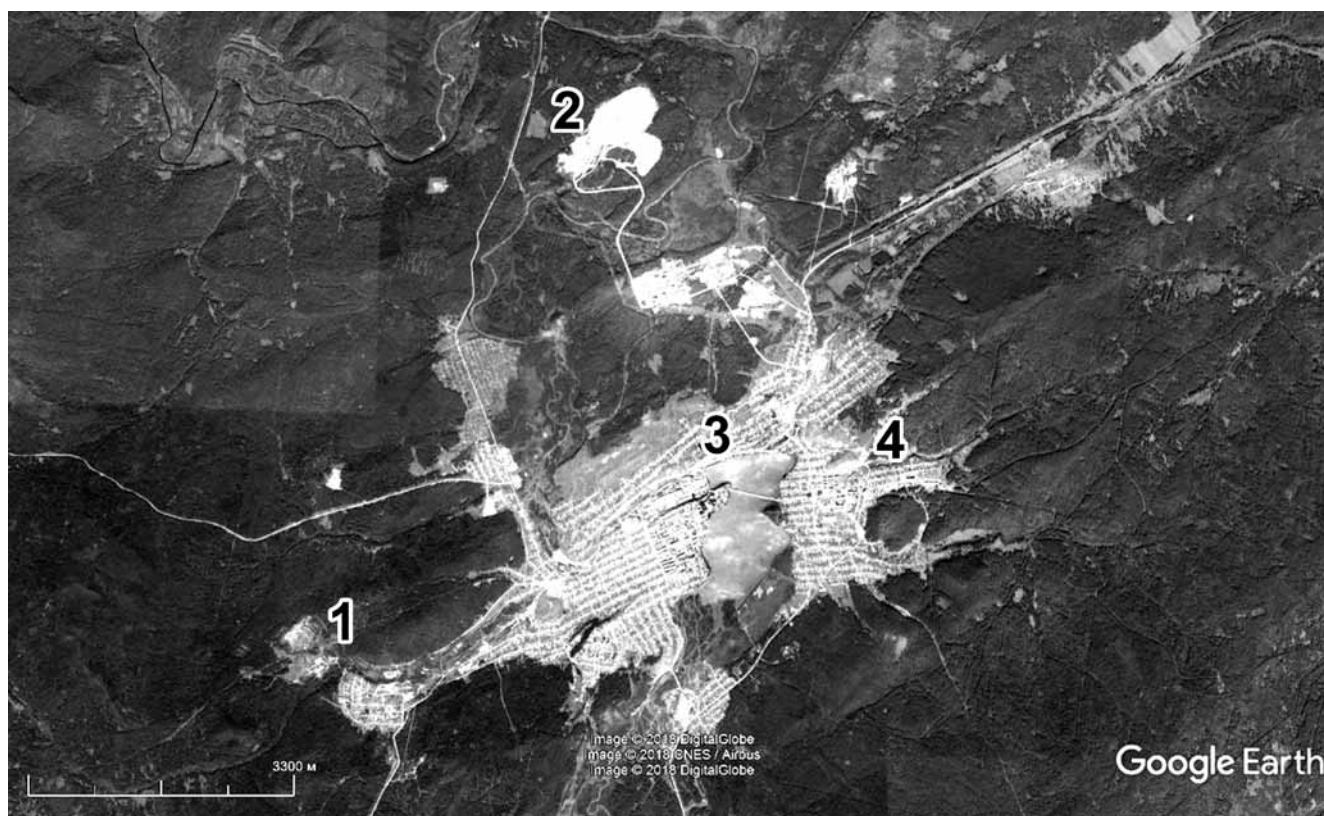


Рис. 2. Схема расположения изученных объектов вокруг Катав-Ивановска (номера объектов соответствуют номерам в тексте)

численные Z-образные подвороты слоев, а также реальные правосторонние смещения маркерov. На первых трех объектах карьерами вскрыты преимущественно известняки катавской свиты верхнего рифея. Среди изученных мезоструктур наиболее четко проявлены зеркала скольжения взбросового и надвигового типов; SF-текстуры; кливаж, в том числе кливаж пльчатости; тектонические брекчии; трещины отрыва; кинкбанды; сколы; кулисные жилы. По этим мезоструктурам восстановлены палеополя напряжения и кинематика разрывов (рис. 3). Во всех случаях ось сжатия оказалась ориентированной по направлению северо-западно-юго-восток (азимут простираия от 300 до 345°). Она либо горизонтальна, либо слабо наклонена на юго-восток. Напряжение растяжения и среднее напряжение близки. Одно из них, как правило, ориентировано почти горизонтально, а другое — почти вертикально. Согласно приведенным данным разрывы интерпретировались как взбросы. Вместе с тем выяснилось, что такая картина наблюдается только на некотором удалении от разрывов в обоих их крыльях, где касательные напряжения почти не проявлены. Непосредственно же в зоне каждого конкретного разрыва хорошо проявлены и касательные напряжения, которые фиксируются по структурным парагенезам, характерным для зон правосторонней транспрессии. Совокупность этих данных позволяет интерпретировать Сулейнский и Бакало-Саткинский разломы как правосторонние взбросо-сдвиги.

В мелких карьерах на северо-восточной окраине Катав-Ивановска, непосредственно в зоне Бакало-Саткинского разлома вскрыта пачка серых мелкокристаллических известняков с частыми прослоями темно-серых, почти черных углеродисто-глинистых, реже кварц-серицитовых и глинистых сланцев общей мощностью до 40 м. Породы относятся к зигазино-комаровской свите среднего рифея. Они интенсивно тектонизированы (местами превращены в тектонические брекчии) и смяты в мелкие дисгармоничные складки (рис. 4). В пределах обнажения породы дезинтегрированы, фактически наблюдаются только хаотически расположенные обрывки складчатой структуры, осложненной малоамплитудными надвигами и взбросами той же юго-западной вергентности. В дезинтегрированной массе встречаются крупные обломки известняков угловатой или сглаженной формы, часть пластов известняков будинирована. В северо-восточной части карьера известняки и сланцы смяты в опрокинутую антиформу с западно-юго-западной вергентностью (осевая поверхность падает по азимуту 76° под углом 72°, а шарнир круто погружается на юго-юго-восток). В некоторых местах пласты смяты в мелкие складки гофрировки с круто залегающими шарнирами. В отдельных блоках сохраняется тонкий кливаж, косо секущий слоистость, а также маломощные зоны интенсивного рассланцевания.

Таким образом, зона Бакало-Саткинского разлома представляет собой тектонический меланж,

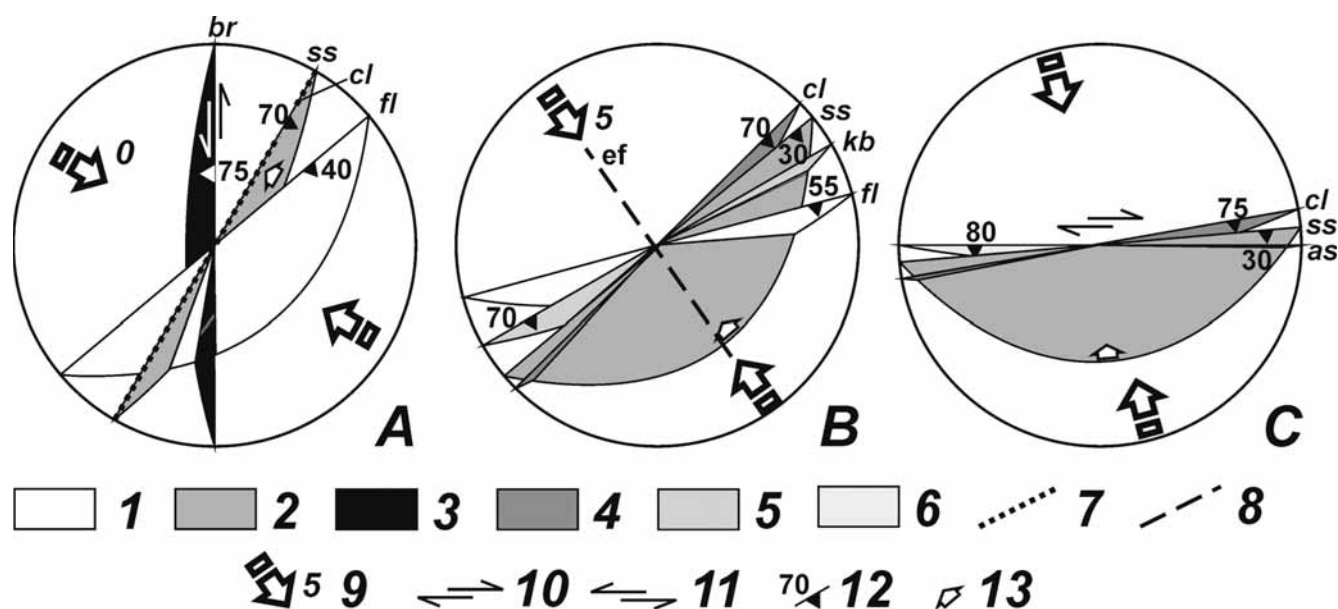


Рис. 3. Стереогаммы мезоструктурных элементов в изученных объектах: А — карьер Катав-Ивановского цементного завода, В — карьер Башлес, С — карьер на северной окраине Катав-Ивановска (нижняя полусфера): 1 — смыкающее крыло флексуры (*fl*); 2 — зеркало скольжения (*ss*); 3 — тектоническая брекчия (*br*); 4 — кливаж пльчатости (*cl*); 5 — кинкбанд (*kb*); 6 — осевая поверхность складок (*as*); 7 — вертикальный кливаж (*cl*); 8 — вертикальные трещины отрыва (*ef*); 9 — направление и угол падения оси сжатия; 10 — правосдвиговая компонента; 11 — левосдвиговая компонента; 12 — угол падения поверхностей; 13 — направление смещения по зеркалам скольжения

сформированный в несколько этапов деформаций. Вероятнее всего, на первом этапе в обстановке субмеридионального сжатия сформировались крупные складки 1-го порядка с крутопадающими крыльями и малыми углами, близкие к изоклинальным. На втором этапе при преобладании касательных напряжений образовались складки 2-го порядка, косые по отношению к крупным складкам 1-го порядка, а также мелкая гофрировка на

крыльях складок 1-го порядка. На третьем этапе в условиях транспрессии складчатая структура была разрушена, сформировался хаотический комплекс тектонического меланжа. Подобная ситуация реконструирована и западнее, в районе г. Юрюзань [Тевелев и др., 2018].

Отдельно стоит вопрос о возрасте описанных деформаций. Известно, что в северо-западной части Башкирского мегантиклинория палеозойские

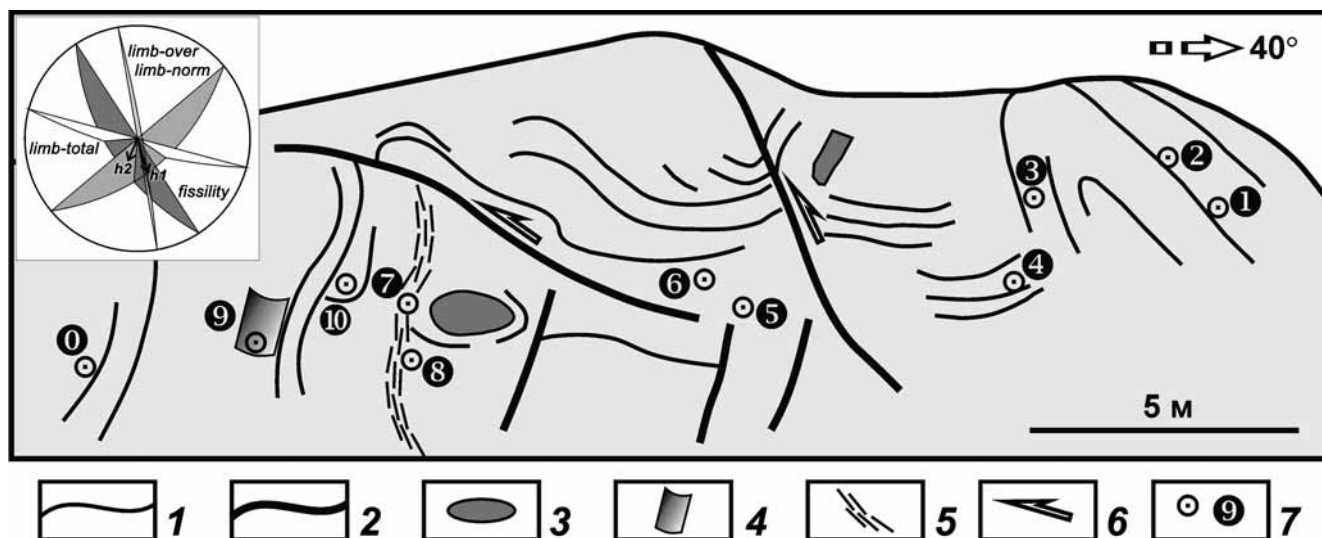


Рис. 4. Структурная схема фрагмента зигзазино-комаровской свиты (северо-западная стенка карьера на северо-восточной окраине Катав-Ивановска) и стереогамма основных структурных элементов: 1 — маркирующие пласти; 2 — разрывы; 3 — обломки известняков; 4 — фрагмент складки гофрировки с крутым шарниром, выпуклой на северо-запад; 5 — зона рассланцевания; 6 — направление смещения висячих крыльев разрывов; 7 — точки замеров элементов залегания: номер, азимут и угол падения (0 — $180 \angle 65$, 1 — $140 \angle 55$, 2 — $140 \angle 60$, 3 — $80 \angle 85$, 4 — $270 \angle 30$, 5 — $190 \angle 80$, 6 — $210 \angle 80$, 7 — $235 \angle 55$, 8 — $240 \angle 70$, 9 — $205 \angle 70$, 10 — $195 \angle 85$).

На стереогамме: *limb-total* — общее падение слоев структуры; *limb-norm* — «нормальное» крыло антиформы; *limb-over* — «опрокинутое» крыло антиформы; *fissility* — сланцеватость (локальная зона); *h1* — положение шарнира антиформы; *h2* — положение шарниров мелких складок гофрировки

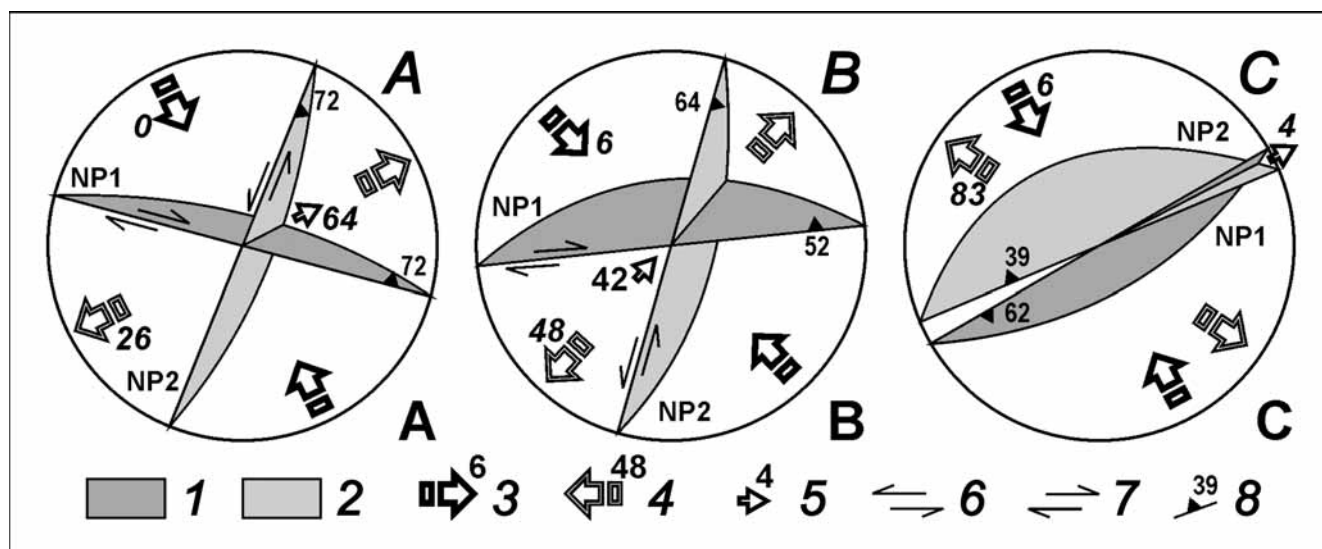


Рис. 5. Стереограммы, отражающие положение нодальных плоскостей и осей главных напряжений (нижняя полусфера): *A* — по данным ФИЦ ЕГС РАН; *B* — по данным USGS NIEC; *C* — по данным GFZ: 1 — нодальная плоскость NP1; 2 — нодальная плоскость NP2; 3 — ось сжатия и угол ее наклона; 4 — ось растяжения и угол ее наклона; 5 — средняя ось и угол ее наклона; 6 — левосторонняя компонента сдвига; 7 — правосторонняя компонента сдвига; 8 — угол наклона нодальной плоскости

образования залегают на рифейских с существенным размывом, но с параллельным несогласием, т.е. описанные деформации не могут быть допалеозойскими. Вероятнее всего, формирование структуры этой части Башкирского мегантиклинория произошло в позднем палеозое во время уральской коллизии, которая началась на границе башкирского и московского веков. Вместе с тем не исключен и более поздний возраст многих деформаций, отвечающий уже альпийскому этапу формирования горной системы Урала.

Основные параметры Катав-Ивановских землетрясений 2018 г. Первое землетрясение 2018 г. произошло 5 сентября в 03:58:15 местного времени. По данным ФИЦ ЕГС РАН (Федеральный исследовательский центр единой геофизической службы Российской академии наук) [ФИЦ..., 2018], координаты эпицентра землетрясения: $54^{\circ}34'48''$ с.ш. и $57^{\circ}46'48''$ в.д. Магнитуда (Mb) составила 5,4. В течение последующих суток было зарегистрировано 19 афтершоков, в том числе один магнитудой 4,7 (координаты: $54^{\circ}34'12''$ с.ш. и $57^{\circ}48'00''$ в.д.). Отметим, что данные разных геологических служб относительно координат эпицентров существенно различаются (рис. 1). Так, по данным USGS (Геологическая служба США) [USGS..., 2018], координаты эпицентра основного события следующие: $54^{\circ}47'06''$ с.ш. и $57^{\circ}58'05''$ в.д. (Mb 5,4), а координаты самого сильного афтершока: $54^{\circ}42'11''$ с.ш. и $58^{\circ}04'30''$ в.д., магнитуда 4,2. Координаты эпицентра основного землетрясения, по данным EMSC (Европейско-Средиземноморский сейсмологический центр) [EMSC..., 2018] $54^{\circ}44'24''$ с.ш., $58^{\circ}06'36''$ в.д., Mb 5,4. Все службы оценивают землетрясение как малоглубинное (10 км).

Относительно координат эпицентра землетрясения 29 сентября данные разных служб также рас-

ходятся: ФИЦ ЕГС РАН: $54^{\circ}44'24''$ с.ш., $57^{\circ}51'00''$ в.д. (Mb 4,4); EMSC: $54^{\circ}49'48''$ с.ш., $58^{\circ}06'00''$ в.д. (Mb 4,2); USGS: $54^{\circ}44'52''$ с.ш., $58^{\circ}00'50''$ в.д. (Mb 4,4).

Но не совпадают не только оценки координат землетрясений, разнятся и оценки механизма очага землетрясений [ФИЦ..., 2018]. Согласно данным ФИЦ ЕГС РАН, механизм очага землетрясения 4 сентября 2018 г. рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн на 42 станциях, из них на 20 станциях зарегистрированы волны сжатия, на 22 станциях — разрежения. Станции расположены в интервале эпицентральных расстояний от $1,8$ до $94,6^{\circ}$ и в азимутальном створе от 12 до 355° . Землетрясение возникло под действием близких по величине напряжений сжатия (ориентированы на юг-юго-восток по азимуту (Az) 154°) и растяжения (ориентированы на запад-юго-запад (Az 243°). При этом нодальная плоскость NP1 простирается на запад-северо-запад (Az 285°), а нодальная плоскость NP2 — на север-северо-восток (Az $16-22^{\circ}$). Смещение по плоскости NP1 — правосторонний сдвиг, а по плоскости NP2 — левосторонний сдвиг (рис. 5).

Несколько иная интерпретация механизма очага землетрясения приводится Национальным центром информации о землетрясениях Геологической службы США (USGS NEIC). Предполагается, что в очаге землетрясения преобладали напряжения сжатия, ориентированные на юго-восток (Az 137°). При этом смещение по плоскости NP1 (Az 264) интерпретируется как правосторонний взбросо-сдвиг, а по плоскости NP2 (Az 247) — как левосторонний взбросо-сдвиг.

Немецкий исследовательский центр наук о Земле (GFZ, Германия) предлагает еще один вариант механизма очага землетрясения. Считает-

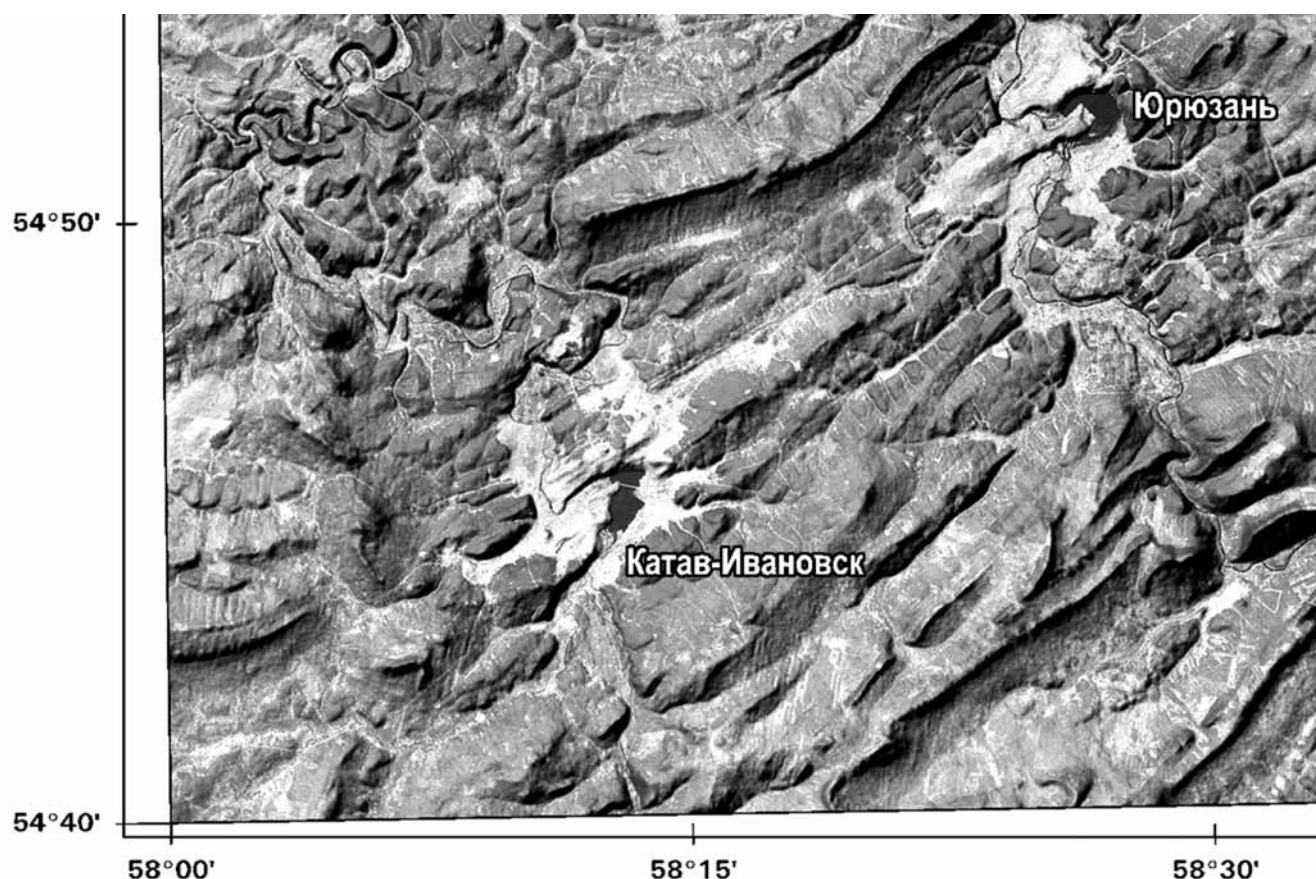


Рис. 6. Фрагмент цветовой композиции RGB 7-го, 2-го и 4-го каналов, совмещенных с рельефом (LANDSAT 7 ETM+), по [Дистанционная..., 2015]

ся, что в очаге преобладали напряжения сжатия, ориентированные по азимуту 153° . Смещение по нодальным плоскостям NP1 (Аз 247) и NP2 (Аз 60) интерпретируется как взбросовое.

Результаты исследований и их обсуждение.

Первое, что бросается в глаза, — значительные расхождения в определении координат эпицентров, определенных разными службами, причем разница составляет 25–30 км. Вероятно, это связано с использованием разных сетей регистрирующих станций. Особенно важно, что станций практически нет в меридиональных секторах от эпицентров. Однако эпицентры довольно кучно расположены на 10–20 км западнее г. Катав-Ивановск. Наиболее далеки от скопления эпицентры, координаты которых получены в ФИЦ ЕГЦ РАН, тем не менее, и они расположены в зоне Бакало-Саткинского взбросо-сдвига.

Что касается механизмов очага землетрясения, то, несмотря на различия, в их интерпретации имеются и сходные черты. Так, пространственное положение оси сжатия в разных вариантах примерно совпадает: эта ось имеет северо-западное простирание, причем она либо горизонтальна, либо полого погружается на юго-восток. Кроме того, простирание оси растяжения примерно одинаково в двух случаях, и только в варианте взбросов она ориентирована практически верти-

кально. Направление смещения по нодальным плоскостям варьирует от сдвигов до взбросов, причем направление сдвигания по ним совпадает в обоих вариантах, предусматривающих сдвиговую компоненту, а в двух других вариантах совпадает взбросовая компонента. При этом положение в пространстве промежуточной оси варьирует очень значительно.

Сравнение полей напряжения, вычисленных при определении механизмов очагов землетрясений, а также выявленных при анализе мезоструктурных элементов Бакало-Саткинской зоны разломов, позволяет сделать вывод о их принципиальном сходстве. Прежде всего обращает на себя внимание близкая пространственная ориентировка осей сжатия (северо-западное простирание, субгоризонтальное залегание). Пространственное положение взбросо-сдвигов хорошо коррелирует с положением нодальной плоскости NP1 в интерпретации «взбросы» (GFZ). Выбор нодальной плоскости, совпадающей с разломом, инициирующим землетрясение, как правило, зависит от интерпретатора-геолога. В случае Катав-Ивановских землетрясений 2018 г. этим разломом с очевидностью является Катавско-Юрюзанская зона. С этой же зоной связаны и землетрясения 1990 г. с магнитудой 4,5, произошедшие на 65 км северо-восточнее.

Заключение. Таким образом, выяснено, что обстановка правосторонней транспрессии, при которой сформировалась структура северо-западной части Башкирского мегантиклинория, сохраняется и в настоящее время. Современные хребты имеют то же северо-восточное простира-

ние, т.е. рельеф поддерживается за счет северо-западного сжатия (рис. 6). Многочисленные мелкие поперечные долины на склонах хребтов, скорее всего, фиксируют северо-восточное растяжение. Разрывам соответствуют протяженные долины того же простирания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дистанционная основа листа N-40-XI. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. URL: <http://www.vsegei.ru/ru/info> (даты обращения: сентябрь 2015 — октябрь 2018).

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Тевелев Ал.В., Прудников И.А., Тевелев Арк.В. и др. Кинематическая модель формирования Симской мульды Предуральяского краевого прогиба // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 2. С. 23–32.

ФИЦ ЕГС РАН (Федеральный исследовательский центр единой геофизической службы Российской ака-

демии наук). URL: <http://www.gsras.ru/new/ssd.htm> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

EMSC. Search for earthquakes. URL: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

IRIS. Seismic Monitor. URL: <http://ds.iris.edu/seismon/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

USGS NEIC. Search Earthquake Catalog. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (даты обращения: сентябрь–октябрь 2018).

Поступила в редакцию

Поступила с доработки

Принята к публикации