

Геофизические исследования в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, M5.8)

А. В. Овчаренко, В. А. Давыдов, В. А. Щапов, А. К. Юрков

Институт геофизики Уральского отделения РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
e-mail: ark-ovcharenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.09.2019 г., принята к печати 19.11.2019 г.

Объект исследований. Изучалась эпицентральной область Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, M5.8), которое оказалось самым сильным на Урале за весь период инструментальных наблюдений. Исследовались характер проявления на поверхности главного толчка, развитие во времени очаговой зоны, глубинное строение района, а также геодинамические характеристики. **Материалы и методы.** Применялись методы анализа сейсмического каталога, дистанционных и архивных геофизических данных, аудиоманнитное теллурическое зондирование, магнитная съемка для изучения характера вековых вариаций магнитного поля и проявления разрывной тектоники, мониторинг гравитационного поля для оценки скорости быстрых современных вертикальных движений, мониторинг температуры воды в скважине на глубине 100 м. Целевая обработка и переинтерпретация архивных данных гравиметрии и магнитометрии были направлены на выявление линеаментных систем и уточнение разрывных нарушений. **Результаты.** Показано, что землетрясение возникло в области пониженной раздробленности геологической среды и сопровождалось закономерным уменьшением и исчезновением за 36 лет локальной аномалии магнитного поля в 300 нТл. За один год до события отмечалось длительное увеличение числа слабых землетрясений (R 500 км), затем в первой половине 2018 г. отмечалось небольшое затишье. Накануне, за два месяца до события, наблюдался рост сейсмической активности, а за один месяц – новое короткое сейсмическое затишье. Наконец, в сентябре зарегистрирован основной толчок, за которым последовал рой событий, среди которых было три с магнитудой, превышающей 4 ед. В настоящее время сейсмический режим стабилизировался на уровне многолетних средних показателей. Отмечается возрастание температуры подземных вод со скоростью 0.02°C в месяц. **Выводы.** Повышение глубинной температуры способствовало размагничиванию магнитной неоднородности и увеличению, дополнительно к тектоническим напряжениям, температурных напряжений в земной коре, которые совместно обусловили сейсмическое событие.

Ключевые слова: эпицентр, магнитуда 5.8, сейсмический рой, грязевой оползень, трещины отрыва, аномалии магнитные, рост температуры, линеаменты, анализ

Источник финансирования

Работа выполнена по просьбе МЧС и муниципального руководства Катав-Ивановского района Челябинской области.

Geophysical study of the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018, M5.8)

Arkadii V. Ovcharenko, Vadim A. Davydov, Vladislav A. Shchapov, Anatolii K. Yurkov

Institute of Geophysics of the Ural branch of the RAS, 100 Amundsen st., Yekaterinburg 620016, Russia,
e-mail: ark-ovcharenko@yandex.ru

Received 06.09.2019, accepted 19.11.2019

Resarch subject. To investigate the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018, M5.8), which has so far been the strongest seismic event in the Urals during the entire period of instrumental observations. The surface manifestation of the main earthquake shock, the development of the focal zone in time, as well as the deep structure and geodynamic characteristics of the area, were studied. **Materials and methods.** The methods of seismic catalog analysis and remote and archive geophysical data study were applied. The nature of centurial variations in the level of magnetic field and the manifestation of fault tectonics was studied using audio magnetic-telluric sounding (AMTS). The speed of mod-

Для цитирования: Овчаренко А.В., Давыдов В.А., Щапов В.А., Юрков А.К. (2020) Геофизические исследования в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (05.09.2018, M5.8). *Литосфера*, **20**(3), 432–448. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448

For citation: 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*, **20**(3), 432–448. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448

ern vertical movements was assessed by monitoring the gravitational field. The temperature of water in the well at a depth of 100 m was monitored. The processing and re-interpretation of archival gravimetry and magnetometry data was aimed at identifying lineament systems and clarifying disruptive faults. *Results.* It is shown that the earthquake occurred in the area of reduced fragmentation of the geological environment and was accompanied by a natural decrease and disappearance of the local magnetic field anomaly of 300 nTl in 36 years. One year before the event, a prolonged increase in the number of weak earthquakes (R 500 km) was observed, followed by a slight levelling-off in the first half of 2018. Two months before the event, an increase in seismic activity was noted again followed by a slump one month before the event. In September, the main shock was registered, followed by a swarm of seismic events. Among the latter, there were 3 with a magnitude exceeding 4. At present, the seismic regime has stabilized at the long-term average level. An increase in the groundwater temperature at a rate of 0.02 °C per month is currently observed. *Conclusions.* An increase in the deep-ground temperature contributed to the demagnetization of magnetic inhomogeneity, as well as to an increase in (in addition to tectonic stresses) temperature stresses in the earth's crust, which jointly caused the seismic event.

Keywords: epicenter, magnitude 5.8, seismic swarm, mudslide, separation cracks, magnetic anomalies, temperature rise, lineaments, analysis

Funding information

The work was performed at the request of the Ministry of emergency situations and the municipal administration of the Katav-Ivanovsky district of the Chelyabinsk region.

Acknowledgements

We express our gratitude to S.A. Zakharov, A.I. Reshetov, R.A. Diaghilev, V.Yu. Verkholtantsev and O.A. Kusonskii for their assistance in carrying out this research.

ВВЕДЕНИЕ

Катав-Ивановское землетрясение (05.09.2018, M5.8/5.4) является самым сильным за всю историю инструментальных сейсмических наблюдений на Урале. Все исследователи сейсмичности Урала признают (Кашубин и др., 2001; Землетрясения и микросейсмичность..., 2007), что данное событие по характеру существенно отличается от прочих уральских землетрясений. Наличие продолжительного роя афтершоков, среди которых было три с магнитудой более 4.0, возникновение грязевого оползня ($780 \times (100-120 \text{ м})$) в эпицентральной области, нарушение гидрогеологического режима и рост температуры подземных вод в эпицентральной области свидетельствуют об активизации сейсмического режима на значительной территории, чего ранее на Урале не наблюдалось. По данным обсерватории Арти (устное сообщение О.А. Кусонского, 2018 г.), афтершоки, кроме компактного роя в эпицентральной области, отмечались на западе в виде двух полос на расстоянии до 80 км. Изучение одиночных землетрясений ($M < 5$), которые происходят на Урале довольно редко, ограничивалось ранее определением координат события, реже – построением карты изосейст (Вейс-Ксенофонтowa, Попов, 1940).

Возникновению главного события предшествовал период двукратного усиления сейсмической активности в 2017 г. Ранее, в 2006 г., в этом райо-

не произошли два слабых сейсмических события. В 2000 г., по сообщению одной из местных жительниц (ст. Минка, 22 км от места события 2018 г., отсутствие теплоцентралей и тепловых сетей), подвал ее дома был залит горячей водой с температурой 56°C. Таким явлениям долгое время не придавалось серьезного значения.

Программа исследований в эпицентральной зоне Катав-Ивановского землетрясения включала в себя (Шебалин, 1989):

- анализ сейсмического каталога и оперативно-го каталога эпицентральной области;
- обработку и анализ архивных геофизических и геологических данных;
- выполнение новых геофизических измерений и некоторых видов геодинамического мониторинга.

Использованы региональный Уральский сейсмический каталог, данные обсерватории Арти, каталог KNDC (2012–2019 гг.) и оперативный каталог эпицентральной области, любезно предоставленный сотрудниками Горного института Пермского научного центра УрО РАН Р.А. Дягилевым и В.Ю. Верхованцевым. При целевой обработке архивных геофизических данных использованы цифровые модели гравитационного, магнитного поля для нескольких эпох из базы данных геополей Уральского региона (Овчаренко, 1998), цифровая модель рельефа местности SRTM2 (Shuttle radar...), геологическая карта (Князев и др., 2013) и некоторые другие вспомогательные материалы.



Рис. 1. Открытые протяженные трещины растяжения в левом борту оползня в 30 м от зоны отрыва. Фото А.В. Овчаренко, 2018 г.

Fig. 1. Open extended tensile cracks in the left side of the landslide 30 m from the separation zone. Photo by A.V. Ovcharenko, 2018.

В эпицентральной области впервые на данной территории выполнены профильные измерения методом аудимагнитотеллурического зондирования (Давыдов, 2015), магнитная съемка по пунктам изучения векового хода, а также профильные измерения модуля магнитной индукции по интерпретационному профилю. Ранее проведено картирование грязевого оползня (Овчаренко и др., 2019). В небольших объемах выполнялся мониторинг гравитационного поля для оценки скорости современных вертикальных движений. Следует отметить, что визуальные и дистанционные наблюдения в эпицентральной области существенно затруднены сложными горно-таежными условиями и большим слоем (до 3 м и более) почвы и коры выветривания. Еще более сложными эти наблюдения становятся в зимний период из-за мощного снегового покрова.

На рис. 1–3 показаны трещины растяжения, обнаруженные при визуальном обследовании эпицентральной зоны и оползня. Следует указать, что зона севернее дороги Катав-Ивановск – Карауловка осталась практически не изучена на местности, поскольку, как уже указано, представляет труднопроходимую в осенний и зимний периоды горную тайгу.

ОБРАБОТКА АРХИВНЫХ ДАННЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ И РЕЛЬЕФА

При изучении эпицентральной области землетрясения использовались архивные данные среднемасштабных гравиметрической и магнитных съемок из созданной ранее базы данных (Овчаренко, 1995а), а также числовая модель рельефа SRTM2 (Shuttle radar...). По фрагментам этих баз данных выполнены целевые трансформации для выявления линейментных систем (Тяпкин, 1986; Нусипов, Овчаренко, 1997). Линеаментные системы сопоставлялись с геологическими разломами, показанными (см. рис. 1–3) на геологической карте (Князев и др., 2013). Выявленные линеаменты рельефа и геофизических полей системно более полные и протяженные, чем собственно геологические разломы.

На рис. 4 хорошо дешифрируются линеаменты различных направлений, в том числе совпадающие по направлению с напряжениями растяжения ($AZ = 137\text{--}153^\circ$) по данным механизма очага ФИЦ ЕГС РАН 2018 г.

Учитывая плохую обнаженность территории, препятствующую детальному геологическому кар-



Рис. 2. Открытые трещины в левом борту оползня. Фото А.В. Овчаренко, 2018 г.

Fig. 2. Open cracks in the left side of the landslide. Photo by A.V. Ovcharenko, 2018.



Рис. 3. Высокие уступы (3 м и более) в правом борту средней части оползня. Фото А.В. Овчаренко, 2018 г.

Fig. 3. High ledges (3 m or more) in the right side of the middle part of the landslide. Photo by A.V. Ovcharenko, 2018.

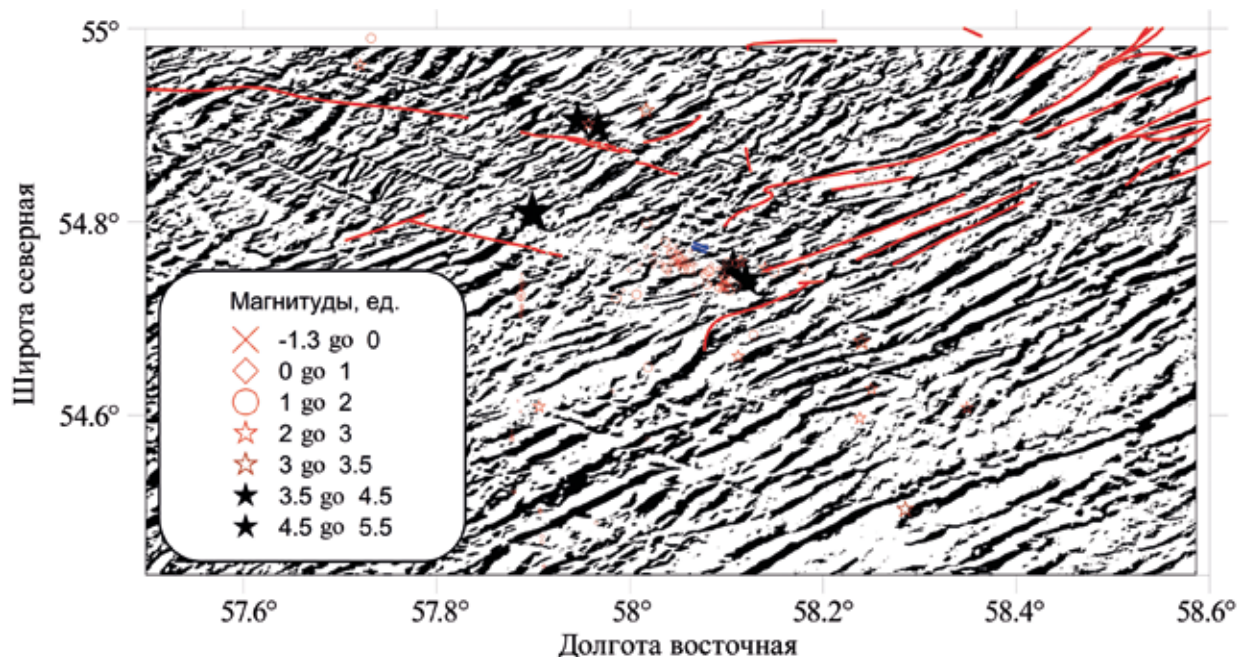


Рис. 4. Выявление линейментных систем по модели рельефа SRTM2.

Тонкими красными линиями показаны разломы по геологическим данным. Значками отмечены сейсмические события из эпицентрального каталога ГИ ПНЦ УрО РАН, дополненного данными обсерватории Арти. Синие стрелки обозначают направление движений в момент землетрясения, по данным механизма очага (ГС РАН).

Fig. 4. The identifying lineament systems on the model of the terrain SRTM2.

Thin red lines show faults from geological data. Icons are shown for seismic events from the epicentral catalogue GI PNC RAS UD. Blue arrows – the direction of movement at the time of the earthquake, according to the mechanism of the hearth.

тированию, вполне можно трассировать многие разломы на участках, продолжающих их линеймент, а главное, выделить новые разломы, которые отсутствуют на геологической карте. Особое значение имеет такой анализ в эпицентральной области основного землетрясения.

Заметное различие в структуре линейментных систем гравитационного, магнитного полей и рельефа мы объясняем различной глубиной тектонических структур, которые отображаются этими полями (Овчаренко, 1995б). Самые глубокие линейменты выражены на трансформанте гравитационного поля, менее глубокие – на трансформанте магнитного поля, самые поверхностные – на трансформанте рельефа. При этом наблюдается некоторое укрупнение линейных элементов с глубиной. Естественно, что наибольшая корреляция с геологическими разломами отмечается для приповерхностных линеймент рельефа.

В области главного сейсмического события сходятся линейменты северо-восточного и северо-западного простирания, которые образуют сложную субмеридиональную “лестничную” зону (рис. 4–6). Размер этой зоны примерно 11 × 20 км. События сейсмического роя и отдельные рассеянные события приурочены, как правило, к концевым

участкам линеймент и блокам с меньшей раздробленностью.

Анализ приуроченности сейсмических событий к геологическим особенностям района (рис. 7) показывает, что основное событие и афтершоки произошли в области, где не были картированы геологические разломы и простирание геологических свит резко меняется с СВ–В на СЗ. В этой области выделены линейменты СВ и СЗ простирания, которые пересекаются между собой, образуя субмеридиональную зону. Вероятно, эта зона оказалась наименее нарушена и именно в ней накапливались наибольшие упругие деформации. Характер смещений в эпицентральной зоне, судя по механизму очага, является ортогональным к многолетним региональным смещениям по данным GPS-мониторинга. Стоит отметить, что детальность сети GPS-мониторинга в этом районе крайне недостаточна, чтобы достоверно выявить аномальность эпицентрального участка по полю векторов смещений. Ближайшие пункты региональной сети GPS расположены в Миассе, Аргаяше, Верхнем Уфалее и Арти (рис. 8) (Овчаренко, Баландин, 2009).

Аномальность эпицентральной зоны наиболее ярко проявилась в магнитном поле. На рис. 9 показана карта модуля магнитной индукции на

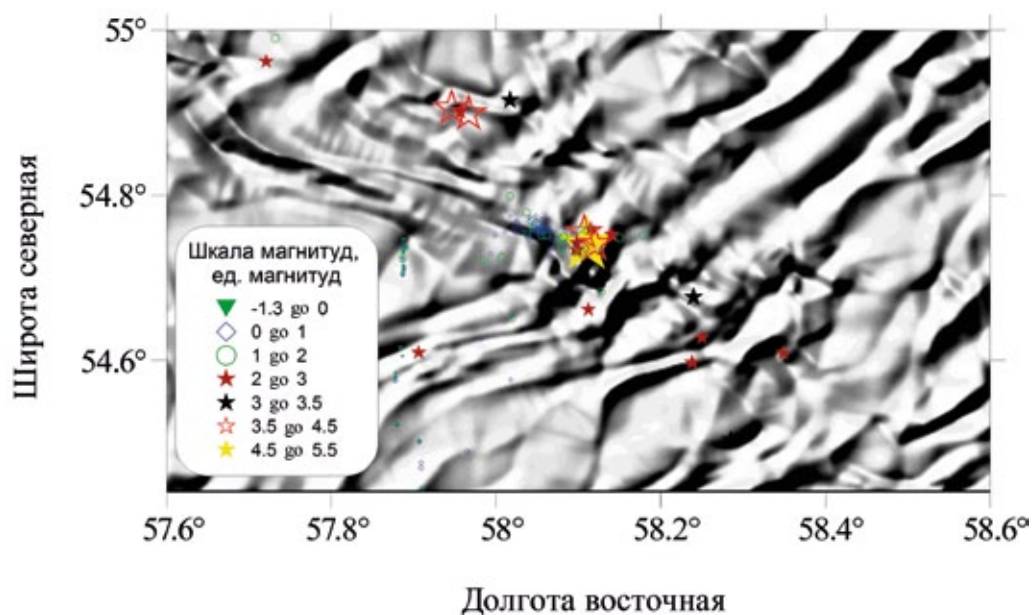


Рис. 5. Выявление линеamentных систем по гравитационному полю.

Землетрясения по локальному каталогу ГИ ПНЦ УрО РАН.

Fig. 5. Identification of lineament systems by gravitational field.

Earthquakes in a local directory GI PNC RAS UD.

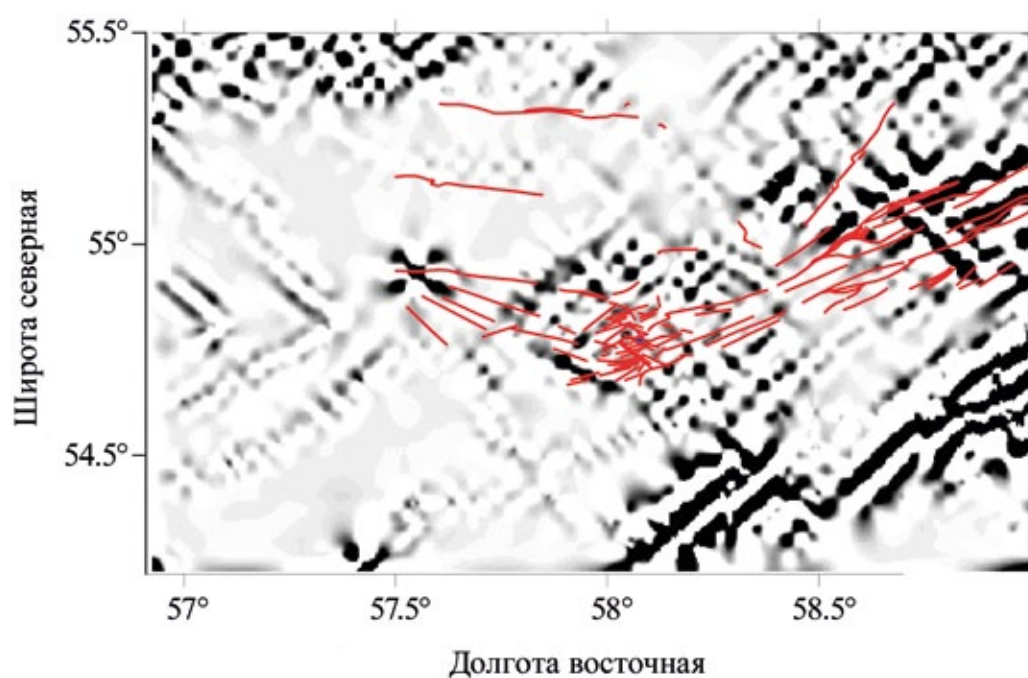


Рис. 6. Выявление линеamentных систем по магнитному полю.

Тонкими красными линиями показаны разломы по геологическим данным. В эпицентральной области дополнены дешифрированием линеament рельефа.

Fig. 6. Detection of lineament systems by magnetic field.

Thin red lines show faults from geological data. In the epicentral region are supplemented by decoding the lineaments of the relief.

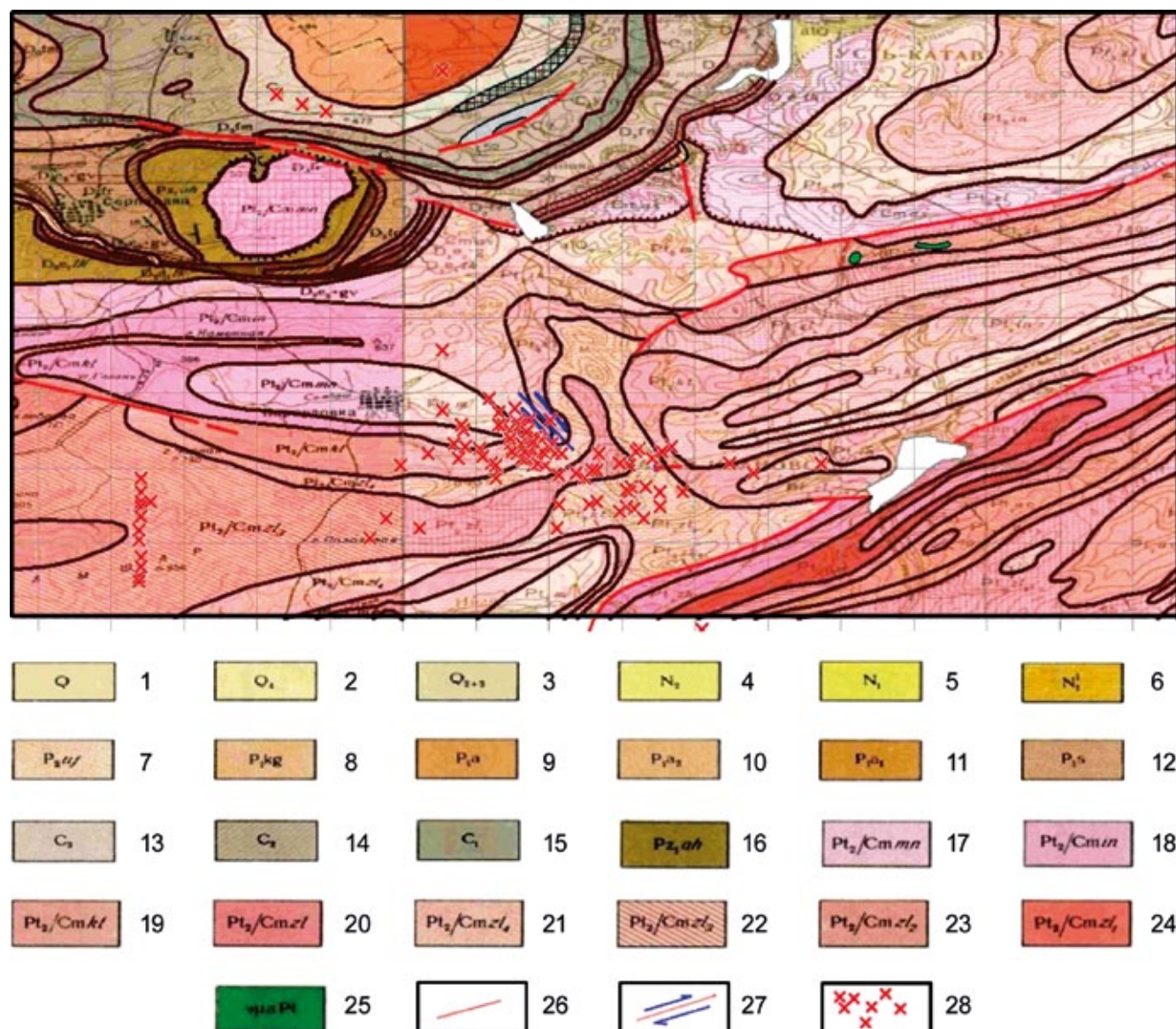


Рис. 7. Геологическая карта (Князев и др., 2013), разломы и сейсмический рой в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения.

1–3 – четвертичные отложения нерасчлененные: 1 – аллювиальные пески, галечники и суглинки; 2 – современный отдел – пески галечники и суглинки; 3 – средний и верхний отделы объединенные – пески, глины и галечники; 4–6 – третичная система: 4 – плиоцен – пески, глины и галечники; 5 – миоцен – пески, глины и галечники; 6 – нижний миоцен – пески, глины и галечники; 7–12 – пермская система: 7 – уфимская свита – песчаники, глины, мергели, конгломераты; 8 – кунгурский ярус – гипсы, ангидриты, известняки, марганцевые руды; 9 – артинский ярус – известняки, доломиты, песчаники, фосфориты; 10 – верхнеартинский подъярус – известняки, доломиты, песчаники; 11 – нижнеартинский подъярус – известняки, доломиты, глины, песчаники, сланцы; 12 – сакмарский ярус – известняки, доломиты, глины, песчаники, сланцы; 13–15 – каменноугольная система: 13 – верхний отдел – известняки, доломиты, кремнисто-глинистые сланцы; 14 – средний отдел, башкирский и московский ярусы объединенные – известняки и прослои доломитов; 15 – нижний отдел – турнейский, визейский и намюрский ярусы объединенные; 16 – нижний палеозой, ашинская свита – песчаники, алевролиты, сланцы; 17–24 – верхний протерозой или кембрий: 17 – миньярская свита – известняки и доломиты с единичными прослоями песчаников и глинистых сланцев; 18 – инзерская свита – переслаивание песчаников, алевролитов и глинистых сланцев; 19 – катавская свита – известняки, мергели, прослои глинистых сланцев; 20 – нерасчлененные отложения зильмердакской свиты – песчаники, алевролиты, глинистые сланцы; 21 – бедярышинская подсвита – песчаники, глинистые сланцы; 22 – лемезинская подсвита – песчаники; 23 – нугушская подсвита – песчаники, сланцы; 24 – бирьянская подсвита – песчаники, мелкогалечные конгломераты; 25 – диабазы допалеозойского интрузивного цикла; 26 – разломы по геологическим данным; 27 – правостороннее смещение по плоскости разрыва (по данным механизма очага землетрясения ГС РАН и NEIS); 28 – сейсмические события сентября–декабря 2018 г. без различия магнитуд.

Fig. 7. Geological map (Knyazev et al., 2013), the faults and swarm the epicenters of the Katav-Ivanovsk earthquake.

1–3 – Quaternary system: 1 – undismembered alluvial sands; 2 – Modern department – sands, pebbles and loams; 3 – Middle and Upper division association – sands, clays and pebbles; 4–6 – Tertiary system: Pliocene – sands, clays and pebbles; 5 – Miocene – sands, clays and pebbles; 6 – Lower Miocene – sands, clays and pebbles; 7–12 – Perm system: 7 – Ufa Formation – sandstones, clays, marls, conglomerates; 8 – Kungur stage – gypsum, anhydrite, limestone, manganese ore; 9 – Arti stage – limestone, dolomites, sandstones, phosphorites; 10 – Verkhnearti substage – limestones, dolomite, sandstones; 11 – Lower Arti substage – limestone, dolomites, clays, sandstones, shale; 12 – Sakmara stage – limestone, dolomites, clays, sandstones, shale; 13–15 – Carboniferous system: 13 – Upper division – limestone, dolomites, siliceous-clay shales; 14 – Middle division, Bashkirian and Moscow stages united – limestone and dolomite layers; 15 – Lower division, Turnean, Visian and Namurian stages united; 16 – Lower Paleozoic, Asha Formation – sandstones, aleurolites, shales; 17–24 – Upper Proterozoic or Cambrian: 17 – Minyar Formation – limestone and dolomites with single interlayers of sandstones and clay shale; 18 – Inzer Formation – interlayer sandstones, aleurolites and clay shale; 19 – Katav Formation – limestone, marbles, layers of clay shale; 20 – Zilmerdak Formation – sandstones, aleurolites, clay shale; 21 – Bed'yarysh subformation – sandstones, clay slates; 22 – Lemezinsk subformation – sandstones; 23 – Nugush subformation – sandstones, slates; 24 – Biryas subformation – sandstones, conglomerates; 25 – Diabases of Prepaleozoic intrusive cycle; 26 – faults according to geological data; 27 – right-hand displacement along the fracture plane (according to the earthquake focus mechanism of the GS RAS and NEIS); 28 – seismic events of September–December 2018 without distinction of magnitudes.

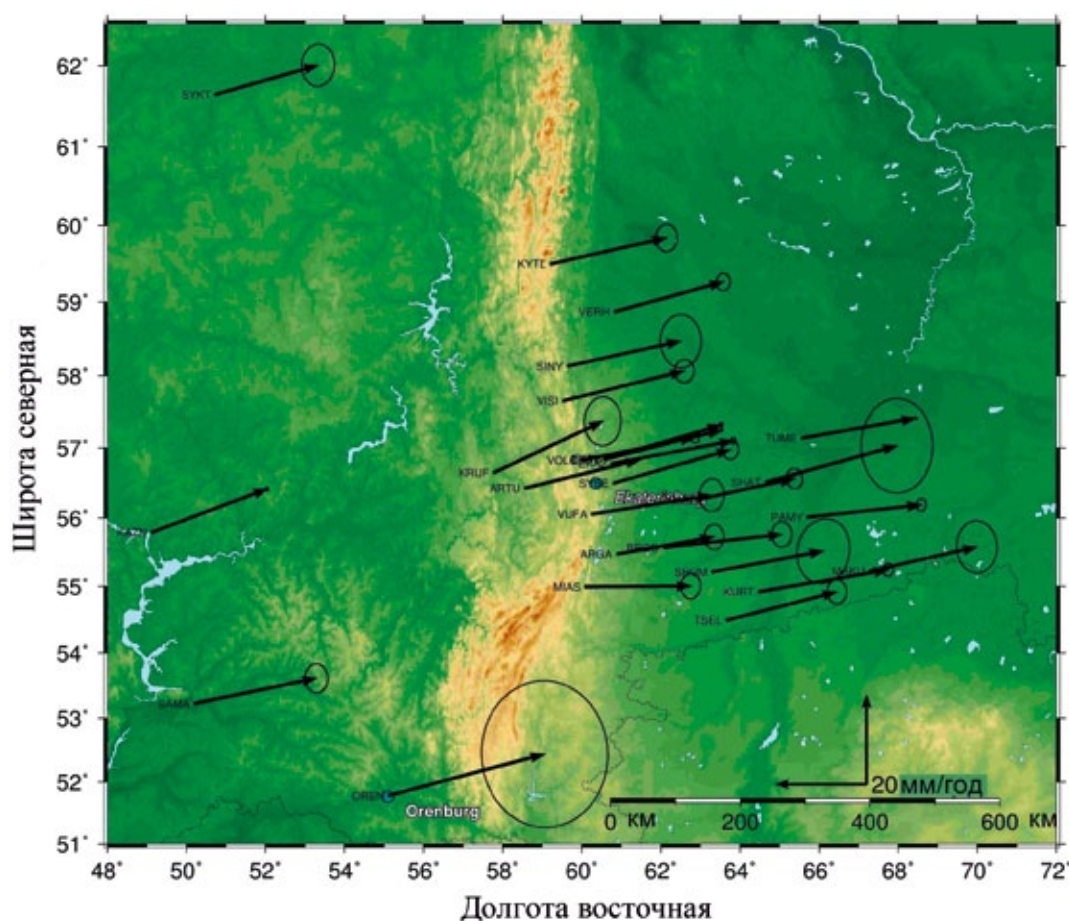


Рис. 8. Векторы скоростей современных горизонтальных движений Урала по данным многолетних наблюдений GPS (Овчаренко, Баландин, 2009).

Временные и постоянные станции мониторинга GPS/Glonass: oren – Оренбург, sama – Самара, tsel – Целинное, mias – Миасс, shum – Шумиха, kurt – Куртамыш, maku – Макушино, arga – Аргаяш, kazn – Казань, brod – Бродокалмак, pamy – Памятное, vufa – Верхний Уфалей, shat – Шатрово, artu – Арти, syse – Сысерть, kruf – Красноуфимск, volch – г. Волчиха, eka2 – Екатеринбург, tume – Тюмень, visi – Висим, siny – г. Синячиха, verh – Верхотурье, kytl – Кытлым, sykt – Сыктывкар.

Fig. 8. Velocity vectors of modern horizontal movements of the Urals according to long-term GPS observations (Ovcharenko, Balandin, 2009).

The temporary and permanent GPS/Glonass monitoring stations: oren – Orenburg, sama – Samara, tsel – Celinnyi, mias – Miass, shum – Shumicha, kurt – Kurtamysh, maku – Makushino, Arga – Arghayash, kazn – Kazan', brod – Brodokalmak, pamy – Pamyatnoe, vufa – Verkhniy Ufalei, shat – Shatrovo, artu – Arti, syse – Sysert, kruf – Krasnoufimsk, volch – Gora Volchikh, eka2 – Ekaterinburg, tume – Tyumen', visi – Visim, siny – Gora Sinyachikha, verh – Verkhotur'e, kytl – Kytlym, sykt – Syktyvkar.

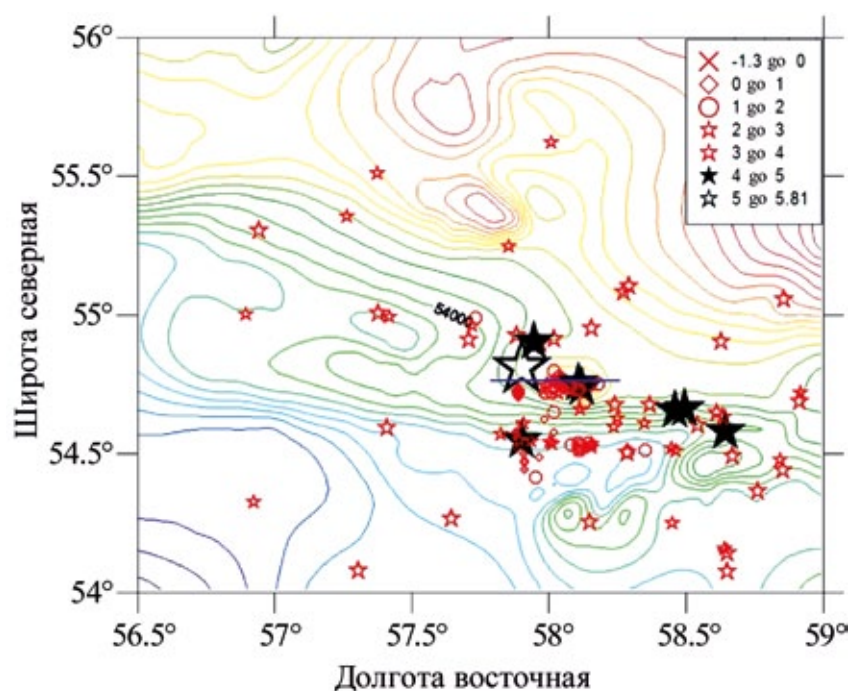


Рис. 9. Карта модуля магнитной индукции на эпоху 1964 г. и сейсмический рой в эпицентральной зоне. Синяя линия – интерпретационный профиль магнитного поля.

Fig. 9. Map of the magnetic induction module for the epoch of 1964 and seismic swarm in the epicenter zone. Blue line – interpretation magnetic field profile.

эпоху 1964 г. Эпицентральной области землетрясения соответствует магнитная аномалия интенсивностью порядка 300 нТл. Анализ аналогичных карт для эпох 1960, 1964, 1974, 1980 и 2018 гг. указывает на закономерное изменение локальной магнитной аномалии модуля магнитной индукции в данном районе, которое в целом соответствует модели IGRF, но имеет гораздо более значительные градиенты (см. рис. 10). Измерения на эпоху 2019 г., выполненные в 29 пунктах изучения векового хода и нескольких тысячах пунктов профильных наблюдений вокруг оползня, показывают практически полное отсутствие локальной магнитной аномалии в эпицентральной области. Мы объясняем это аномальным повышением температуры в очаге на глубине 10 км. В настоящее время в эпицентральной области модуль магнитной индукции имеет структуру, близкую к нормальному полю с несколько пониженным (на 300 нТл) уровнем и незначительными локальными аномалиями (рис. 10–12).

Магнитотеллурические зондирования

Аудиомагнитотеллурические (АМТ) зондирования (АМТЗ) относятся к высокочастотному варианту метода магнитотеллурических зондирований (МТЗ). Специфика их развития обусловлена средней глубиной и относительно сильным

влиянием промышленных помех. Полевые исследования проводились приемно-регистрирующей аппаратурой ОМАР-2м, разработанной в Институте геофизики УрО РАН (Давыдов, 2015). Аппаратура обеспечивает усиление, аналого-цифровое преобразование и запись широкополосных геофизических сигналов в реальном масштабе времени.

Регистрация проводилась в частотном диапазоне 1–24 000 Гц по методике изучения продольного импеданса среды с измерением ортогональных компонент естественного электромагнитного поля H_x и E_y . Глубина исследований, которая зависит от удельного электрического сопротивления среды, в нашем случае составила от 2 до 4 км. Для решения оперативных задач достаточно получения импеданса в одном направлении (по линии профиля). Данная технология является довольно распространенной, например, при поисках подземных термальных вод (Blake et al., 2015). Магнитная компонента H_x измерялась с помощью активного индукционного датчика АМДФ-70 с линеаризованной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и изменяемой чувствительностью (5–70 В × м/А). Электрическая составляющая E_y снималась с 20-метровой заземленной линии, протягиваемой вдоль профиля. Время наблюдения на одной точке составляло 15–20 мин, в течение которых велась непрерывная запись усиленных и оцифрованных компонент H_x и E_y в специализи-

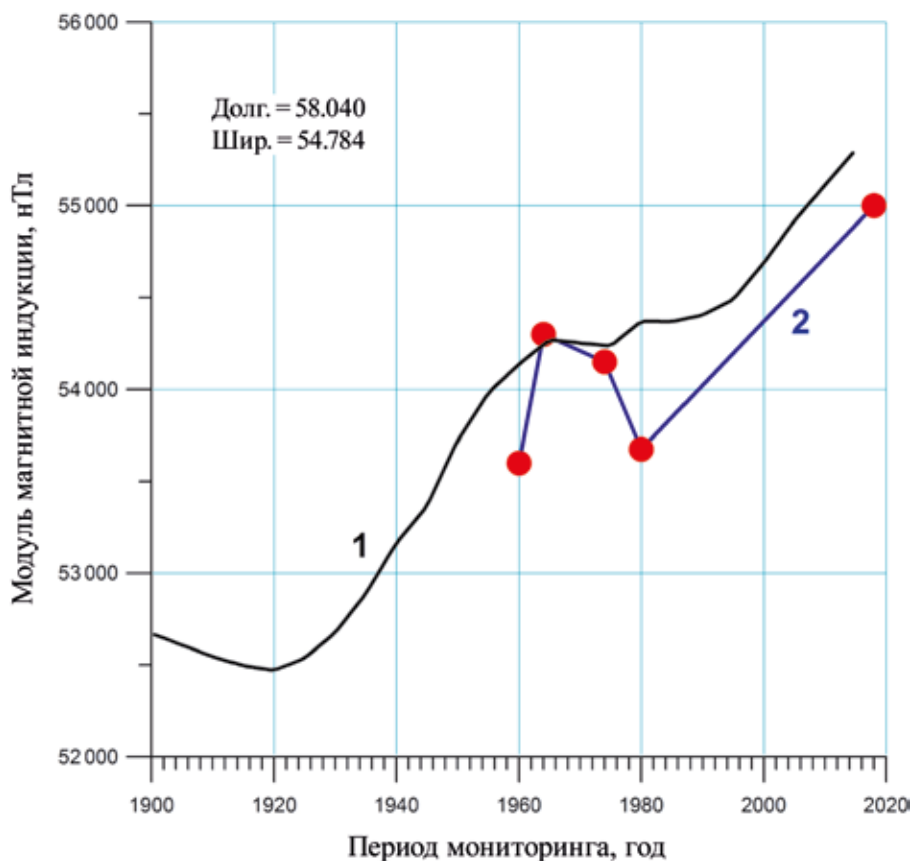


Рис. 10. Исчезновение аномалии векового хода модуля магнитной индукции в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения.

1 – спутниковая модель геомагнитного поля IGRF, 2 – фактические аэромагнитные (до 2018 г.) и наземные (2018 г.) наблюдения.

Fig. 10. The disappearance of the anomalies century the progress of the module of magnetic induction in the epicentral area of Katav-Ivanovskoe earthquake.

1 – satellite geomagnetic field model IGRF, 2 – actual aeromagnetic (to 2018) and ground (2018) monitoring.

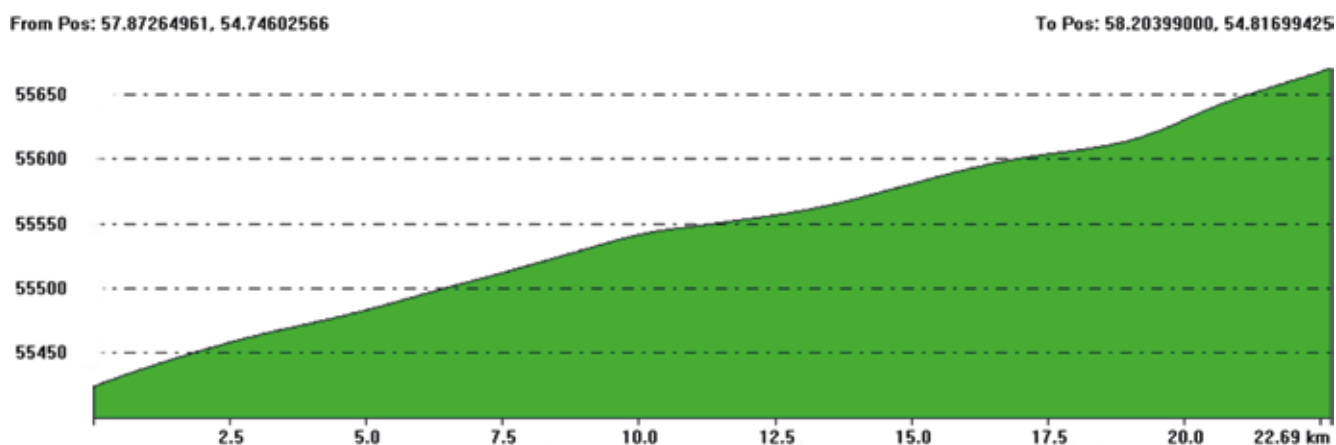


Рис. 11. Отсутствие аномалии модуля магнитной индукции в эпицентральной зоне по измерениям на пунктах ПВХ 2018 г. (положение профиля см. на рис. 12).

Fig. 11. The absence of anomalies of the module of magnetic induction in the epicentral area according to the measurements of paragraphs PVC 2018 (the position of the profile see at Fig. 12).

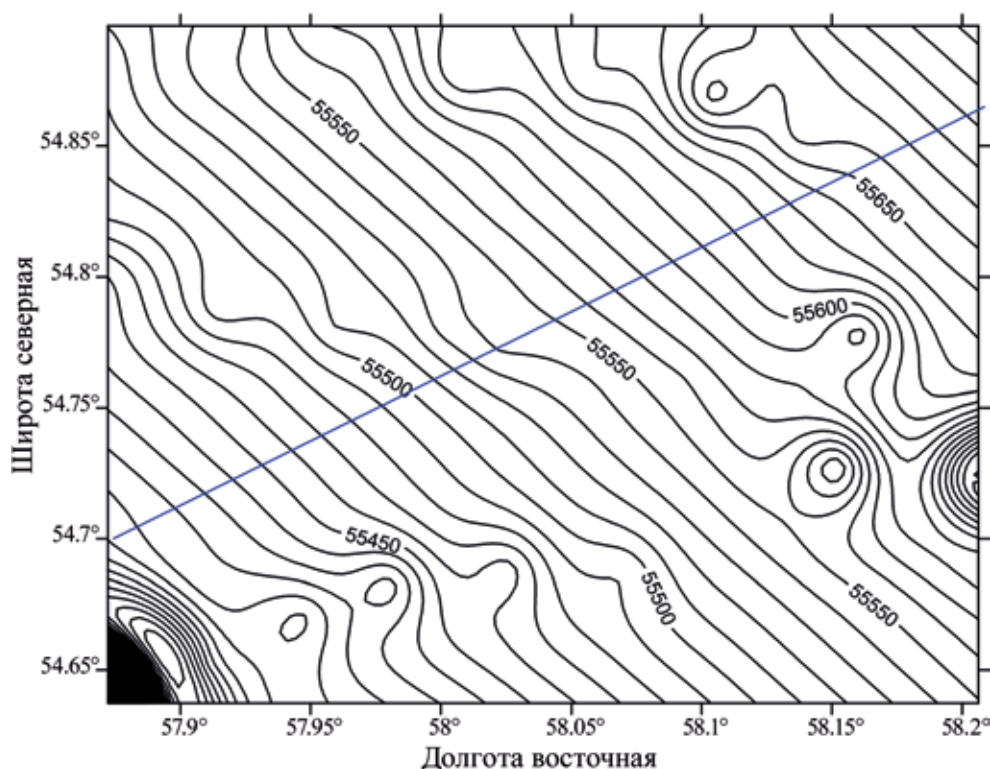


Рис. 12. Карта модуля вектора магнитной индукции в эпицентральной зоне по измерениям на пунктах ПВХ в 2018 г.

Отмечается отсутствие аномалии, наблюдаемой в 1960–1980 гг.

Fig. 12. Map of magnetic induction vector module in the epicenter zone by measurements at points for studying the age-old course of the magnetic field points in 2018.

There is no anomaly that was observed in 1960–1980.

рованный ноутбук с твердотельной флеш-памятью. Уровень сигнала в каналах контролировался по индикаторам на пульте аппаратуры и экрану ноутбука.

Камеральная обработка аудиоманнитотеллурических данных включала в себя:

- фильтрацию сетевых промышленных помех;
- получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье;
- восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом амплитудно-частотных характеристик измерительных каналов;
- расчет продольного импеданса среды $Z = E_y/H_x$ на разных частотах f ;
- расчет кажущегося сопротивления $\rho_k = |Z|^2/(2\pi f\mu_0)$ и получение частотных кривых $\rho_k(f)$, по которым можно построить псевдоразрез сопротивлений;
- трансформацию частотных кривых $\rho_k(f)$ в зависимости удельного электрического сопротивления от глубины $\rho_r(h)$ с помощью специального преобразования АМТ данных с учетом априорной информации о верхней части разреза (Давыдов, 2015).

На основании полученных данных $\rho_r(h)$ по профилю исследований построен глубинный разрез удельных электрических сопротивлений.

Результаты АМТЗ

Субширотный профиль исследований (рис. 13) располагался вблизи дороги Карауловка–Катав-Ивановск и проходил приблизительно в 0.5 км к северу от оползня. В состав работ входили электромагнитные исследования бесконтактным методом профилирования и АМТЗ. Профиль начинается на водоразделе, в межгорной седловине Песчаная–Катавская, и имеет протяженность более 3.5 км. В пределах профиля залегают карбонатно-терригенные отложения каратауской серии верхнего рифея: кварциты зильмердакской свиты (RF_3zl), мергелистые известняки катавской свиты (RF_3kt), алевролиты и сланцы инзерской свиты (RF_3in), доломиты и известняки миньярской свиты (RF_3mn) (Князев и др., 2013). Кварциты, доломиты и известняки отличаются высокими значениями удельных сопротивлений (1500–3000 Ом·м). Мергели, алевролиты и сланцы характеризуются величинами 300–1000 Ом·м, снижающимися до 100–200 Ом·м при повышенной трещиноватости и обводненности горных пород (см. рис. 10).

Геологическая карта района (см. рис. 7) свидетельствует (Князев и др., 2013) о широком развитии

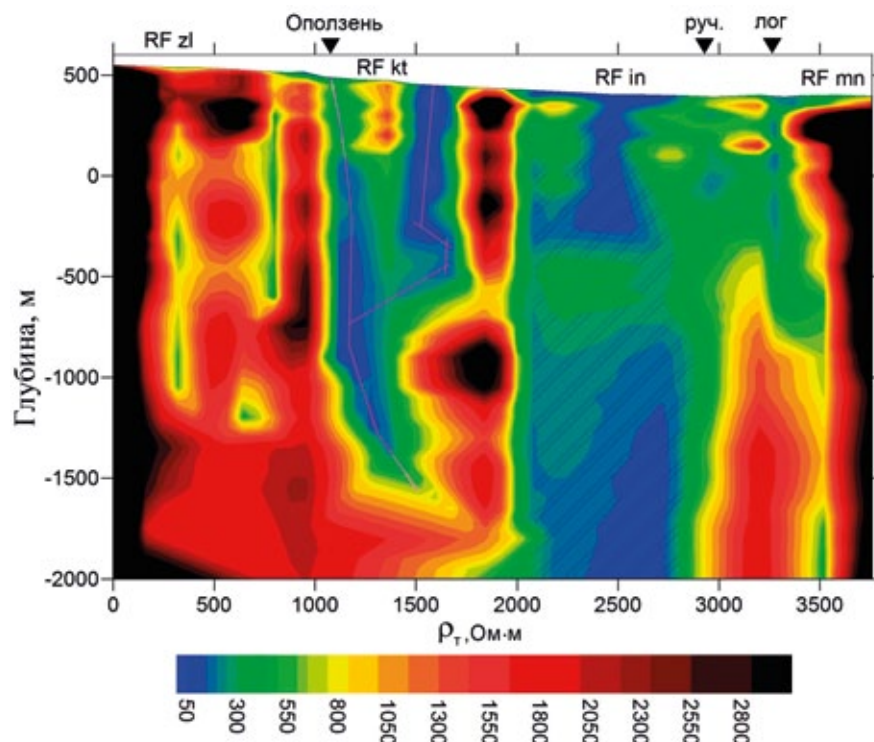


Рис. 13. Результаты аудиоманнитотеллурических зондирований и интерпретации магнитной съемки по участку дороги Карауловка–город Катав-Ивановск. Верхняя часть разреза до глубины 2000 м по данным АМТ.

Пунктирными линиями отмечены предполагаемые тектонические нарушения, штриховкой выделены трещиноватые породы. Расшифровка названий рифейских свит приведена в тексте.

Fig. 13. Results audiomagnetotellurics soundings and interpretation magnetic survey the road Karaulovka–the city of Katav-Ivanovsky. The upper part of the incision to a depth of 2000 m according AMTS.

The dotted lines mark the inferred tectonic disturbance, hatching highlighted the fissured rock. The transcript of the names of the Riphean suites is given in the text.

складчатости и сопутствующей ей разрывной тектонике к востоку и западу от эпицентра. Два региональных взбросо-надвига северо-восточного направления располагаются в 5–6 км к югу и северу от профиля. К ним могут быть приурочены второстепенные опоясывающие разломы, пересекающие исследовательский профиль. Тектонические нарушения фиксируются прежде всего наличием зон “разуплотнения” пород: брекчирования, катаклаза, милонитизации. На геоэлектрических разрезах это проявляется в виде линейных аномалий *пониженных* сопротивлений, вследствие повышения общего объема порового пространства, заполняемого влагой. Так, в районе возникновения оползня наблюдается подобная низкоомная аномалия, прослеживающаяся от поверхности до глубины порядка 1 км. Значения удельного электрического сопротивления в этой зоне снижаются до 15–20 Ом·м, что свидетельствует не только о высокой влажности, но и о повышенном содержании глинистой компоненты. Положение дизъюнктивного нарушения на геологической карте соответствует контакту катавской и инзерской свит, в составе которых имеются породы

с пелитовой фракцией. По-видимому, сейсмическая активность вызвала сокращение стенок тектонической трещины, что привело к разжижению и выталкиванию наружу мелкодисперсной пульпы, образовавшей грязевой поток (Blake et al., 2015). Контакт катавской и зильмердакской свит, вероятно, тоже тектонический. Он прослеживается до глубины 2 км по характерной аномалии пониженных сопротивлений 75–250 Ом·м. Строение геоэлектрического разреза указывает на то, что катавская свита с обеих сторон отделена клинообразными вертикальными разрывами, а на глубине около 1 км – субгоризонтальной границей отрыва. Ограниченный тектоническими нарушениями структурный блок мог сыграть роль резонатора при землетрясении, усилив амплитуду сейсмических колебаний, что и привело к возникновению оползня. При сильном толчке блок пород мог сместиться, создав напряженное состояние на границах, которое теперь постепенно сбрасывается с генерацией слабых афтершоков. Характер геоэлектрического строения разреза до глубины 2 км позволяет выделить катавский структурный блок пород с повышенным удельным сопротивлением, отделен-

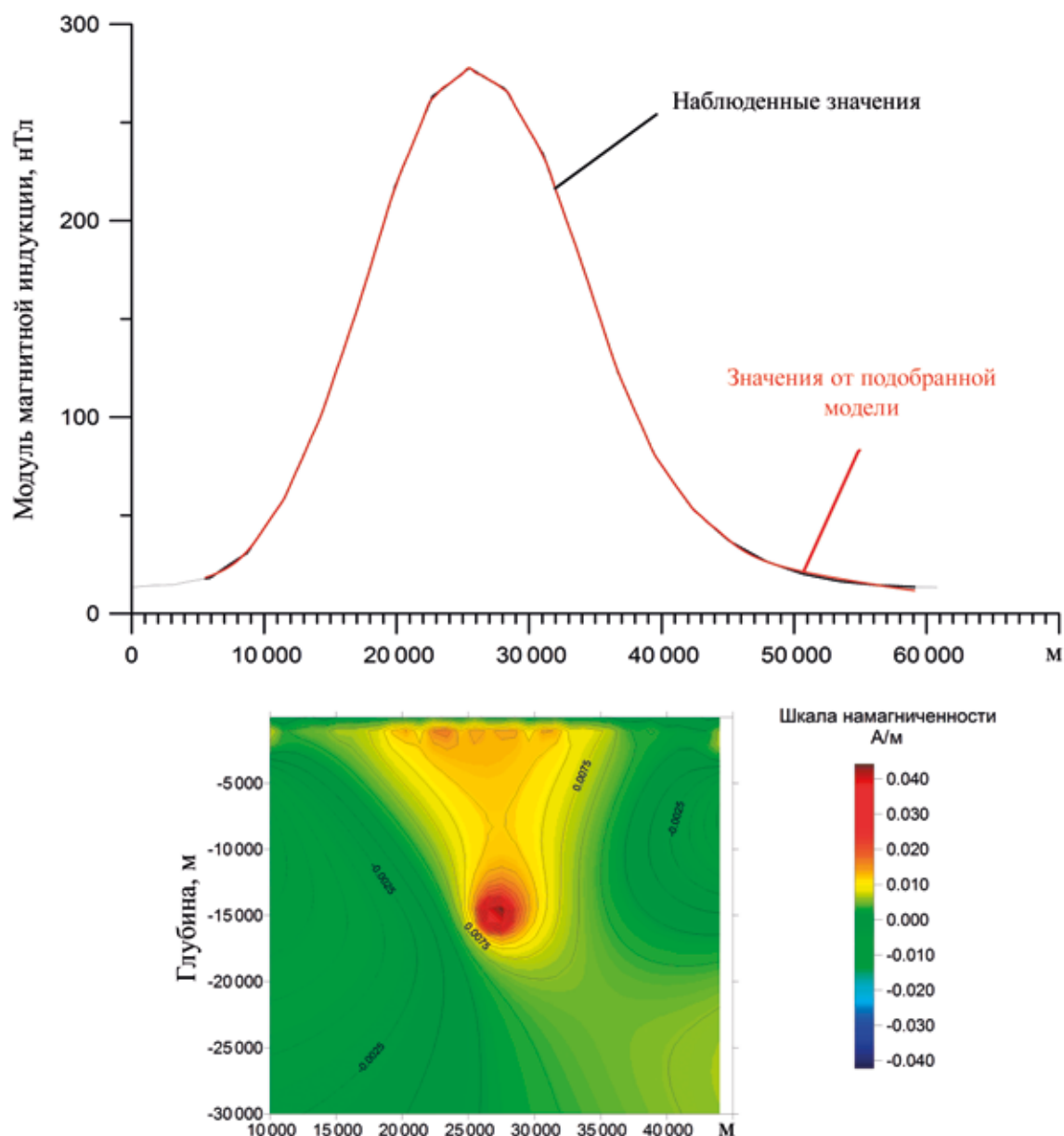


Рис. 14. Глубинный разрез намагниченности до глубины 30 км по данным интерпретации магнитного поля.

Fig. 14. Depth cross section of magnetization up to a depth of 30 km, according to the magnetic field interpretation.

ный со всех сторон тектоническими нарушениями/ зонами пониженного удельного сопротивления. С подвижкой данного блока может быть связано образование оползня и грязевого потока. В текущее время этот блок может являться одним из источников слабых афтершоков.

Магнитометрические исследования. Аппаратура и методика исследований

При обследовании оползня и работах в эпицентральной области использовался квантовый магнитометр G859 фирмы Geometrix со встроенной си-

стемой спутниковой привязки Novatel. Для оползня решалась задача топографического картирования и привязки его расположения на местности с последующей оценкой площади и объема (Овчаренко и др., 2019). Планировалось также оценить проявление в магнитном поле вероятного разлома в районе объекта. На втором этапе выполнена съемка модуля магнитной индукции по профилю Катов-Ивановск–Карауловка для картирования вероятных разломов на этом участке и, возможно, геологических свит, различающихся по магнитным свойствам. Результаты интерпретации магнитного поля для этого профиля показаны на рис. 14.

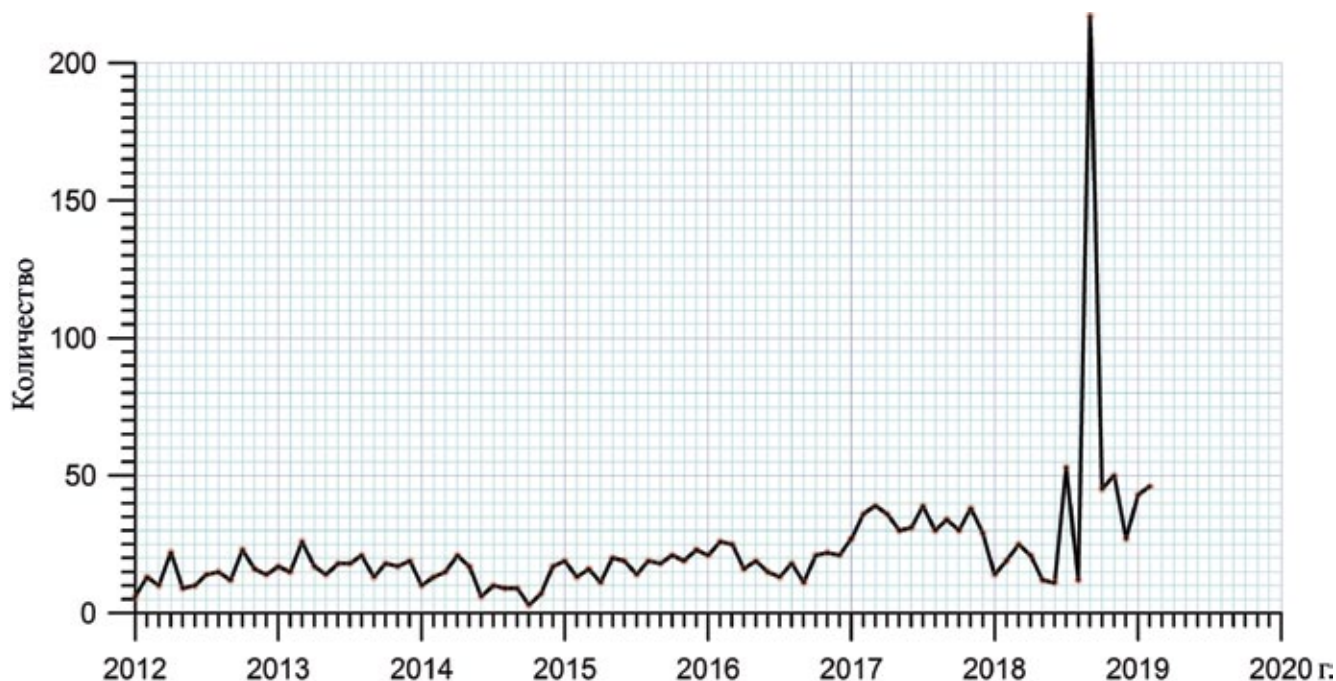


Рис. 15. Количество сейсмических событий в R 500 км каждый месяц.

Fig. 15. The number of seismic events in R 500 km every month.

Вместе с результатами АМТЗ они ясно указывают на двухъярусное строение (0–4, 4–30 км) района. Разрушение глубинной магнитной неоднородности могло послужить причиной изучаемого землетрясения. Интерпретация по широтному магнитометрическому профилю через эпицентр аномалии (см. синий профиль на рис. 12) на эпоху 1964 г. проводилась методом “сетки” с регуляризацией по А.Н. Тихонову (Овчаренко и др., 2019). Получены небольшие значения эффективной намагниченности (0.040–0.040 А/м) глубинного источника, который является изометричным. Судя по эффективной намагниченности, он может быть гранитно-гранодиоритового состава.

Методика обработки и анализа сейсмических каталогов

Сейсмические каталоги, любезно предоставленные Р.А. Дягилевым, В.Ю. Верхованцевым, О.А. Кусонским (2018, 2019 гг.) и дополненные каталогами KNDC/EMSC (Европейский средиземноморский сейсмологический центр; Сейсмологическая сеть KNDC), подвергались вначале вспомогательной обработке. Дата и время событий были пересчитаны в формат десятичного представления, более удобный для последующих компьютерных расчетов и моделирования. Для выявления динамики сейсмического процесса в очаговой зоне затем подсчитывались временные ряды числа собы-

тий в единицу времени и энергия, выделенная землетрясениями в единицу времени. За единицу расчетного времени принят календарный месяц, а при более детальных расчетах – календарные сутки. Эти показатели динамики сейсмического процесса приведены на рис. 15, 16.

В 2017 г. наблюдалось двукратное увеличение числа сейсмических событий. Затем в 2018 г., за 3 месяца до основного события, наступило первое затишье. После этого отмечались короткое двукратное увеличение числа землетрясений, основное затишье и главный удар. После главного события около половины года наблюдалась повышенная сейсмичность, а затем – спад сейсмичности до фоновых многолетних значений.

На рис. 17 показан график выделенной энергии сейсмическими событиями за каждый месяц. Средний темп выделения энергии составляет 5×10^{10} Дж. Отмечаются слабое повышение выделения в 2014, 2016 гг. и увеличение почти на 2 порядка в 2018 г. В конце 2018 г. и начале 2019 г. наблюдается экспоненциальный спад до фонового уровня.

Температурный мониторинг

Мониторинг проводился в скважине на расстоянии 9 км от эпицентра. Датчики были установлены на глубинах 20, 40, 60, 80 и 100 м. Температура за ноябрь 2018 г. – февраль 2019 г. на всех датчиках синхронно возрастала с темпом $0.02^\circ/\text{мес.}$ (см. рис. 17).



Рис. 16. Энергия сейсмических событий, выделенная в каждый месяц в 2012–2018 гг.

Fig. 16. Energy of seismic events allocated every month of 2012–2018.

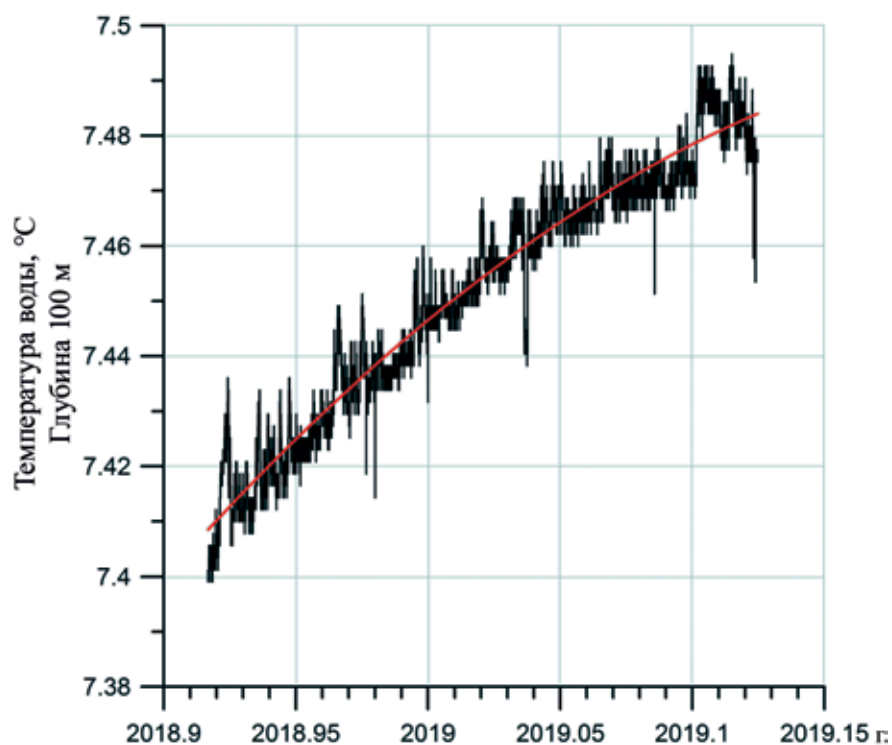


Рис. 17. Повышение температуры воды в скважине на глубине 100 м на расстоянии 9 км от эпицентра (данные А.К. Юркова).

Fig. 17. Water temperature rise in the well at a depth of 100 m at a distance of 9 km from the epicenter (data of A.K. Yurkov).

По устным сообщениям частных лиц, ранее наблюдались кратковременные увеличения температуры (ст. Минка, 2000 г., 23 км на СВ от эпицентра, горячая вода в подвале 56°C при отсутствии в поселке теплоцентрали и горячего водоснабжения; Миасс, 136 км на СВ, увеличение температуры воды в скважине на глубине 40 м с +7°C до 9°C после землетрясения и возврат к прежнему через 2 мес.). Сообщалось также о сильном загрязнении воды в скважине после сильных афтершоков (Аратское, 20 км на СЗ, скважина вблизи разлома).

ВЫВОДЫ

Анализ хода геодинамического и сейсмического процессов указывает на завершенность цикла. В процессе данного цикла не возникли близкие побочные очаги и рои сейсмических событий. Мониторинг температуры в скважине на глубине 100 м на расстоянии 9 км от эпицентра показывает слабое повышение температуры на 0.02°C каждый месяц. Возрастание температуры в очаге основного землетрясения на глубине 10 км будет существенно большим и, вероятно, может являться причиной размагничивания магнитной неоднородности. Вариации скорости современных вертикальных движений, по данным гравиметрического мониторинга, накануне землетрясения и в момент события достигали 2 см/сут. Основное сейсмическое событие и образование сейсмического роя произошли в блоке наименее нарушенных пород размером примерно 11 × 20 км. В пределах этого блока простираются протерозойских свит горных пород резко меняется с СВ на ССЗ. В эпицентральной зоне на глубине 10–15 км существовала магнитная неоднородность, которая постепенно уменьшала свою намагниченность, вплоть до полного исчезновения к ноябрю 2018 г. (первые измерения после землетрясения). Отдельно нужно подчеркнуть, что для объективного изучения и прогнозирования развития аналогичных очагов на Южном и Среднем Урале необходимо развернуть сеть долговременного современного геодинамического мониторинга (сейсмического, GNSS, магнитометрического по сети пунктов изучения ВХ, температурного по сети скважин, стационарного гравиметрического). Целесообразно выполнить также анализ обширных архивных данных и обновленной комплексной 4D-деформационной модели.

Благодарности

Выражаем благодарность С.А. Захарову и А.И. Решетову за помощь в обеспечении работ. Мы благодарны также Р.А. Дягилеву, В.Ю. Верховланцеву, О.А. Кусонскому и всем другим, оказавшим нам содействие в выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вейс-Ксенофонтова З.Г., Попов В.В. (1940) К вопросу о сейсмической характеристике Урала. *Тр. Сейсмологического института АН СССР*, **104**, 1-12.
- Давыдов В.А. (2015) Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований. *Урал. геофиз. вестн.*, **25**(1), 37-41.
- Дружинин В.С., Парыгин Г.И., Колмогорова В.В., Пустовалов Н.А., Кусонский О.А., Гуляев А.Н. (2005) Информация о двух сейсмических событиях 7 июля 2004 г. *Урал. геофиз. вестн.*, **7**, 25-29.
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. (2007) (Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина). Кн. 1. Землетрясения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 381 с.
- Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А., Никитин С.Н., Парыгин Г.И., Рыжий Б.П., Уткин В.И. (2001) Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург, УрО РАН, 124 с.
- Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. (2013) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Сер. Уральская. Л. N-40 – Уфа. Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 512.
- Нусипов Е., Овчаренко А.В. (1997) Сейсмичность и динамика напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня. Алма-Аты: ИИА “Айкос”, 442 с.
- Овчаренко А.В. (1995а) Компьютерная база геополей Урала – информационная основа нового этапа в изучении земной коры региона. *Докл. АН*, **342**(5), 675-679.
- Овчаренко А.В. (1995б) Разделение геополей на компоненты с априорно заданными свойствами. *Докл. АН*, **359**(5), 537-539.
- Овчаренко А.В. (1998) Динамические модели деформационных процессов в земной коре и сейсмологический прогноз. *Докл. АН*, **359**(2), 251-254.
- Овчаренко А.В., Баландин Д.В. (2009) Высокоточный мониторинг на Среднем Урале. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Мат-лы XXXVI сессии Междунар. семинара*. Казань: КазГУ, 402-405.
- Овчаренко А.В., Шапов В.А., Юрков А.К. (2019) Изучение оползня в эпицентральной области Катав-Ивановского землетрясения (5.09.2018, М5.8). *Урал. геофиз. вестн.*, **35**(1), 28-32.
- Тяпкин К.Ф. (1986) Изучение разломных и складчатых структур докембрия геолого-геофизическими методами. Киев: Наук. думка, 168 с.
- Шебакин Н.В. (1989) Эпицентральная сейсмология. *Комплексные исследования по физике Земли*. М.: Наука, 134-149.
- Blake S., Jones A.G., Henry T., Kalscheuer T.A. (2015) Multi-Disciplinary Investigation of Irish Warm Springs and Their Potential for Geothermal Energy Provision. *Proc. World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015, 1-11.
- EMSC – Европейский средиземноморский сейсмологический центр [Электронный ресурс]. URL: <http://>

www.emsc-csem.org.
KNDC – Сейсмологическая сеть [Электронный ресурс].
URL: <http://www.kndc.kz>.
Shuttle radar topographic mission (SRTM) [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>.

REFERENCES

- Blake S., Jones A.G., Henry T., Kalscheuer T.A. (2015) Multi-Disciplinary Investigation of Irish Warm Springs and Their Potential for Geothermal Energy Provision. *Proc. World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 1-11.
- Davydov V.A. (2015) OMAR-2 measuring equipment for electromagnetic research methods *Ural. Geofiz. Vestn.*, **25**(1), 37-41. (In Russian)
- Druzhinin V.S., Parygin G.I., Kolmogorova V.V., Pustovalov N.A., Kusonskii O.A., Gulyaev A.N. (2005) Information on two seismic events on July 7, 2004. *Ural. Geofiz. Vestn.*, **7**, 25-29. (In Russian)
- EMSC European Mediterranean seismological center [Electronic resource]. URL: <http://www.emsc-csem.org>.
- Kashubin S.N., Druzhinin V.S., Gulyaev A.N., Kusonskii O.A., Lomakin V.S., Malovichko A.A., Nikitin S.N., Parygin G.I., Ryzhii B.P., Utkin V.I. (2001) *Seismichnost' i seismicheskoe raionirovanie Ural'skogo regiona* [Seismicity and seismic zoning of the Ural region]. Ekaterinburg, UrO RAN, 124 p. (In Russian)
- KNDC – Seismological network [Electronic resource]. URL: <http://www.kndc.kz>.
- Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V. et al. (2013) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Ser. Uralskaya. L. N-40 – Ufa*. Ob'yasn. zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (3rd generation). Ser. Ural'skaya. L. N-40. Ufa. Explain note. SPb., VSEGEI Publ. 512 p. (In Russian)
- Nusipov E., Ovcharenko A.V. (1997) *Seismichnost' i dinamika napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemnoi kory Severnogo Tyan'-Shanya* [Seismicity and dynamics of the stress-strain state of the earth's crust of the Northern Tien Shan]. Alma-Aty, IIA "Aikos" Publ., 442 p. (In Russian)
- Ovcharenko A.V. (1995a) Computer database of the Ural geofields – the information basis for a new stage in the study of the Earth's crust in the region. *Dokl. Akad. Nauk*, **342**(5), 675-679. (In Russian)
- Ovcharenko A.V. (1995b) Dividing of geo fields into components with a priori specified properties. *Dokl. Akad. Nauk*, **359**(5), 537-539. (In Russian)
- Ovcharenko A.V. (1998) Dynamic models of deformation processes in the Earth's crust and seismological forecast] *Dokl. Akad. Nauk*, **359**(2), 251-254. (In Russian)
- Ovcharenko A.V., Balandin D.V. (2009) High-precision monitoring in the Middle Urals. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektnricheskikh polei Mat-ly XXXVI session of the International seminar* [Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitay, magnetic and electric fields. Proc. XXXVI session Intern. sem.] Kazan, Kazan St. Univ. Publ., 402-405. (In Russian)
- Ovcharenko A.V., Shchapov V.A., Yurkov A.K. (2019) Study of a landslide in the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (5.09.2018, M 5.8) *Ural. Geofiz. Vestn.*, **35**(1), 28-32. (In Russian)
- Shebalin N.V. (1989) *Epitsentralnaya seysmologiya. Kompleksnye issledovaniya po fizike Zemli* [Comprehensive studies on the physics of the Earth]. Moscow, Nauka Publ., 134-149. (In Russian)
- Shuttle radar topographic mission (SRTM) [Electronic resource]. URL: <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>.
- Tyapkin K.F. (1986) *Izuchenie razlomnykh i skladchatykh struktur dokembriya geologo-geofizicheskimi metodami* [Study of Pre-Cambrian fault and fold structures using geological and geophysical methods]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 168 p. (In Russian)
- Veys-Ksenofontova Z.G., Popov V.V. (1940) About seismic character of the Urals. *Tr. Seismol. Inst. AN SSSR*, **104**, 1-12. (In Russian)
- Zemletryaseniya i mikroiseismichnost' v zadachakh sovremennoi geodinamiki Vostochno-Evropeiskoi platformy* (Pod red. N.V. Sharova, A.A. Malovichko, Yu.K. Shchukina) [Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform (Eds. N.V. Sharov, A.A. Malovichko, Yu.K. Shchukin). Book 1. Earthquakes]. (2007). Petrozavodsk, Kar. STs RAS, 381 p. (In Russian)