

УДК 551.24:551.432

Современные геодинамические системы Урала в связи с сейсмичностью

© 2023 г. ¹В.М. Макеев, ¹Е.А. Пикулик, ²С.Н. Никитин, ¹И.В. Коробова

¹ИГЭ РАН, г. Москва, Россия; ²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 11.07.2023 г.

Аннотация. Исследования направлены на изучение современных геодинамических систем Урала в связи с неравномерным распределением сейсмической активности. На Южном и Среднем Урале, а также на смежных платформенных территориях исследованы неотектоническая зональность и геодинамические условия её формирования в связи с произошедшим в 2018 г. Катав-Ивановским среднемагнитудным землетрясением. Его эпицентр находится вне известных зон возможных сейсмических очагов, что потребовало дополнительных исследований для определения причин его возникновения. В результате приповерхностных и глубинных исследований установлены причиной поперечной сегментации Урала и, возможно, одним из факторов сейсмической активности. Эти системы несогласно сочленяются друг с другом с развитием Бирско-Каратауской геодинамически активной зоны и Катав-Саткинской зоны интерференции, к которой приурочено рассматриваемое землетрясение. Зона интерференции исследована относительно трещиноватости и борозд скольжения с оценкой ориентации современных напряжений, наводимых со стороны активных областей. Эти напряжения являются причиной активизации Зильмердакского позднепалеозойского надвига и, как следствие, Катав-Ивановского землетрясения. Сотрясения вызвали развитие вторичных опасных сейсмогенных явлений и деформации жилых зданий.

Ключевые слова: неотектоническая зональность, глубинная геодинамика, зона интерференции, геодинамически активные зоны, сейсмичность, грязевые оплывины.

Для цитирования: Макеев В.М., Пикулик Е.А., Никитин С.Н., Коробова И.В. Современные геодинамические системы Урала в связи с сейсмичностью // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 83–98. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.06>. – EDN: YZSNKL

Введение

Исследования в целом нацелены на изучение геодинамических систем Урала в связи с неравномерным и неоднородным распределением сейсмической активности. Региональные работы с учётом глубинного строения проведены в пределах Южного и Среднего Урала, включая прилежащие к ним платформенные области Бельского и Пермского (Прикамья) Предуралья и Зауральского плато. Детальные исследования были сконцентрированы на северо-западном склоне новейшего свода Южного Урала в верховьях рек Юрюзани и Сим, где произошло одно из самых сильных землетрясений за время инструментальных наблюдений на Урале – Катав-Ивановское (рис. 1). Его эпицентр расположен в 13 км к западу от г. Усть-Катавска в пределах широтно вытянутой горы Каменной (абс. отм. 848.7 м).

Согласно международной базе сейсмических данных IRIS (обсерватория «Арти»), Уральской региональной сети наблюдений (г. Пермь, MIRAS) и ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск, OBGSR), в Катав-Ивановском районе Челябинской области произошло Катав-Ивановское землетрясение 4 сентября 2018 года. Оно стало самым сильным инструментально зафиксированным сейсмическим событием на Урале ($m_b=5.4$) ($I_0=6$ баллов). Необычность данного события состоит в том, что после него впервые для Урала был зафиксирован афтершоковый процесс, активная стадия которого продолжалась более одного года [Дягилев и др., 2020].

Катав-Ивановское землетрясение сопровождалось афтершоками, что нехарактерно для преимущественно одноактных событий Урала. Установленная Пермским Горным институтом УрО РАН временная сеть сейсмических станций

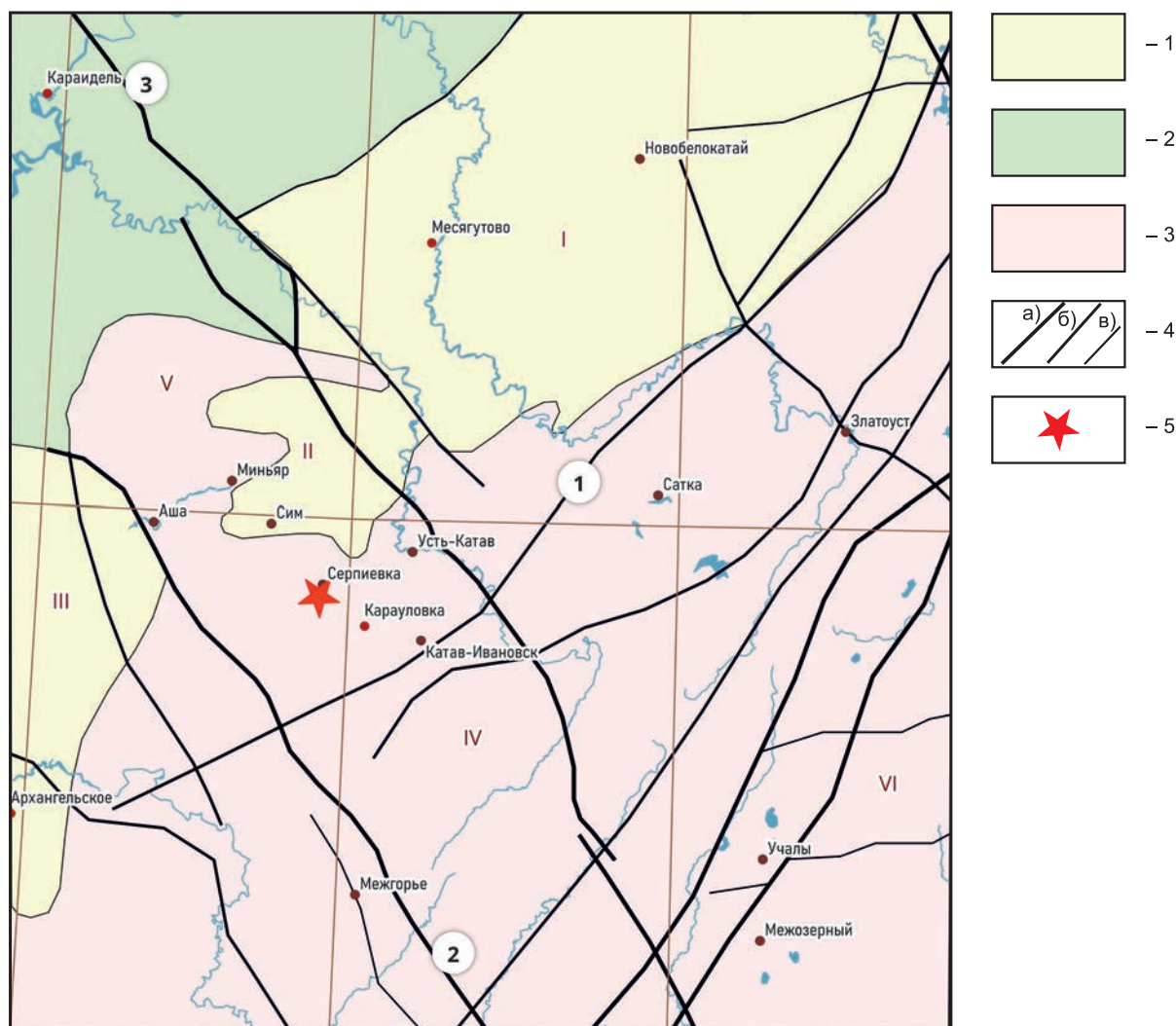


Рис. 1. Геологическое строение района исследований.

1 – Предуральский краевой прогиб: Юрюзано-Сылвинская ячея (I), Симская мулда (II) и Бельская ячея (III); 2 – Башкирский (Пермско-Башкирский) докембрийский свод Русской плиты Восточно-Европейской платформы (ВЕП); 3 – Уральские складчатые структуры: Башкирский позднепротерозойский (рифейский) антиклинорий (IV), включая горы Каратау (V), и Восточно-Уральский антиклинорий (VI); 4 – линеаменты [Бачманов и др., 2001]: а) отчётливые, б) среднепроявленные, в) неотчётливые; 5 – Катав-Ивановское землетрясение (04.09.2018 г.). На рисунке: Катав-Ивановский позднепротерозойский взброс (1); линеаменты северозападного простирания – Бирско-Каратауский (2) и Юрюзанский (3), – проявляющие Каратаускую поперечную зону нарушений

позволила определить афтершоковую зону, вытянутую субширотно. Афтершоки распространены в пределах населённых пунктов Катав-Ивановск, Карауловка, Усть-Катав, Лемеза и Серпиевка. Здесь находятся истоки реки Сим (правого притока р. Белой) и р. Юрюзани (левого притока р. Уфы). Поскольку Катав-Ивановское землетрясение не попадает ни на одну из известных активных разрывных зон Урала, возникает проблема оценки причин его возникновения [Кашубин и др., 2001].

До Катав-Ивановского землетрясения наиболее значимыми на Урале были Билимбаевское

1914 г. с магнитудой $M_L=5$, Средне-Уральское 2015 г. и Пермь-Кунгурское 1798 г. с $M_L=4.7$ [Годзиловская, 2016]. Согласно нормативным картам ОСР-2015, рассматриваемый район относится к 6-балльной зоне сейсмичности с $M_{max}=4.5$ при повторяемости землетрясений один раз в 5000 лет (СП 14.13330.2018). Катав-Ивановское событие, произошедшее вне известных зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ), превысило максимальную прогнозируемую магнитуду и показало, что требуются иные подходы к сейсмическим исследованиям и переоценка параметров сейсмического режима в регионе.

На наш взгляд, актуальным является структурно-геодинамический методический подход, признающий разнородность напряжений и деформаций, выраженную геодинамическими системами [Юдахин и др., 2003; Макеев и др., 2018; Макеев и др., 2019].

Происхождение Урала как субмеридионального пояса новейших поднятий (P_3) связывается с коллизионным взаимодействием Индостанской и Аравийской плит, внедряющихся в Евразийскую плиту [Копп, 2004]. Согласно инденторной тектонике, северное перемещение южных плит при столкновении с Евразийской плитой вызывает латеральный отток вещества в стороны и встречное субширотное сближение Уфимского плато (Русской платформенной плиты) и Сибирского блока, приводящее к пережиму осевой зоны Среднего Урала. Эти движения подтверждаются данными измерений в рудниках и GPS-мониторингом [Алейников, 1989; Utkin et al., 2010].

Происхождение современной тектонической активности (Q_{III-IV}) инициируется Фенноскандинавской геодинамической системой и Центрально-Азиатской областью активного тектогенеза [Юдахин и др., 2003]. Считается, что напряжение сжатия ориентировано косо (северо-запад–юго-восток) относительно субмеридионального простирания Урала, что приводит к развитию Урало-Оманской левосдвиговой зоны нарушений на границе Урала и Западно-Сибирской плиты (ЗСП). Сейсмичность традиционно рассматривается с учётом этих концепций, что обязывает связывать её исключительно с активизацией древних разломов [Дружинин и др., 2014; Тевелев и др., 2019]. Однако все эти точки зрения не объясняют главного – причину поперечной сегментации Урала, которая может быть одним из основных факторов сейсмической активности.

Цель исследований – изучение неотектонической зональности и её происхождения в связи с сейсмичностью. Задача – определение структурного и тектонического положения Катав-Ивановского землетрясения и причин его образования. Метод исследований – структурно-геодинамический, включающий структурно-геоморфологический (неотектонический) и тектонофизический с привлечением данных о глубинном строении, полученных в смежных дисциплинах. Работа актуальна для промышленно развитого Уральского региона, к которому относятся Башкирия, Свердловская и Челябинская области, особенно в аспекте уточнения исходной сейсмичности (УИС).

В основу анализа причин возникновения сейсмичности Южноуральского региона и сопредельных территорий положены данные геологического строения, исследования неотектонических напряжений и структур, современных геодинамических систем и проявления вторичных сейсмогенных явлений.

Краткие сведения о геологическом строении

В геологическом отношении Южноуральский регион представлен тремя структурно-тектоническими этапами: 1) позднепротерозойским (тиманидами); 2) палеозойским (уралидами); 3) пермским, связанным образованием предгорного прогиба. Общая мощность отложений составляет 8–12 км [Князев и др., 2013].

Позднепротерозойский этаж, к которому приурочен эпицентр землетрясения, представлен складчато-разрывными структурами северо-восточного простирания Башкирского антиклинория [Геология ..., 1969; Тектоническая ..., 1968]. Породы представлены слабометаморфизованными алевролитами, песчаниками, конгломератами, мергелями и известняками юрматинской и каратауской серий. На востоке Башкирский антиклинорий сопряжён с Уралтауским антиклинорием. Последний отчётливо выражен в рельефе одноимённым хребтом – главным водоразделом Южного Урала (абс. отм. 1200 м и более). В обоих антиклинориях развиты в основном надвиги, локализованные на сопряжении антиклиналей и синклиналей, что приводит к частичной редукции их крыльев.

Для Южного Урала характерными являются периклинальные и центриклинальные замыкания складчатости с развитием поперечных разрывных зон. Эти зоны наследуются неотектоническими перемычками-седловинами с образованием замкнутых впадин. Одна из таких перемычек субмеридионального простирания (абс. отм. 500–600 м), замыкающая впадину овальной формы, образована в районе села Карауловка. Здесь происходит замыкание складчатости и изменение её простирания с широтного на северо-восточное с образованием поперечных нарушений. К ним оказалась приурочена эпицентральная зона Катав-Ивановского землетрясения с нехарактерной для Южного Урала грязевой оплывиной.

Палеозойский этаж сложен девон-каменноугольными и более древними силурийскими отложениями, смятыми в складки и нарушенными разрывами позднепалеозойско-раннемезозойского возраста (уралиды). В пределах района

исследования ядра некоторых антиклинальных складок обнажают позднепротерозойские породы. Крылья складок сложены породами среднего палеозоя, подверженными нарушениям надвигового типа. Между уралидами и тиманидами отмечается отчётливое угловое несогласие и перерыв в осадконакоплении, отвечающий времени кембрийской пенеппенизации.

Пермский этаж представлен молассовыми отложениями, выполняющими Симскую мульду и Предуральский краевой прогиб, небольшая часть которого попадает в район исследований. Симская мульда (P₂), расположенная между реками Сим и Юрюзань, частично изолирована от краевого прогиба выступом Каратау, сложенным позднепротерозойскими породами. Предуральский прогиб делится этим выступом на две ячеи: Бельскую и Юрюзано-Сылвинскую. В новейшее время Симская мульда и выступ Каратау вовлечены в Каратаускую поперечную зону нарушений, которая с юго-запада ограничена Бирско-Каратауским линеamentом, а с северо-востока – Юрюзанским линеamentом (рис. 1).

В аспекте геологического развития конец каменноугольного периода был принципиальным для рассматриваемого региона, ознаменовавшимся континентальной гиперколлизией двух субплит: Балтики и Казахстана. В это время складчатые тиманиды и уралиды по Зильмердакскому надвигу были надвинуты на архей-раннепротерозойский кристаллический фундамент Башкирского свода Восточно-Европейской платформы (ВЕР). Надвиг погружается с запада от гор Каратау на восток под Предуральский прогиб и Башкирский антиклинорий вплоть до Главного уральского разлома [Международная ..., 1981]. По нему слабометаморфизованные породы тиманид контактируют с высокометаморфизованными породами кристаллического фундамента. Каратауское неотектоническое поднятие пересекает этот надвиг, что может являться причиной концентрации в нём напряжений.

Неотектонические напряжения

В Катав-Ивановском районе в эпицентральной зоне землетрясений приблизительно в радиусе 30 км были проведены полевые маршрутные работы, направленные на измерение трещин, разрывов и борозд скольжения (зеркал) с целью реконструкции поля напряжений. Измерения проводились в верхнепротерозойских отложениях, вскрытых карьерами и дорожными выемками. Борозды скольжения, подчёркнутые

кальцитовыми, гипсовыми и другими вторичными минералами гидротермального (низкотемпературного) происхождения, рассматриваются как неотектонические (плиоценовые) или даже голоценовые (современные). Результаты измерений были обработаны двумя тектонофизическими методами: методом структурно-парагенетического анализа трещиноватости [Расцветаяев, 1987] и методом катакластического анализа [Ребецкий и др., 2017].

В основе структурно-парагенетического метода лежит положение о том, что геологические стресс-индикаторы – малые разрывы, трещины, стилолитовые швы – несут информацию об ориентировке главных осей сжатия и растяжения. На основе катакластического анализа определяются количественные характеристики стресс-состояний – ориентация осей главных напряжений и коэффициент Ладе–Надаи с учётом состава отложений. Трещины и зеркала скольжения обрабатываются с помощью программы STRESSgeol [Ребецкий и др., 2017]. Определение напряжений любезно выполнены сотрудниками ИФЗ РАН Н.А. Гордеевым и И.В. Бондарем, которым выражаем свою благодарность.

Оба метода позволяют независимо друг от друга сравнить полученные ориентировки осей напряжений и этим подтвердить или поставить под сомнение результаты интерпретаций. Измерения трещин и зеркал скольжения были выполнены у населённых пунктов Карауловка, Катав-Ивановск и Лемеза (рис. 2).

В дорожной выемке к северо-западу от села Карауловка вскрыты позднепротерозойские отложения миньярской свиты, сложенные известняками и доломитами с прослоями песчаников и глинистых сланцев. Отложения падают под углом 50–65° на юго-восток. Почти все трещины являются сбросовыми с крутым падением на юг–юго-запад за исключением одной, у которой зеркало скольжения имеет взбросовую кинематику с падением на юго-восток. Кальцитовые борозды выражены отчётливо. Согласно парагенезу трещин и зеркал скольжения, установлено, что стресс-индикаторы отвечают напряжению максимального субширотного сжатия. Согласно методу катакластического анализа, ось максимального сжатия также ориентирована субширотом (рис. 2а).

К северу от Катав-Ивановска в карьере вскрыты миньярские трещиноватые доломиты. Породы сильно смяты в складки с падением на юго-запад, северо-восток и северо-запад. Зеркала скольжения соответствуют преимущественно сбросам и редко взбросам.

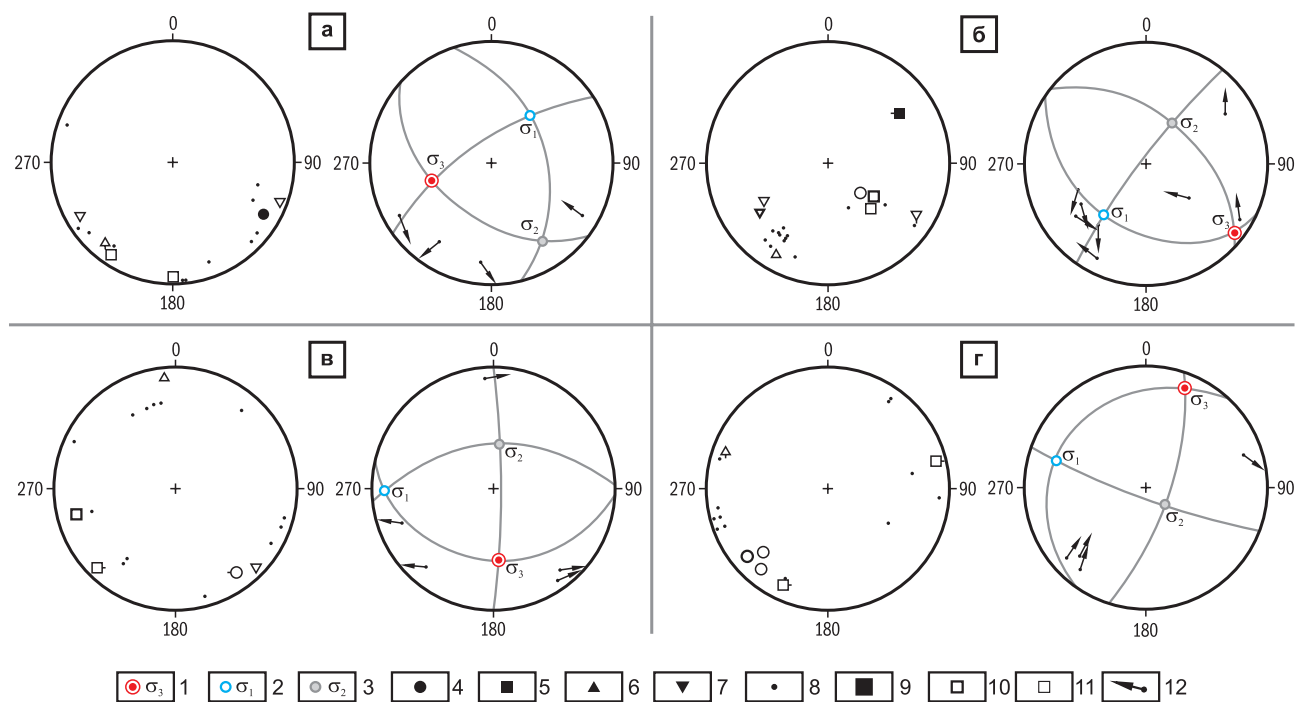


Рис. 2. Диаграммы полей напряжений эпицентральной зоны землетрясений, измеренных: а – в карьере у села Карауловка; б – в карьере к северу от Катав-Ивановска; в – в дорожной выемке у посёлка Лемеза; г – в карьере на юго-западной окраине Катав-Ивановска (левая диаграмма – по [Расцветаев, 1987], правая – по [Ребецкий и др., 2017]).

1–3 – главные оси напряжений: 1 – ось сжатия, 2 – ось растяжения, 3 – промежуточная ось; 4–8 – геологические стресс-индикаторы: 4 – взброс, 5 – сброс, 6 – правый сдвиг, 7 – левый сдвиг, 8 – трещина; 9–11 – степень выраженности зеркал скольжения: 9 – отлично выражены, 10 – хорошо выражены, 11 – плохо выражены; 12 – полюс плоскости зеркала скольжения и направление движения висячего блока

Зеркала скольжения с правым и двумя левыми сдвигами северо-восточного падения образуют единый парагенез, позволяющий определить оси максимального сжатия и растяжения северо-западной и северо-восточной ориентации соответственно. Этому направлению осей противоречат сбросы северо-западного падения и левый сдвиг такого же падения. Нами предполагается, что эти сбросы связаны с другим, более ранним, этапом деформаций, так как выраженность их зеркал плохая. Для этого обнажения оба метода указывают на горизонтальный сдвиг (рис. 2б).

В дорожной выемке у посёлка Лемеза вскрыта позднепротерозойская катавская свита, сложенная известняками, мергелями с прослоями глинистых сланцев северо-западного падения. Отложения слагают синклиналию складку северо-восточного простирания, которая согласуется по взбросовому разлому с антиклинальной складкой Катав-Ивановского района. В обнажении развиты малоамплитудные крутые сбросы (по правилу правой руки) юго-восточного простирания, левый сдвиг и левый сдвиго-взброс северо-восточного простирания. Соглас-

но парагенезу трещин и зеркал скольжения, ось максимального напряжения сжатия имеет субмеридиональную ориентировку, а ось максимального растяжения – субширотную (рис. 2в).

В карьере на юго-западной окраине Катав-Ивановска, вскрывшем доломиты миньярской свиты, зеркала скольжения были измерены в зоне позднепротерозойского взброса северо-восточного простирания. В основном они имеют взбросовую кинематику и редко сбросовую с падением на восток. Парагенез этих структур позволил реконструировать ось максимального сжатия северо-восточной ориентации, ось максимального растяжения – северо-западной ориентации. Эти напряжения, наложенные на позднепротерозойский взброс, могут вызывать в нём левосдвиговые смещения с растяжением (рис. 2г).

Таким образом, в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения действуют напряжения сжатия и растяжения северо-западной и северо-восточной ориентации соответственно, инициированные, возможно, со стороны осевой зоны Южного Урала и Пермского Прикамья

(рис. 2г). Западная часть эпицентральной зоны, где складчатые структуры тиманид являются субширотными, находится в сдвиговых условиях. Восточная часть этой зоны, где эта же складчатость имеет северо-восточное простирание, — в условиях сжатия. Зона поперечного нарушения северо-западного простирания, по которой сочленяется субширотная и северо-восточного простирания складчатость, развивается в условиях правого сдвига. Это заключение подтверждается решением механизма очага Катав-Ивановского землетрясения, который рассматривается как зона правосдвигового растяжения северо-западного простирания (137–153°).

Неотектонические структуры

На основе структурно-геодинамических исследований выделены малые по размеру протя-

жённые неотектонические поднятия и прогибы (складки), наследуемые положительными и отрицательными формами рельефа — хребтами и впадинами. Складки выделены в пределах двух больших структур: 1) Южноуральского новейшего свода с прилегающими равнинами и 2) Камской платформенной равнины (Пермское Предуралье), примыкающей преимущественно к Среднему Уралу (рис. 3).

1) Южноуральский свод — это эпиплатформенное плиоценовое (новейшее) поднятие шириной более 150 км, максимально удалённое к северу от областей Центрально-Азиатского активного тектогенеза. Формирование свода связывается с внутрикоровыми источниками напряжений и деформаций [Сигов и др., 1975; Бабак и др., 1980]. Древним субстратом свода являются пересекающие его субмеридиональные складчато-разрывные тиманиды и уралиды

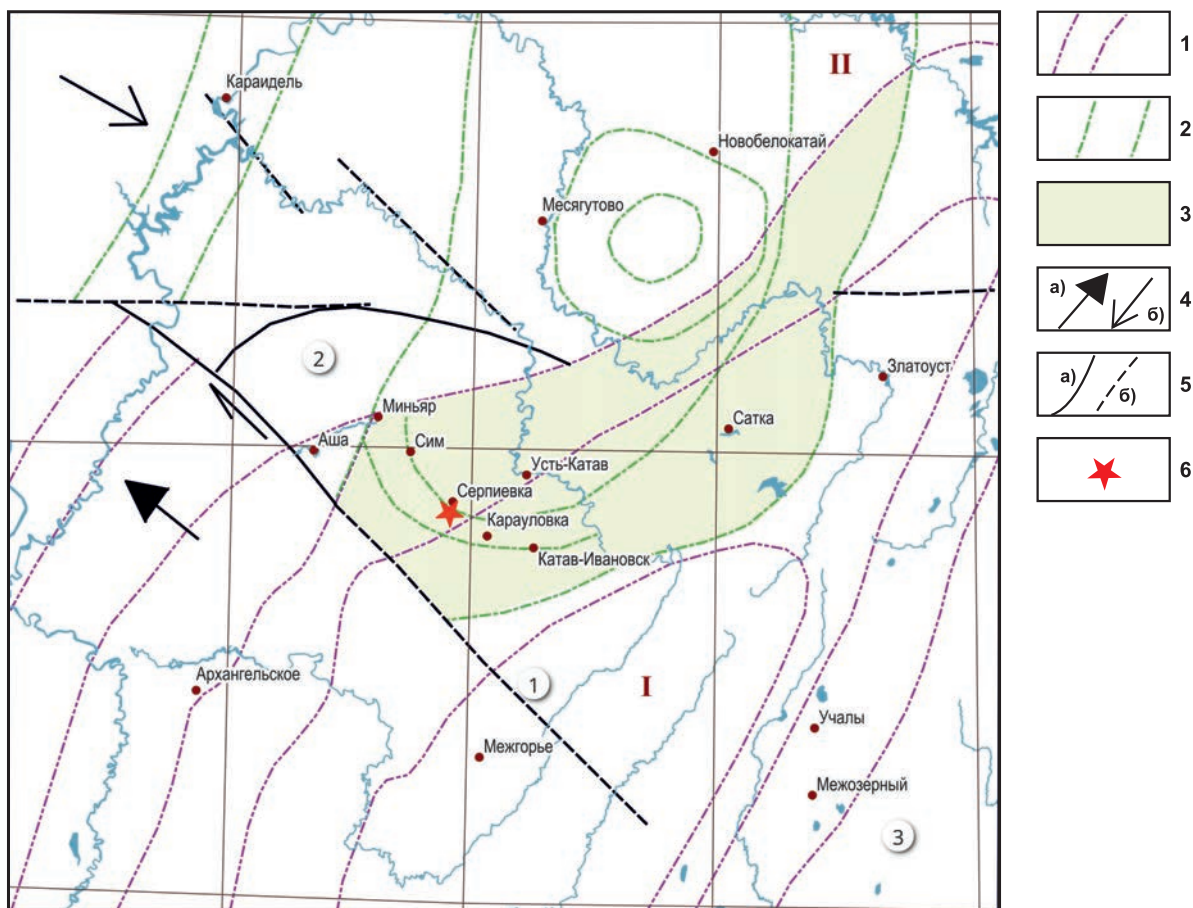


Рис. 3. Неотектоника Южного Урала и смежных платформенных областей.

Неотектонические складки: 1 — уралтауско-магнитогорские, 2 — осинско-большеусинские, 3 — Катав-Саткинская зона интерференции разнородных напряжений; 4 — направления перемещения разнотипных складок: а) орогенных (сжатие) и б) платформенных (растяжение); 5 — тектонические нарушения: а) подтверждённые, б) предполагаемые; 6 — эпицентр Катав-Ивановского землетрясения (главного 04.09.2018 г.). Бирско-Каратауская ГдАЗ (сдвиг) (1), горы Каратау (2), Зауральский пенеплен (наклонное плато) (3). Горно-складчатые структуры Южного Урала (I) и Среднего Урала (II)

в направлении от Мугоджар до Среднего Урала, претерпевшие континентальную коллизию и орогенез в конце палеозоя — в начале мезозоя [Лучков, 2010]. Границей разновозрастных структур является Главный Уральский разлом (ГУР).

Южноуральское сводовое поднятие отчётливо дифференцировано с образованием неотектонических поднятий и прогибов в целом СВ простирания. Эти складки определены условно как уралтауско-магнитогорские по причине согласованности их простирания с относительно высоким и протяжённым кряжистым поднятием Уралтау (абс. отм. 1031–1177 м), с горой Ямантау (1640 м) и магнитогорским прогибом р. Урал. От свода складки распространяются в северо-западном направлении в сторону Бельской предуральской равнины и юго-восточном направлении в сторону Зауральского платформенного плато.

Бельская равнина по происхождению является плиоценовой (акчагыльской) эрозионно-денудационной с абс. отм. 200–300 м. Её образование связано с подъёмом палео-Каспийского морского бассейна. Равнина представлена долиной р. Белой с надпойменными террасами, левобережным белебеевским склоном Южно-Татарского свода и правобережным склоном гор Каратау (форланд Южного Урала). Зеркало складок (кульминация высот рельефа) ступенчато снижается на расстоянии более 85 км от поднятия Уралтау (гора Ямантау 1640 м) до хребта Баш-Алатау (557 м) и ниже. Наиболее яркой ступенью с отчётливым уступом северо-восточного простирания является Ишимбаевская, приуроченная к границе складчатых тиманид и предгорного прогиба Южного Урала.

Зауральское плато является эоцен-олигоценным эрозионно-денудационным с абс. отм. 223–614 м и ниже. Плато погружается под уровень морских палеогеновых отложений Средне-Обской впадины Западно-Сибирской плиты (ЗСП) и является генетически связанным с этими отложениями. Зеркало складок ступенчато снижается с запада на восток от поднятия хребта Уралтау в сторону Магнитогорска и далее на относительно коротком расстоянии в 55 км. На отдельных участках снижение происходит по высокоградиентным уступам северо-восточного простирания. Одним из таких уступов является Сибайский, приуроченный к верховью магнитогорского участка р. Урал.

Разный градиент снижения северо-западного и юго-восточного крыльев Южноуральского новейшего свода указывает на наклон осевой поверхности на юго-восток в сторону Кустанайского пологого поднятия, сопряжённого с Дже-

тыгараским прогибом северо-восточного простирания (верховье рек Тобол и Жарлы). У северо-западного крыла снижение более длинное и относительно пологое, у северо-восточного крыла — более короткое и крутое, обрывающееся на правобережье магнитогорского участка р. Урал.

2) Камская платформенная равнина деформируется с образованием широких пологих неотектонических поднятий и прогибов, выпуклых от центра максимального погружения (депоцентра) Осинской палеозойской впадины (абс. отм. минус 6 км) в сторону Коноваловского увала (абс. отм. 520 м) Среднеуральской осевой зоны. Депоцентр находится в пределах левобережья р. Камы на южном окончании Оханской возвышенности (256–293 м), точнее, в пределах села Большая Уса (293 м). Градиент амплитуды поднятия относительно глубины вреза воткинской Камы (абс. отм. 89 м) и высоты Коноваловского увала (абс. отм. 520 м) на расстоянии 300 км в среднем составляет всего 1.43 м/км. Небольшой градиент деформации неотектонических складок указывает на их платформенный режим развития. Эти складки названы осинско-большеусинскими, поскольку их развитие связано с принципиально важными в геодинамическом отношении структурами.

Рассматриваемые пологие складки (растяжения) являются несопоставимыми по морфологии с относительно узкими и более крутыми уралтауско-магнитогорскими складками (сжатия). На пересечении этих разнотипных складок формируется Катав-Саткинская зона интерференции и Бирско-Каратауский сдвиг, который рассматривается как геодинамически активная зона (рис. 3). Зильмердакский погребённый надвиг, по которому контактирует кристаллический фундамент Уфимского свода и складчатость Башкирского антиклинория на глубине 8–12 км, находится под влиянием зоны интерференции. К реологически расслоённому контакту-надвику приурочен гипоцентр (очаг) Катав-Ивановского землетрясения.

Таким образом, концентрация напряжений и деформаций, в т.ч. сейсмогенного типа, может происходить в связи с пересечением друг с другом разнотипных по происхождению и разновозрастных структур. Пересекающиеся разнотипные неотектонические складки формируют новый тип нарушений, которые ранее на Урале не выделялись: зоны интерференции разнородных напряжений и геодинамически активные зоны (ГдАЗ). Зильмердакский позднепалеозойский надвиг, оказавшийся под влиянием

этих зон, выразился концентрацией напряжений и сейсмогенной разрядкой.

Современные геодинамические системы

Геодинамическая система (ГС) объединяет геодинамически активную область, которая является источником тектонических сил и напряжений, и сопряжённую относительно пассивную в геодинамическом отношении область, преобразующуюся под влиянием активных напряжений. С этих методических позиций в Южноуральском

регионе и на сопредельной территории выделено две структурно-геодинамические системы: 1) Уралтауско-Магнитогорская и 2) Осинско-Большееусинская (рис. 4).

1) Уралтауско-Магнитогорская ГС представлена неотектонической зональностью северо-восточного простирания, которая дифференцирует новейший свод Южного Урала и распространяется на запад в пределы Бельской платформенной равнины. Геодинамически активной областью этой системы является аномально выраженное Магнитогорское опускание

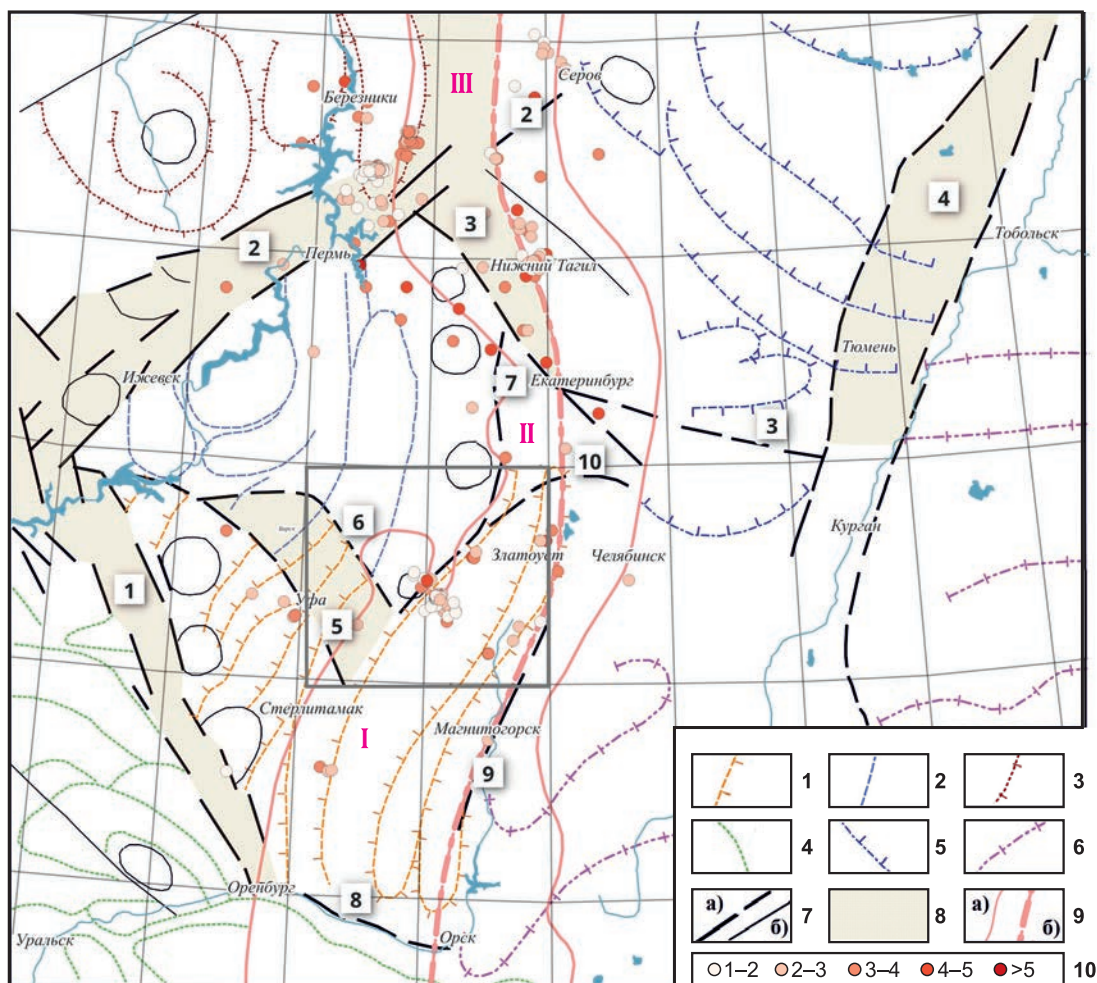


Рис. 4. Современные геодинамические системы Южно-Уральского региона, включая смежные территории.

Геодинамические системы (ГС): 1 – Уралтауско-Магнитогорская, 2 – Осинско-Большееусинская, 3 – Верхнекамская, 4 – Циркум-Прикаспийская, 5 – Ханты-Мансийская (Среднеобская), 6 – Центрально-Азиатская (Памиро-Тянь-Шаньская). 7 – зоны нарушений: а) геодинамически активные зоны (ГДАЗ), б) линейменты. ГДАЗ: Уржум-Оренбургская (Восточно-Каспийская) (1), Можга-Гремячинская (Ижевск-Пермско-Серовская) (2), Туро-Чусовская (3), Тобол-Иртышская (4), Камско-Среднеуральская (5), Бирско-Каратауская (6), Ардынская (7), Орская (8), Кыштымская (9) и Карабашская (10). 8 – зоны интерференции разнородных напряжений. 9 – горно-складчатое сооружение Урала: а) контур открытой части Южного (I), Среднего (II) и Северного Урала (III); б) Главный уральский разлом. 10 – эпицентры землетрясений и их магнитуды. Территория детальных исследований (рис. 3) выделена серой рамкой

сейсмологического раздела Мохоровичича (Мохо) до глубины 60 км. Максимальное опускание Мохо приурочено к сочленению Уралтауского антиклинория и Магнитогорского синклинория (хребет Ирэндик с абс. отм. 757–957 м). Раннеархейский кристаллический выступ, находящийся на глубине 6 км, и центральная часть свода Южного Урала (хребет Уралтау) немного смещены к западу от опускания Мохо [Кашубин и др., 2001].

Магнитогорское опускание вызывает центростремительное движение глубинного вещества от прилежащих менее активных в геодинамическом отношении платформенных равнин, где раздел Мохо относительно приподнят (35 км), к Южноуральскому жёсткому своду (PR3, Pz), где Мохо аномально опускается (60 км). Движение вещества происходит по наклонному разделу по принципу «тяги». На расстоянии более 300 км создаются напряжения сжатия и относительно интенсивные складки в Бельском форланде и зауральском тылу. Над аномальным опусканием происходят утолщение земной коры, рост поднятия в условиях вертикальных напряжений растяжения, расширение свода с дифференциацией его на поднятия и прогибы.

Бельский форланд, прилежащий к своду Южного Урала, дополнительно испытывает воздействие напряжений сжатия, наводимых со стороны Центрально-Азиатской активной области тектогенеза. Участие этих напряжений подтверждается смещением типа детачмента Южноуральского свода относительно своих магнитогорских мантийных корней к западу. Этим можно объяснить более интенсивные складки в Бельском Предуралье и менее интенсивные пологие – в Зауралье. В зауральском тылу, где складываются однонаправленные напряжения сжатия глубинного и приповерхностного типа, их реализация происходит в смещении Южноуральского свода в северо-западном направлении с образованием юго-восточной асимметрии.

2) Осинско-Большеусинская геодинамическая система (ГС) представлена выпуклой с запада на восток неотектонической зональностью, которая распространяется от воткинского участка р. Камы или, точнее, Большеусинского неотектонического поднятия (село Большая Уса с абс. отм. 293 м) в сторону центральной части Среднеуральского поднятия (Коноваловского увала, 609 м, и др. возвышенностей).

Геодинамически активной областью этой системы, как источника напряжений и деформаций, является Усинский аномальный выступ Мохо, находящийся на глубине 35–38 км [Дру-

жинин и др., 2014]. Над выступом расположены Калтасинский рифейский грабен и Осинская палеозойская впадина Волго-Уральской антеклизы, погружённая до 6–8 км. Над депоцентром впадины в рельефе формируется Большеусинское пологое поднятие, с которым сопряжены Сарапульское и Тулвинское поднятия. От активной области напряжения распространяются в сторону менее активной в геодинамическом отношении области с формированием неотектонических складок: Сылвинского поднятия, Уфимского плато и Артинской ступени и сопряжённых с ними прогибов.

Для Осинско-Большеусинской ГС характерен центробежный тип движения глубинного вещества от Усинского выступа (35–38 км) к осевой зоне Среднего Урала, где раздел Мохо опущен до глубины 55 км, на базе более 250 км. Движение происходит по принципу «толкай» следующим образом. Подъём (рост) выступа приводит к сокращению (утонению) над ним мощности земной коры с развитием субвертикальных напряжений сжатия и оттоком глубинного вещества по наклонному разделу в сторону Среднего Урала с развитием напряжений растяжения. Эти процессы подтверждаются сбросом, ограничивающим Уфимский односторонний горст (Суксунский), ступенями, развитыми над Предуральским прогибом и в западной части Среднеуральского поднятия, и кольцевыми структурами [Чижова, Стоянова, 1990].

Таким образом, региональная внутрикоровая активность, выраженная геодинамическими системами, определяет поперечную сегментацию Урала на Южно- и Среднеуральское поднятия на фоне глобальной (литосферной) продольной левосдвиговой активности. Сложение разнородных напряжений регионального и глобального происхождения вызывает увеличение амплитуд поднятий почти в два раза на Южном Урале по сравнению со Средним Уралом, где такого сложения не наблюдается. С повышенной активностью напряжений связано образование южноуральских перирогенных складок. В форланде Среднего Урала подобного типа складки не наблюдаются.

Сейсмичность и вторичные сейсмогенные явления

Амплитуды неотектонических поднятий в Южном Урале, составляют с плиоцена до современности >1000 м, что более чем в два раза больше амплитуд в Среднем Урале, но сейсмичность сконцентрирована преимущественно

в пределах последнего [Лучков, 2010; Макеев и др., 2019]. Большие амплитуды, очевидно, не всегда являются одним из ведущих факторов, определяющих сейсмическую активность. В качестве такого фактора традиционно рассматривается современная активизация древних разломов общепермского простирания в связи с активностью литосферных блоков (субплит). Катав-Ивановское среднемагнитудное землетрясение явилось исключением из правил — оно оказалось за пределами известных сейсмоактивных зон (зон ВОЗ) и поэтому неожиданным и опасным.

Согласно геодинамическим принципам, к категории сейсмогенных зон относятся геодинамически активные зоны. Их образование обусловлено несогласным сочленением разнотипных геодинамических систем, что вызывает концентрацию напряжений (рис. 4).

На сочленении Осинско-Большеусинской и Уралтауско-Магнитогорской ГС находятся Камско-Среднеуральская и Бирско-Каратауская ГдАЗ. Осинско-Большеусинская система сочленяется с Ханты-Мансийской на Среднем и Северном Урале. На их контакте формируются Ардынская и Туро-Чусовская зоны. Рой сейсмичности приурочен к полосе между Ардынской зоной и Главным Уральским разломом (ГУР). Повышенная плотность землетрясений приурочена к широкой зоне между Пермью и Екатеринбургом, включающей северную половину Юрюзань-Сылвинского прогиба и Туро-Чусовскую зону. В районе Нижнего Тагила сейсмогенным является ГУР. Повышенная сейсмичность характерна для Можга-Гремячинской ГдАЗ (Ижевск-Пермско-Серовской), формирующейся на границе Осинско-Большеусинской и Верхнекамской систем. Оценку сейсмичности этих регионов с учётом глубинных геодинамических систем ещё предстоит сделать.

Катав-Ивановское землетрясение впервые вызвало развитие вторичных сейсмогравитационных явлений опасного характера — грязевых оплывин (рис. 5).

Подобное явление произошло во время первого сейсмического события в 3 км к западу от Катав-Ивановска (дорога в село Серпиевка). Оплывина приурочена к пологому склону относительно небольшой по высоте горы Песчаной (абс. отм. 550 м), вытянутой субмеридионально. В верховье горы находилось торфяное болото, заросшее ивой и камышом, которое под влиянием вибрации соскользнуло вниз по глинистой коре выветривания. В грязевой массе содержатся разные по размеру обломки аргиллитов, известняков, песчаников и других осадочных



Рис. 5. Грязевая оплывина горы Песчаной (сентябрь 2018 г.)

пород. Длина оплывины — 650 м, ширина — от нескольких метров до 6 м, глубина рва — от нескольких десятков сантиметров в верховье до 2.5 м в средней части оплывины. Превышение склона составляет приблизительно 6–8 м на базе 100 м. Склон неоднороден, он имеет ступенчатый характер строения. В тыловых швах ступеней залегают торфяные отложения, которые обводнены, что отмечается соответствующей осоково-тростниковой растительностью. В процессе сплыва они также были перемещены по склону и частично выдавлены за пределы рва.

Во время землетрясения произошли деформации жилых построек в Катав-Ивановске и других населённых пунктах. Это выразилось образованием трещин шириной до 5 см по стыкам потолков и боковых стен, иногда трещины косо секут их (рис. 6). Частым явлением было обваливание штукатурки, разрушение гипсовых и шлакоблоковых перегородок. Реже страдали печи и крыши сельских домов.

В наибольшей степени пострадали жилые постройки, возведённые в пределах отложений болотистого типа, залегающие на глинистой коре выветривания. Эти отложения слагают

субгоризонтальные поверхности (ступени) на относительно пологих склонах Солодской горы и Песчаной горы, которые часто рассматриваются априори оптимальными для гражданского строительства в условиях гористой местности.



Рис. 6. Сейсмогенные трещины на стыках стен и секущие стену

Заключение

Современные повышенные градиенты напряжений, ответственные за сейсмическую активность, инициируются глубинными активными областями (центрами), выраженными аномальным строением раздела Мохо и повышенным

тепловым потоком (геотермией) [Смыслов и др., 1995]. Под их влиянием находятся менее активные в геодинамическом отношении области. Активные и относительно пассивные области объединяются в геодинамические системы, в сочленении которых формируются принципиально важные для сейсмичности неотектонические зоны интерференций и геодинамически активные зоны.

В рассматриваемом регионе выделены Уралтауско-Магнитогорская и Осинско-Большееусинская геодинамические системы, которые определяют поперечную сегментацию Южного и Среднего Урала и концентрацию современных напряжений в зонах до-неотектонических нарушений (надвигах, сбросах и т.п.). На сочленении этих систем формируются Катав-Саткинская зона интерференции, к которой приурочено Катав-Ивановское среднемагнитудное землетрясение, и Бирско-Каратауская ГдАЗ. На продолжении последней находится Карабашская ГдАЗ, которая является поперечной границей поднятий Южного и Среднего Урала.

Катав-Саткинская неотектоническая зона пересекает Зильмердакский позднепалеозойский погребённый надвиг. Взаимное влияние двух разновозрастных зон нарушений с разным морфолого-кинематическим типом, вероятно, вызвало катастрофическое изменение напряжений в зоне надвига, что, собственно, и стало причиной среднемагнитудного сейсмического события. В этой зоне сочленяются архейские высокометаморфизованные породы кристаллического фундамента и верхнепротерозойские слабометаморфизованные породы Башкирского антиклинория с разными реологическими и др. свойствами. Таким образом, главным фактором при формировании Катав-Ивановского очага землетрясения была суперпозиция полей напряжений разновозрастных геодинамических структур.

В эпицентральной зоне землетрясения были проведены мониторинг района, температурные и гидродинамические исследования, которые показали следующие результаты. Перед землетрясением аномалии объёмной активности района (ОАР) упали до минимальных значений, а после землетрясения во время афтершоков ОАР приобрела фоновые значения [Овчаренко и др., 2020]. За несколько месяцев перед землетрясением было установлено постепенное увеличение температуры с градиентом 0.02°C в месяц. За десять лет до самого события в гидрогеодинамическом поле проявились деформации сжатия, которые прекратились после землетрясения. Подобные результаты мониторинга были

получены и другими исследователями, в т.ч. зарубежными [Кусонский, Бебнев, 2018; Albarello, 2013; King, 1985; Ramola et al., 2008; Favara et al., 2001].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЭ РАН № 122022400105-9 «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий» и при финансовой поддержке ОАО «Геолоб» и «Уралсейсмоцентр», г. Екатеринбург.

Литература

Алейников А.Л. Исследование состава и динамических условий формирования земной коры Среднего Урала на основе геофизических моделей: автореферат диссертации ... доктора геол.-мин. наук. – Свердловск: СГИ, 1989. – 34 с. – EDN: ZJFLJP

Бабак В.И., Николаев Н.И., Башилов В.И. и др. Карта геоморфолого-неотектонического районирования нечернозёмной зоны РСФСР (за исключением горной части Урала, Зауралья и Калининградской области). М-б 1:1500000. – М.: ГУГК СССР, 1980. – 1 л.

Бачманов Д.М., Говорова Н.Н., Скобелев С.Ф., Трифонов В.Г. Неотектоника Урала (проблемы и решения) // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 61–75.

Геология СССР. Том XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. 1 – Геологическое описание. Кн. 2 / Ред. П.И. Аладинский, К.К. Золоев, В.А. Перваго, А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1969. – 304 с.

Годзиковская А.А. Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времён по 2002 г. (Сопутствующие первичные материалы). – М.: ИФЗ РАН, 2016. – 258 с.

Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Юсупов В.Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. – 226 с. – EDN: XVTWKJ

Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b=5.4$ (Урал) // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 7–20. – DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.01. – EDN: CDITJV

Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А. и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. – Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 2001. – 126 с. – EDN: WYGEUX

Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р. и др. Государственная геоло-

гическая карта РФ (3-е поколение). М-б 1:1000000. Сер. Уральская. N-40–Уфа. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 512 с.

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы // Труды Геологического института. – 2004. – № 552. – С. 1–340. – EDN: XZEXHN

Кусонский О.А., Бебнев А.С. Сейсмические и гравиметрические данные землетрясений, произошедших в Челябинской области 5 и 29 сентября 2018 года // Уральский геофизический вестник. – 2018. – № 4 (34). – С. 26–35. – EDN: YSAZZZ

Макеев В.А., Коробова И.В., Никитин С.Н., Суханова Т.В. Неотектоника, геодинамика и сейсмичность Катав-Саткинской интерференционной зоны Урала // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 21 / Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха, Е.В. Булдаковой и др. – Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. – С. 448–453. – EDN: ZCOZTV

Макеев В.М., Никитин С.Н., Шилина Г.В., Пустовалов Н.А. Усть-Катавское землетрясение – результат суперпозиции разнородных геодинамических условий // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата – ГЕОРИСК-2018: Материалы X Международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2 / Отв. ред. Н.Г. Мавлянова. – М.: РУДН, 2018. – С. 400. – EDN: YNHZUL

Международная тектоническая карта Европы и смежных областей. М-б 1:2 500 000. 2-е изд. / Гл. ред. А.А. Богданов, В.Е. Хаин. – М.: ГУГК при СМ СССР, 1981.

Овчаренко А.В., Давыдов В.А., Шапов В.А., Юрков А.К. Геофизические исследования в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, $M=5.8$) // Литосфера. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 432–448. – DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448. – EDN: FTZDMY

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

Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. – М.: ГИН АН СССР, 1987. – С. 173–235.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. – М.: ГЕОС, 2017. – 234 с.

Сигов А.П., Сигов В.А., Буданова Н.Н. и др. Новейшая тектоника Урала / Под ред. А.П. Сигова

- и В.А. Сигова (Материалы по металлогении Урала. Т. 5). — Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. — 106 с.
- Смыслов А.А., Гашева И.М., Богуславский Э.И., Борисова Г.П., Вайнблат А.Б. и др. Геотермическая карта России. М-б 10 000 000 / Гл. ред. А.А. Смыслов. — СПб.: ГНПП «Недра», 1995.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. В.И. Макаров. — М.: Научный Мир, 2005. — 400 с. — EDN: YTRXCS
- Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А., Володина Е.А., Мосейчук В.М. Землетрясения 2018 года в Катав-Ивановске (Южный Урал): кинематика инициирующих разрывов // Проблемы тектоники континентов и океанов: Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. — М.: ГЕОС, 2019. — С. 286–290. — EDN: FERDFR
- Тектоническая схема Северного, Среднего и северо-восточной части Южного Урала. М-б 1:2 500 000 / Ред. И.Д. Соболев // Геология СССР. Т. XII. Приложение. — М.: ВАТ, Мингеология СССР, 1968.
- Чиждова Н.Г., Стоянова С.Г. Морфоструктурная карта Урала: 1983. М-б 1:1 000 000 / Гл. ред. Н.Г. Чиждова. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1990. — 4 л.
- Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. Часть 2. Новейшая тектоника и рельеф Восточно-Европейской платформы (общие и частные вопросы) // Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — С. 145–222.
- Albarelo D. Short-term earthquake prediction and preparation / DPC-INGV-S3 Project. Final report. — 2013. — 31 p.
- Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily) // Applied Geochemistry. — 2001. — V. 16, N 1. — P. 1–17. — DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00015-9
- King C.Y. Radon monitoring for earthquake prediction in China // Earthquake Prediction Research. — 1985. — V. 3, N 1. — P. 47–68.
- Ramola R.C., Prasad Y., Prasad G., Kumar S., Choubey V.M. Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya // Applied Radiation and Isotopes. — 2008. — V. 66, N 10. — P. 1523–1530. — DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.04.006
- Utkin V.I., Tyagunov D.S., Belousova A.A., Balandin D.V. GPS-based study of geodynamics of the Northern and Middle Urals // Doklady Earth Sciences. — 2010. — V. 431, N 1. — P. 365–370. — DOI: 10.1134/S1028334X10030219. — EDN: MXCVRJ

Сведения об авторах

Макеев Владимир Михайлович, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: vmakeev@mail.ru

Пикулик Елена Александровна, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотр. ИГЭ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: elena_pikulik@bk.ru

Никитин Сергей Николаевич, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: niksn@ifz.ru

Коробова Ирина Валерьевна, ст. науч. сотр. ИГЭ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: irakorv@mail.ru

Modern geodynamic systems of the Urals in relation to seismicity

© 2023 ¹V.M. Makeev, ¹E.A. Pikulik, ²S.N. Nikitin, ¹I.V. Korobova

¹IEG RAS, Moscow, Russia; ²IPE RAS, Moscow, Russia

Received July 11, 2023

Abstract Modern geodynamic systems of the Urals are studied in connection with the uneven distribution of seismic activity. The neotectonic zoning and geodynamic conditions of its formation in the Southern and Middle Urals and adjacent platform territories were studied in connection with the Katav-Ivanovo medium-magnitude earthquake occurred in 2018. The epicenter was located outside the known zones of possible seismic sources, which required additional research to determine the causes of the earthquake. As a result of near-surface and deep research the Uraltau-Magnitogorsk and Osinsko-Bolsheusinskaya geodynamic systems have been established, which are the cause of the transverse segmentation of the Urals and, possibly, one of the factors of seismic activity. The geodynamic systems are inconsistently articulated with each other with the development of the Birsko-Karatau geodynamically active zone and the Katav-Satka interference zone. The earthquake is associated with the Katav-Satka interference zone. The interference zone has been investigated with respect to fracturing and slickenlines. Orientations of modern stresses induced from the active regions are estimated. Modern stresses are the reason for the activation of the Zilmerdak from the beginning of the Late Paleozoic overstep and, as a consequence, the Katav-Ivanov earthquake. Earthquakes caused the development of secondary dangerous seismogenic phenomena and deformation of buildings.

Keywords Neotectonic zoning, deep geodynamics, interference zone, geodynamically active zones, seismicity, mud slides.

For citation Makeev, V.M., Pikulik, E.A., Nikitin, S.N., & Korobova, I.V. (2023). [Modern geodynamic systems of the Urals in relation to seismicity]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(3), 83-98. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.06>. EDN: YZSNKL

References

- Aladinsky, P.I., Zolotoyev, K.K., Pervago, V.A., & Sidorenko, A.V. (Eds.). (1969). *Geologiya SSSR. T. XII. Permskaia, Sverdlovskaiia, Cheliabinskaiia i Kurganskaiia oblasti. Ch. 1 - Geologicheskoe opisaniie. Kn. 2* [Geology of the USSR. Vol. XII. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Part 1 - Geological description. Book 2]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 304 p. (In Russ.).
- Albarello, D. (2013). Short-term earthquake prediction and preparation. In *DPC-INGV-S3 Project. Final report*, 31 p.
- Aleinikov, A.L. (1989). [Study of the composition and dynamic conditions of the formation of the Earth's crust in the Middle Urals based on geophysical models. Dr. geol. and mineral. sci. diss.]. Sverdlovsk, Russia: SGI Publ., 34 p. (In Russ.). EDN: ZJFLJP
- Babak, V.I., Nikolaev, N.I., Bashilov, V.I. et al. (1980). *Karta geomorfologo-neotektonicheskogo raionirovaniia nechernozemnoi zony RSFSR (za isklucheniem gornoi chasti Urala, Zaural'ia i Kaliningradskoi oblasti). Masshtab 1:1500000* [Map of geomorphological-neotectonic zoning of the non-chernozem zone of the RSFSR (with the exception of the mountainous part of the Urals, Trans-Urals and Kaliningrad region). Scale 1:1 500 000]. Moscow, Russia: GUGK USSR Publ. (In Russ.).
- Bachmanov, D.M., Govorova, N.N., Skobelev, S.F., & Trifonov, V.G. (2001). [Neotectonics of the Urals (problems and solutions)]. *Geotektonika* [Geotectonics], 5, 61-75. (In Russ.).
- Bogdanov, A.A., & Khain, V.E. (Editors-in-chief). (1981). *Mezhdunarodnaja tektonicheskaja karta Evropy i smezhnykh oblastej. Masshtab 1:2500000. 2-e izd.* [International tectonic map of Europe and adjacent areas. Scale 1:2 500 000. 2nd edition]. Moscow, Russia: GUGK under the Council of Ministers of the USSR Publ. (In Russ.).
- Chizhova, N.G., & Stoyanova, S.G. (1990). *Morfostrukturnaja karta Urala: 1983. Masshtab 1:1000000. Gl. red. N.G. Chizhova* [Morphostructural map of the Urals: 1983. Scale 1:1 000 000. Editor-in-chief N.G. Chizhova]. Saint Petersburg, Russia: VSEGEI Publ., 4 sheets. (In Russ.).
- Druzhinin, V.S., Martyshko, P.S., Nachapkin, N.I., & Yusupov, V.Yu. (2014). *Stroenie verkhnei chasti*

- litosfery i neftegazonosnost' neдр Ural'skogo regiona* [The structure of the upper part of the lithosphere and the oil and gas potential of the bowels of the Ural region]. Ekaterinburg, Russia: IGF UB RAS Publ., 226 p. (In Russ.). EDN: XVTWKJ
- Dyagilev, R.A., Verkholantsev, F.G., Varlashova, Yu.V., Shulakov, D.Yu., Gabsatarova, I.P., & Epifanskiy, A.G. (2020). [Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018, mb=5.4 (Urals)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 7-20. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.01
- Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S., & Valenza, M. (2001). Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). *Applied Geochemistry*, 16(1), 1-17. DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00015-9
- Godzikovskaya, A.A. (2016). *Katalog seysmicheskikh sobytiy Ural'skogo regiona s drevneyshikh vremen po 2002 g. (Soputstvuyushchiye pervichnyye materialy)* [Catalog of seismic events in the Ural region from ancient times to 2002 (Associated primary materials)]. Moscow, Russia: IPE RAS, 258 p. (In Russ.).
- Kashubin, S.N., Druzhinin, V.S., Gulyaev, A.N., Kusonky, O.A., Lomakin, V.S., Malovichko, A.A. et al. (2001). *Seismichnost' i seismicheskoe rajonirovanie Ural'skogo regiona* [Seismicity and seismic zoning of the Ural region]. Ekaterinburg, Russia: IG UB RAS Publ., 126 p. (In Russ.). EDN: WYGEUX
- King, C.Y. (1985). Radon monitoring for earthquake prediction in China. *Earthquake Prediction Research*, 3(1), 47-68.
- Knyazev, Yu.G., Knyazeva, O.Yu., Snachev, V.I., Zhdanov, A.V., Karimov, T.R. et al. (2013). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF (3-e pokolenie). Masshtab 1:1000000. Ser. Ural'skaya. N-40-Ufa. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation (3rd generation). Scale 1:1 000 000. Ural series. N-40-Ufa. Explanatory letter]. Saint Petersburg, Russia: VSEGEI Publ., 512 p. (In Russ.).
- Kopp, M.L. (2004). [Mobilistic neotectonics of the platforms of Southeast Europe]. *Trudy Geologicheskogo Instituta* [Proceedings of the Geological Institute], 552, 1-340. (In Russ.). EDN: XZEXHN
- Kusonsky, O.A., & Bebnev, A.S. (2018). [Seismic and gravimetric data of earthquakes that occurred in the Chelyabinsk region on September 5 and 29, 2018]. *Ural'skij geofizicheskij vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], 4(34), 26-35. (In Russ.). EDN: YSAZZZ
- Makarov, V.I. (Ed.). (2005). *Sovremennaya geodinamika oblastey vnutrikontinental'nogo kollizionnogo gorobrazovaniya (Central'naya Azija)* [Modern geodynamics of areas of intracontinental collisional mountain building (Central Asia)]. Moscow, Russia: Nauchnyj Mir Publ., 400 p. (In Russ.). EDN: YTRXCJ
- Makeev, V.A., Korobova, I.V., Nikitin, S.N., & Sukhanova, T.V. (2019). [Neotectonics, geodynamics and seismicity of the Katav-Satka interference zone of the Urals]. In *Sergeevskie chteniia: Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoeologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii. Vyp. 21. Red. V.I. Osipov, N.G. Maksimovich, A.A. Bariakh, E.V. Buldakova i dr.* [Sergeyev Readings: Materials of the annual session of the Scientific Council of the RAS on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Iss. 21. Eds. V.I. Osipov, N.G. Maksimovich, A.A. Bariakh, E.V. Buldakova et al.] (pp. 448-453). Perm, Russia: PSU Publ. (In Russ.). EDN: ZCOZTV
- Makeev, V.M., Nikitin, S.N., Shilina, G.V., & Pustovalov, N.A. (2018). [The Ust'-Katav earthquake is the result of a superposition of heterogeneous geodynamic conditions]. In *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniia klimata – GEORISK-2018: Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. T. 2. Otv. red. N.G. Mavlyanova* [Analysis, forecast and management of natural risks taking into account global climate change – GEORISK-2018: Materials of the X International Scientific and Practical Conference. Vol. 2. Ed. N.G. Mavlyanova] (p. 400). Moscow, Russia: RUDN University Publ. (In Russ.). EDN: YNHZUL
- Ovcharenko, A.V., Davydov, V.A., Shchapov, V.A., & Yurkov, A.K. (2020). [Geophysical study of the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018, M5.8)]. *Litosfera* [Lithosphere (Russia)], 20(3), 432-440. (In Russ.). DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448. EDN: FTZDMY
- Puchkov, V.N. (2010). [Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, Russia: *DizajnPoligrafServis*, 280 p. (In Russ.). EDN: SMDNVH
- Ramola, R.C., Prasad, Y., Prasad, G., Kumar, S., & Choubey, V.M. (2008). Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(10), 1523-1530. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.04.006
- Rastsvetaev, L.M. (1987). [Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic faults]. In *Problemy strukturnoj geologii i fiziki tektonicheskikh processov. Ch. 2* [Problems of structural geology and physics of tectonic processes. Iss. 2] (pp. 173-235). Moscow, Russia: GIN AS USSR Publ. (In Russ.).
- Rebetsky, Yu.L., Sim, L.A., & Marinin, A.V. (2017). *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim naprjazheniyam. Metody i algoritmy* [From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 234 p. (In Russ.).
- Sigov, A.P., Sigov, V.A., Budanova, N.N. et al. (1975). *Novejshaya tektonika Urala. Pod red. A.P. Sigova i V.A. Sigova (Materialy po metallogenii Urala. T. 5)*

[The latest tectonics of the Urals. Eds. A.P. Sigov & V.A. Sigov (Materials on metallogeny of the Urals, vol. 5)]. Saratov, Russia: Saratov University Publ., 106 p. (In Russ.).

Smyslov, A.A., Gasheva, I.M., Boguslavsky, E.I., Borissova, G.P., Vainblat, A.B. et al. (1995). *Geotermicheskaia karta Rossii. Masshtab 10000000. Gl. red. A.A. Smyslov* [Geothermal map of Russia. Scale 10 000 000. Editor-in-chief A.A. Smyslov]. Saint-Petersburg, Russia: Nedra Publ. (In Russ.).

Sobolev, I.D. (Ed.). (1968). [Tectonic scheme of the Northern, Middle and northeastern parts of the Southern Urals. Scale 1:2 500 000]. In *Geologija SSSR. T. XII. Prilozhenie* [Geology of the USSR. Vol. XII. Application]. Moscow, Russia: VAT, Ministry of Geology of the USSR Publ. (In Russ.).

Tevelev, A.I., Tevelev, Ark.V., Khotylev, A.O., Prudnikov, I.A., Volodina, E.A., & Moseychuk, V.M. (2019). [Earthquakes in 2018 in Katav-Ivanovsk (Southern Urals): kinematics of initiating ruptures].

In *Problemy tektoniki kontinentov i okeanov: Materialy LI Tektonicheskogo soveshhanija. T. 2* [Problems of tectonics of continents and oceans: Proceedings of the LI Tectonic Conference. Vol. 2] (pp. 286-290). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.). EDN: FERDFR

Utkin, V.I., Tyagunov, D.S., Belousova, A.A., & Balandin, D.V. (2010). GPS-based study of geodynamics of the Northern and Middle Urals. *Doklady Earth Sciences*, 431(1), 365-370. DOI: 10.1134/S1028334X10030219. EDN: MXCVRJ

Yudakhin, F.N., Shchukin, Yu.K., & Makarov, V.I. (2003). [Part 2. Recent tectonics and relief of the East European Platform (general and particular issues)]. In *Glubinnoe stroenie i sovremennye geodinamicheskie protsessy v litosfere Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European Platform] (pp. 145-222). Ekaterinburg, Russia: UB RAS Publ. (In Russ.). EDN: HQTYKD

Information about authors

Makeev Vladimir Mikhailovich, PhD, Top Manager of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience (IEG RAS), Moscow, Russia. E-mail: vmakeev@mail.ru

Pikulik Elena Aleksandrovna, PhD, Senior Researcher of the IEG RAS, Moscow, Russia. E-mail: elena_pikulik@bk.ru

Nikitin Sergey Nikolaevich, Senior Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: niksn@ifz.ru

Korobova Irina Valeryevna, Senior Researcher of the IEG RAS, Moscow, Russia. E-mail: irakorv@mail.ru