
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.3

**ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ, ПРОЯВИВШИЕСЯ
В ВАРИАЦИЯХ ПОЧВЕННОГО РАДОНА, ТЕМПЕРАТУРЫ
И АНОМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЯХ
В ЗОНЕ КАТАВ-ИВАНОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 05.09.2018 ГОДА
НА ЮЖНОМ УРАЛЕ**

© 2023 г. А. К. Юрков^{1,*}, И. А. Козлова^{1,**}, С. В. Бирюлин^{1,***}, Б. Д. Хацкевич^{1,****}

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: akyurkov@mail.ru

**E-mail: ikozlova75@mail.ru

***E-mail: serrega2009@gmail.com

****E-mail: disaybl@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 30.01.2023 г.

5 сентября 2018 г. произошло самое сильное, из зарегистрированных за период инструментальных наблюдений, землетрясение на Урале в районе г. Катав-Ивановск Челябинской обл. с магнитудой $M_L = 5.4$. В октябре 2018 г. сотрудниками Института геофизики УрО РАН были организованы мониторинговые температурные и радоновые наблюдения. В рамках проведенных исследований показано, что закономерности поведения объемной активности радона (ОАР) при подготовке тектонического события, установленные для зоны субдукции (Южные Курилы), подтверждаются для Южно-Уральского региона. Отмеченные закономерности аномального поведения ОАР перед афтершоками в районе Катав-Ивановска характерны для зоны сжатия в зоне проведения радонового мониторинга. За период проведения температурных наблюдений с 28.11.2018 по 23.05.2019 г. зафиксировано увеличение температуры с градиентом 0.02°C в месяц. Выполнен анализ природных явлений, вызванных процессом подготовки землетрясения 2018 г. Установлено, что предполагаемые деформации сжатия проявились в гидрогеодинамическом поле по крайней мере за 10 лет до самого события. Приуроченность очагов землетрясений к выделенной асейсмичной зоне в границах Восточно-Европейской платформы Предуральского краевого прогиба и Башкирского антиклинария свидетельствует о наиболее вероятных местах проявления сейсмических событий. Созданная сеть мониторинга температуры и радона в эпицентральной зоне по наблюдениям за афтершоками показала возможность отслеживания процесса подготовки землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, афтершок, мониторинг, температура, скважина, радон, Урал, асейсмичная зона

DOI: 10.31857/S086978092302011X, EDN: TWYNMW

ВВЕДЕНИЕ

Успешный прогноз готовящегося землетрясения возможен на основе выделения закономерностей проявления процесса его подготовки. Изучение процесса подготовки землетрясения представляет собой сложную задачу, определяемую не только выбором наблюдаемых физических явлений, которые сопровождают или вызываются подготовкой события, но и пространственно-временными характеристиками постановки таких наблюдений. Ясно, что изучение процесса подготовки землетрясения наиболее целесооб-

разно в сейсмически активных областях, где события происходят часто. Однако именно это обстоятельство и затрудняет поиск закономерностей при изучении конкретного землетрясения. В связи с этим наблюдение за подготовкой землетрясения в условиях отсутствия помех от других событий позволяет более надежно выделить и изучить наблюдаемые физические явления. Поэтому исследование явлений, наблюдаемых при Катав-Ивановском землетрясении 05.09.2018 г., имеет важное значение.

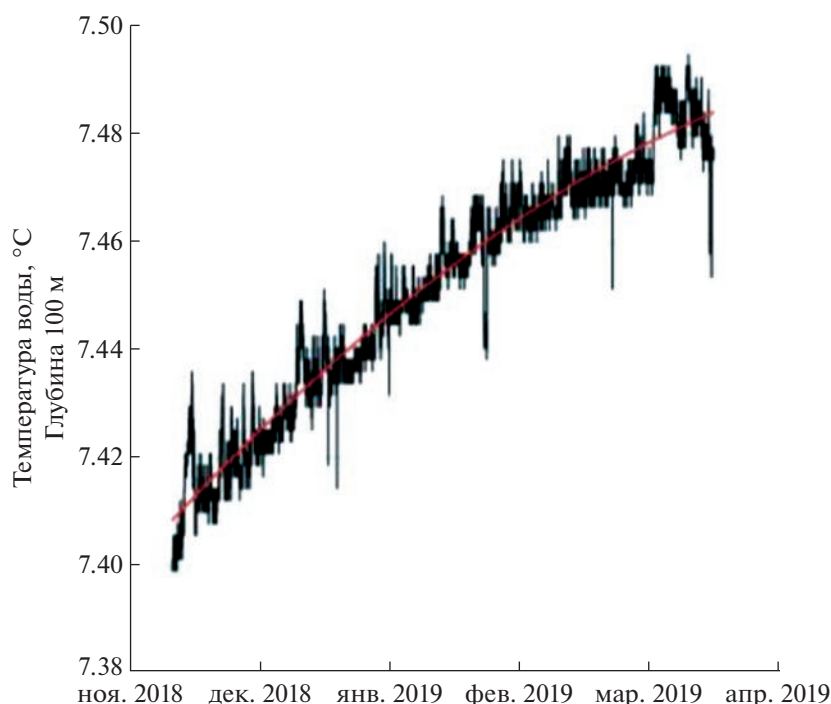


Рис. 1. Изменение температуры в скважине на глубине 95 м [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Землетрясение в районе г. Катав-Ивановск Челябинской обл. с локальной мгновенной магнитудой $M_L = 5.4$ оказалось неожиданным для данного района, хотя для Уральского региона не исключена повышенная сейсмичность. В соответствии с нормативными картами ОСР-2015 данная территория относится по шкале MSK к сейсмической 6-балльной зоне при повторяемости землетрясений 1 раз в 5000 лет¹. Фактически произошло самое сильное землетрясение на Урале из зарегистрированных за период инструментальных наблюдений. До этого наиболее значимыми землетрясениями были Билимбаевское (1914 г.) с ориентировочной магнитудой M_L около 5 и Средне-Уральское (Битимское, 2015 г.) с магнитудой M_L 4.7. Координаты эпицентра, глубина очага и магнитуа события были получены по данным удаленных сетей — Казахстанской и Пермской (ближайшие станции были расположены в обсерватории Арти и г. Уфа). Этим обусловлены большие погрешности в определении координат гипоцентра и магнитуды землетрясения.

В геологическом отношении Катав-Ивановское землетрясение локализовано в зоне сочленения Башкирского антиклинория, сложенного рифейскими образованиями, и Предуральского

краевого прогиба, сложенного флишево-молассовыми комплексами карбона-перми. Структура Башкирского антиклинория осложнена Каратауским блоком и Сулеймановской антиклиналью [8]. Установленная через некоторое время Горным институтом УрО РАН (г. Пермь) временная сеть сейсмических станций позволила более детально определить направление распространения афтершокового процесса.

В октябре 2018 г. Институтом геофизики УрО РАН были организованы мониторинговые температурные и радоновые наблюдения. Для проведения температурных измерений в водозаборной скважине (выведенной из эксплуатации) в г. Катав-Ивановск на глубине 95 м был установлен температурный логгер. За период наблюдений с 28.11.2018 по 23.05.2019 г. происходило увеличение температуры с градиентом 0.02°C в месяц (рис. 1) [7].

Радон является одним из вероятных предвестников землетрясений. Аномальные концентрации радона изучались различными специалистами в почвенном воздухе [13, 16, 17], приземной атмосфере [11, 15] и грунтовой воде [12, 14]. В рамках проведенного исследования наблюдения за объемной активностью радона (ОАР) были организованы в двух точках г. Катав-Ивановск (№ 1 — “гостиница”, № 2 — “Первомайская, 21”). Измерения проводились непрерывно в адвективном режиме с 4-часовым накоплением импульсов.

¹ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах (актуализированная редакция СНиП II-7-81). <https://docs.cntd.ru/document/550565571>

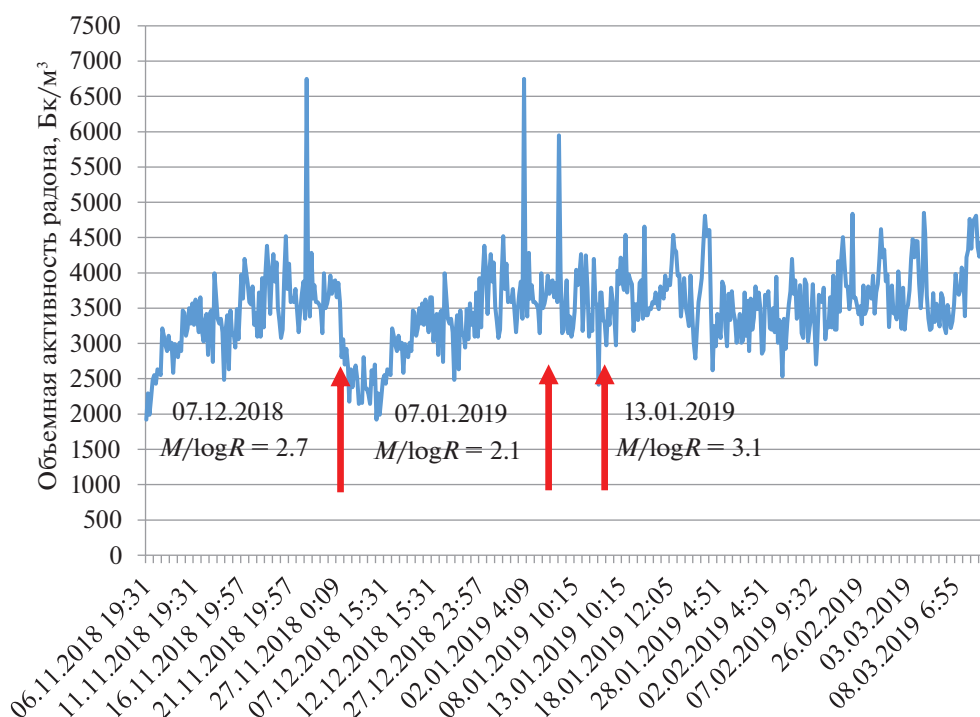


Рис. 2. Фрагмент записи вариаций ОАР на станции № 1 (г. Катав-Ивановск) с 6.11.2018 г. по 10.03.2019 г. Стрелками обозначены моменты афтершоков, сбоку указаны их параметры: дата и отношение магнитуды события к логарифму расстояния от эпицентра землетрясения до точки мониторинга.

Интерпретация получаемых данных основывалась на закономерностях поведения ОАР, установленных при подготовке землетрясений в Южно-Курильском регионе [4]. Выбор Южных Курил для изучения закономерностей отражения подготовки землетрясений был обусловлен большим количеством происходящих сейсмических событий в регионе и отсутствием существенных техногенных помех. Подобных условий нет ни в одном регионе России и мира. Для геодинамических условий зоны субдукции было установлено, что землетрясения отражаются на кривой ОАР только после прохождения максимума и только в том случае, если характеристики тектонического события соответствуют геодинамическому критерию (отношение магнитуды события к логарифму расстояния от эпицентра до станции мониторинга) больше 2.0. События разной удаленности от точки мониторинга отражаются на разных участках кривой ОАР. Для Южно-Курильского региона “дальние” (больше 180 км от точки мониторинга) землетрясения отражаются, начиная от точки максимума до выхода аномалии на фоновый уровень. “Ближние” землетрясения (расстояние от точки мониторинга меньше 130 км) отмечаются после выхода аномалии на фоновый уровень, в интервале времени до 28 сут [4].

Исходя из того, что расстояние от точки мониторинга до эпицентров афтершоков Катав-Ива-

новского землетрясения было около 10 км, они были отнесены к событиям “ближней” зоны. На рис. 2 приведен фрагмент записи поведения ОАР с 06.11.2018 по 10.03.2019 г. на станции № 1 и обозначены наиболее значимые афтершоки (по данным ФИЦ ЕГС РАН). Максимум 23.11.2018 г. вызван процессом подготовки группы афтершоков, произошедших 07.12.2018 г. Они отметились после выхода аномалии ОАР на фоновые значения. Максимумы 01.01.2019 и 06.01.2019 г. вызваны процессом подготовки афтершоков, произошедшими 10.01–14.01.2019 г. Эти события в кривых ОАР также отразились как события “ближней” зоны. Снижение амплитуды ОАР от афтершока 13.01.2019 г. объясняется ранее полученной закономерностью, когда при двух последовательных сейсмических событиях, следующих с промежуток времени менее 25 сут, радон не успевает накопиться в поровом пространстве [5]. По сейсмологическим данным афтершоковый процесс практически завершился в мае 2019 г. Магнитуда толчков после 13.03.2019 г. была в основном меньше 2.0, и они не отразились в кривых ОАР.

Отмеченные закономерности поведения ОАР характерны для зоны сжатия в зоне проведения радонового мониторинга. Косвенным подтверждением наличия сжимающих напряжений могут служить некоторые физические явления, отмеченные в зоне Катав-Ивановского землетрясения.



Рис. 3. Фрагмент оползня с горы Песчаная. Катав-Ивановск, сентябрь 2018 г. [6].

Несмотря на довольно ощутимые проявления данного землетрясения, по эмоциональной реакции населения и повреждению жилых и производственных объектов значительно большее внимание привлекло неординарное для Урала явление — грязевой оползень (рис. 3) [7].

Момент схода оползня точно не установлен. Информация о нем была получена в 20 числах сентября 2018 г. от местного населения. Неясно, связан ли оползень непосредственно с главным толчком, либо он инициирован последовавшими афтершоками. Изучение оползня позволило определить некоторые его характеристики и, самое главное, инициировало изучение особенностей состояния геологической среды в период, предшествовавший землетрясению 2018 г. В первую очередь был выполнен анализ сейсмологических данных. Составлен каталог произошедших сейсмических событий и выделившейся энергии за период с 2006 по 2018 г. [3, 6]. Согласно известным сейсмологическим прогностическим критериям (повышение сейсмической активности перед землетрясением и наличие сейсмической “брешы” (паузы)) приведенные данные явно не свидетельствовали о назревающем событии или его подготовке.

Других мониторинговых наблюдений за явлениями, отражающими процесс подготовки землетрясений в районе землетрясения, до события не проводилось. При сейсмологическом опросе после землетрясения жители рассказали о необычных природных явлениях, отмеченных в окрестностях района землетрясения. Так, в 2009 г. было зафиксировано появление термальной воды в 8-метровой водозаборной скважине в пос. Мин-

ка Усть-Катавского ГО по адресу ул. Первомайская, 27. По бытовым измерениям ее максимальная температура достигала 54°C. Описание аномального явления приводится по публикации в газете “Среди вершин” (<https://smotrim.ru/article/1388534>; <https://sv-uk.ru/news-2/community/incident/zemletryasenie-mozhno-bylo-predskazat/>). По данным из глубокой параметрической скважины Леузинская-1, расположенной в башкирской части Юрюзано-Сылвенской впадины Предуральского прогиба, вода с температурой 54°C должна быть на глубине порядка 2.5–3.0 км [2, 10]. Учитывая ее охлаждение при подъеме, можно говорить и о глубинах более чем 3 км. Таким образом, это уникальное явление свидетельствовало о том, что уже в 2009 г. в горных породах на глубине происходил процесс сжатия, который характерен для очага готовящегося землетрясения.

Из других, отмеченных населением необычных природных явлений, проявившихся уже после землетрясения, например, приток “грязной” воды в частную водозаборную скважину в селе Аратское Катав-Ивановского района после третьего ощутимого афтершока. По словам владельца, скважину пришлось дважды промывать. Очевидно, что это тоже свидетельствовало о проявлении процесса сжатия, который не прекратился после основного толчка.

Еще одним явлением, также связанным с проявлением процесса сжатия, можно считать образование “грязевых” пробок в скважинах на южном водозаборе Катав-Ивановска. Глубина водозаборных скважин находится в пределах 100 м. По мере эксплуатации в предшествовавший земле-

Таблица 1. Координаты наблюдательных станций и скорости их движения [9]

Станция	Координата X, м	Движение по X, мм/год	Координата Y, м	Движение по Y, мм/год
АКТО (АРТИ)	6281739.015	3.93 ± 0.78	3604633.743	23.78 ± 0.60
МТ (“Висим”)	6418270.359	3.72 ± 3.05	3544839.851	19.70 ± 2.49
УПМУ (“г Синяя”)	6471219.035	0.59 ± 5.26	3504658.611	20.68 ± 4.11
УОГС (“т. Волчиха”)	6326016.674	5.82 ± 2.48	3654711.718	20.45 ± 1.91
КУТЕ (“Кытлым”)	6623368.679	-1.60 ± 2.58	3345348.614	23.58 ± 1.97
ЗУЗЕ (“Сысерть”)	6289507.183	3.82 ± 2.57	3735635.755	22.89 ± 1.91
УЕКН (“Верхотурье”)	6552832.865	1.34 ± 2.25	3500740.088	21.48 ± 1.69

трясению период некоторые скважины для сохранения дебита нуждались в регулярной промывке. В ряде случаев из-за снижения и невозможности восстановления дебита их выводили из эксплуатации. При проверке таких нерабочих скважин было установлено, что 2 скважины, выведенные из эксплуатации, оказались глубиной 20 и 35 м вместо 100 м. В них образовались пробки из плотной субстанции (грязи). Глубина одной из проверенных нерабочих скважин была равна 100 м. Для проведения мониторинга в ней 28.10.2018 г. была установлена температурная станция (температурный логгер) на глубине 95 м. Для технического обслуживания станцию подняли 23.05.2019 г. При повторном спуске логгера 20.06.2019 г. оказалось, что глубина скважины стала равна 65 м. Поскольку скважина была полностью обсажена, то очевидно произошел подъем вещества более плотного, чем вода, и воду, как поршнем, выдавливало через устье скважины. Это свидетельствовало о том, что процесс сжатия сохранялся до мая 2019 г. В настоящее время ее глубина сохраняется на уровне 65 м, что косвенным образом может свидетельствовать о прекращении процесса сжатия. Как уже отмечалось, землетрясение 05.09.2018 г. сопровождалось продолжительным афтершоковым процессом. По сейсмологическим наблюдениям, афтершоки практически прекратились только к маю 2019 г. Это совпадает с временем прекращения изменения глубины наблюдательной скважины.

Произошедшие на Урале в последние годы два довольно крупные, по местным масштабам, сейсмические события говорят о наличии геодинамической активности данного региона. Предыдущее, сопоставимое по магнитуде с Катав-Ивановским, землетрясение случилось в 1914 г. Если посмотреть на расположение этих землетрясений с учетом геологических особенностей площадей, на которых произошли сейсмические события, то

можно отметить их приуроченность к обрамлению, практически асейсмичной зоны, выделенной в пределах Русской платформы, располагающуюся в пределах Предуральяского краевого прогиба, Башкирского антиклинория. Выделение асейсмичной зоны проводилось по отсутствию на данной площади известных землетрясений (рис. 4). Более наглядная картина получается, если рассмотреть положение очагов всех известных на сегодняшний день землетрясений на Урале. Они в основном располагаются в обрамлении выделенной асейсмичной зоны. Наличие тектонических напряжений в обрамлении асейсмичной зоны подтверждается результатами GPS-наблюдений, выполненных сотрудниками Института геофизики УрО РАН. Векторы движения реперов различаются и по величине, и по направлению (табл. 1). Расчет векторов движения реперов относительно обсерватории Арти, расположенной в пределах асейсмичной зоны, показывает их встречное направление на северной и южной границах зоны, что может свидетельствовать о процессе сжатия (рис. 5) [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа инструментальных наблюдений и аномальных природных явлений в районе Катав-Ивановского землетрясения 2018 г. подтверждается наличие зоны сжатия, которая активизировалась за несколько лет до тектонического события. Предположительно, активизация связана с продолжающимся движением (по данным GPS-наблюдений) Евразии на северо-восток-восток со скоростью 28 мм в год. Отдельные блоки могут двигаться с иными скоростями, что может приводить к возникновению тектонических напряжений в них.

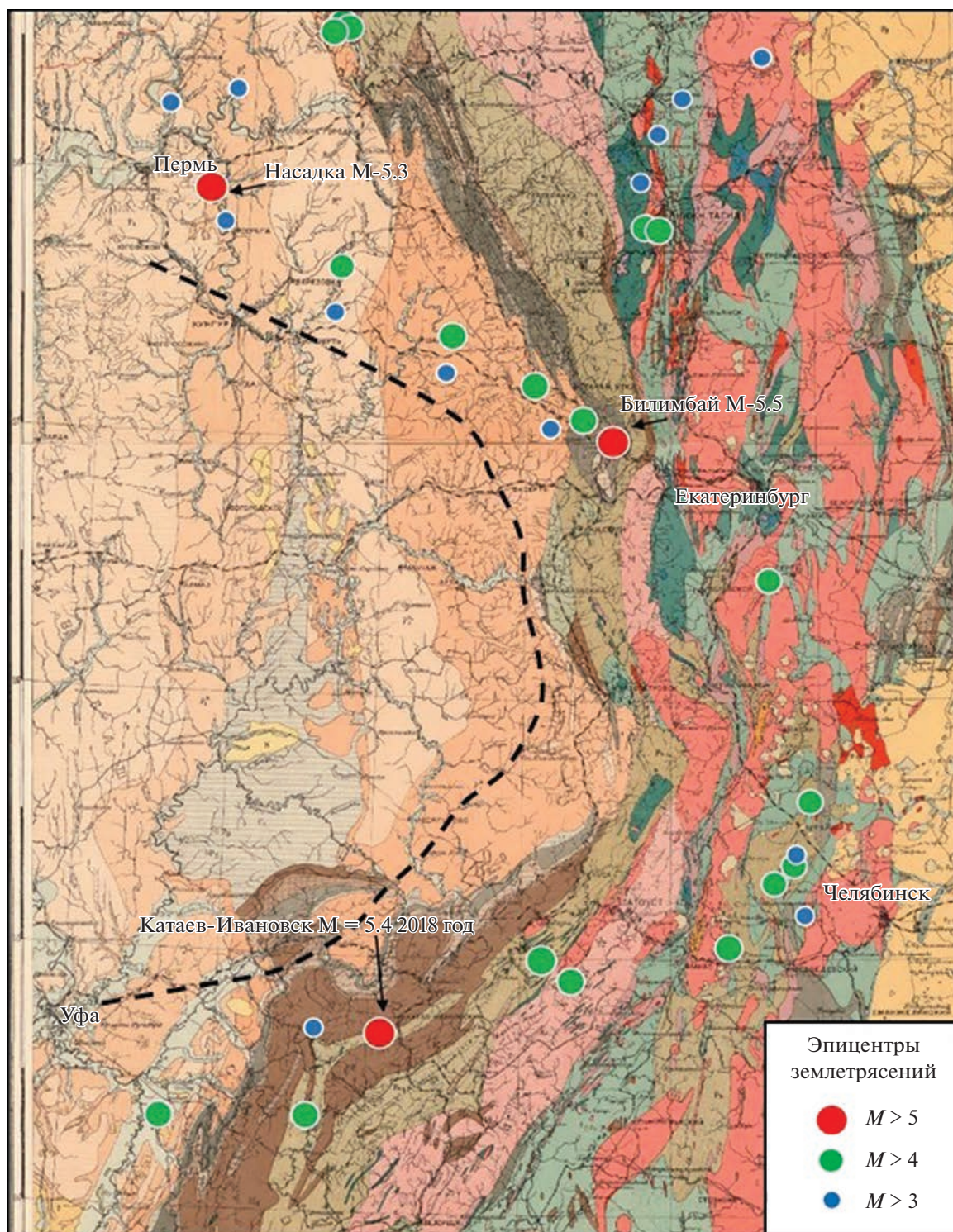


Рис. 4. Фрагмент геологической карты Среднего и Южного Урала [1] с расположением эпицентров наиболее крупных землетрясений на Урале с 1698 по 2018 г. Пунктирной линией отмечено ориентировочное положение асейсмичной зоны по [3, 6].

Мониторинговые радоновые и температурные наблюдения в зоне землетрясения показали возможность оперативного контроля изменения гео-

динамической обстановки в области готовящегося землетрясения в Уральском регионе. Полученные закономерности поведения объемной

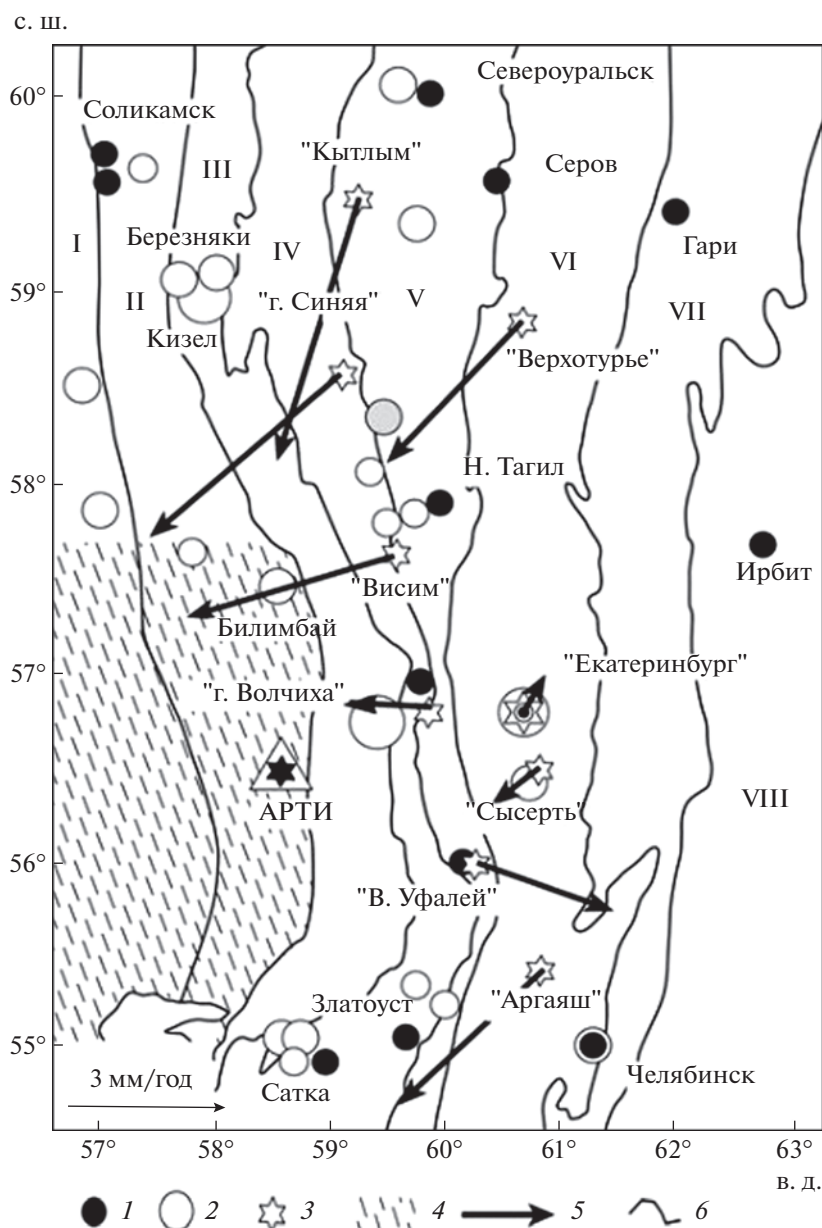


Рис. 5. Схема движения отдельных блоков Урала относительно обсерватории АРТИ. 1 – города; 2 – эпицентр землетрясений; 3 – станция GPS; 4 – зона “Уфимского выступа” (асейсмичная зона); 5 – направление движения реперов GPS; 6 – границы основных геологических структур Урала. Структуры первого порядка по [8]: I – Восточно-Европейская платформа, II – Предуральский краевой прогиб, III – Западно-Уральская зона складчатости, IV – Центрально-Уральское поднятие, V – Тагильско-Магнитогорский прогиб, VI – Восточно-Уральское поднятие, VII – Восточно-Уральский прогиб, VIII – Зауральское поднятие.

активности радона при подготовке землетрясений в Южно-Курильском регионе оказались применимы в условиях Урала.

Для дальнейшего наблюдения геодинамической активности Среднего и Южного Урала необходимо продолжение мониторинга радона и температуры на северных и южных границах выделенной асейсмичной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая карта Урала. М: 1:1000000. Составлена: Главное геолого-разведочное управление. Под ред. Д.В Наливкина, Н.К. Высоцкого, 1930. http://etomesto.ru>map-atlas_geologiya_ural-1930/
2. Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Тагирова Ч.Д. Оценка температуры глубоких горизонтов западной части республики Башкортостан // Электрон-

- ный научный журнал “Нефтегазовое дело”. 2013. № 2. С. 19–31.
3. Дзягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В. и др. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b = 5.4$ (Урал) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>
 4. Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К., Демежко Д.Ю. Изменения объемной активности почвенного радона и температурные вариации в скважине во время процесса подготовки землетрясения // Геоэкология. 2021. № 6. С. 28–36. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060059>
 5. Козлова И.А., Юрков А.К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1 (27). С. 35–39.
 6. Маловичко А.А., Морозов А.Н., Ваганова Н.В. и др. Билимбаевское землетрясение 17 августа 1914 г.: параметры гипоцентра по инструментальным данным // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 1. С. 40–47. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>
 7. 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. № 20 (3). С. 432–448. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448>
 8. Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., Хотылев А.О., Прудников И.А. и др. Тектоническая обстановка в районе Катав-Ивановского землетрясения в сентябре 2018 г. (Южный Урал) // Вестник МГУ. 2019. Сер. 4. Геология. № 2. С. 23–29.
 9. Уткин В.И., Белоусова А.А., Тягунов Д.С., Баландин Д.В. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS // ДАН. 2010. Т. 431. № 2. С. 246–251.
 10. Шапов В.А. Геотермические исследования Урала: дис. ... д. геол.-мин. наук: 25.00.10. Екатеринбург, 2006. 216 с. <http://www.dslib.net/geo-fizika/geotermicheskie-issledovaniya-urala.html>
 11. Albarello D. Short-term earthquake prediction and preparation // DPC-INGV-S3 Project, Final report. 2013. 31 p.
 12. Favara R., Grassa F., Inguaggiato S., Valenza M. Hydro-geochemistry 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.
 13. King C.Y. Radon monitoring for earthquake prediction in China // Earthquake Prediction Research. 1985. Vol. 3. N 1. P. 47–68.
 14. Kuo T., Fan K., Kuochen H., Han Y., Chu H., Lee Y. Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 88. N 1. P. 101–106.
 15. Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., Ishikawa T., Tokonami S., Shinogi M. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. № 7. P. 629–635.
 16. 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. Vol. 66. № 10. P. 1523–1530.
 17. Walia V., Lin S.J., Hong W.L., Fu C.C., Yang T.F., Wen K.L., Chen C.H. Continuous temporal soil-gas composition variations for earthquake precursory studies along Hsincheng and Hsinhua faults in Taiwan // Radiation Measurements. 2009. V. 44. № 9–10. P. 934–939.

CHANGES IN GEODYNAMIC SITUATION MANIFESTED IN SOIL RADON AND TEMPERATURE VARIATIONS AND ABNORMAL NATURAL PHENOMENA IN THE ZONE OF KATAV-IVANOVSK EARTHQUAKE (05.09.2018), THE SOUTHERN URALS

A. K. Yurkov^{a,##}, I. A. Kozlova^{a,##}, S. V. Biryulin^{a,###}, and B. D. Khatskevich^{a,####}

^a*Institute of Geophysics, Ural Branch, RAS,
ul. Amundsen 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*

[#]*E-mail: akurkov@mail.ru*

^{##}*E-mail: ikozlova75@mail.ru*

^{###}*E-mail: serrega2009@gmail.com*

^{####}*E-mail: disaybl@yandex.ru*

The strongest earthquake in the Urals registered during the period of instrumental observations, with a magnitude of M_L -5.4 occurred in the area of Katav-Ivanovsk city, Chelyabinsk region, on 05.09.2018. In October 2018, Institute of Geophysics, the Ural Branch RAS organized temperature and radon observations. The conducted studies have shown that the behavior patterns of the volume radon activity (VRA) established for the tectonic event preparation in the subduction zone (Southern Kuriles), are also true for the South Ural region. The natural phenomena caused by the earthquake 2018 preparation are analyzed. During the observation period from 28.11.2018 to 23.05.2019, there was an increase in temperature with a gradient of 0.02°C per month. The observed patterns of VRA abnormal behavior before aftershocks in the Katav-Ivanovsk area are typical

for the compression zone in the radon monitoring area. It is noted that the assumed compression deformations were manifested in the hydrogeodynamic field at least 10 years before the event proper. The proximity of earthquake foci to the identified aseismic zone within the boundaries of the East European Platform, the Pre-Ural Regional Trough, and the Bashkir anticlinorium indicates the most likely places of seismic events. The arranged temperature and radon monitoring network in the epicentral zone by observing aftershocks has shown the possibility of tracking the earthquake preparation process.

Keywords: earthquake, aftershock, monitoring, temperature, borehole, radon, Ural, aseismic zone

REFERENCES

1. Geological map of the Urals. M: 1:1000000. Compiled by: The Main Geological Exploration Department. Edited by D.V. Nalivkin, N.K. Vysotsky, 1930. http://etomesto.ru/map-atlas_geologiya_ural-1930/
2. Golovanova, I.V., Sal'manova, R.Yu., Tagirova, Ch.D. *Otsenka temperatury glubokikh gorizontov zapadnoi chasti respubliky Bashkortostan* [Deep horizons temperature assessment in the western part of the Republic of Bashkortostan]. *Neftegazovoe delo*, 2013, no. 2, pp. 19–31. (in Russian)
3. Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., Varlashova, Yu.V., et al. *Katav-Ivanovskoe zemletryasenie 04.09.2018, $m_b = 5.4$ (Ural)* [Katav-Ivanovsk earthquake on 04.09.2018, $m_b = 5.4$ (Urals)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>. (in Russian)
4. Kozlova, I.A., Biryulin, S.V., Yurkov, A.K., Demezhko, D.Yu. *Izmeneniya ob'emnoi aktivnosti pochvennogo radona i temperaturnye variatsii v skvazhine vo vremya protsessy podgotovki zemletryaseniya* [Volume radon activity changes and temperature variations in the well during earthquake preparation]. *Geoekologiya*, 2021, no. 6, pp. 28–36. <https://doi.org/10.31857/S0869780921060059>. (in Russian)
5. Malovichko, A.A., Morozov, A.N., Vaganova, N.V. et al. *Bilimbavskoe zemletryasenie 17 avgusta 1914 g.: parametry gipotsentra po instrumental'nym dannym* [The Bilimbai earthquake on August 17, 1914: the hypocenter location based on instrumental data]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 40–47. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.04>. (in Russian)
6. Kozlova, I.A., Yurkov, A.K. *Otazhenie posledovatel'nykh seismicheskikh sobytii v pole ob'emnoi aktivnosti radona* [Reflection of consecutive seismic events in the field of radon volume activity]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, 2016, no. 1 (27), pp. 35–39. (in Russian)
7. Ovcharenko, A.V., Davydov, V.A., Shchapov, V.A., Yurkov, A.K. *Geofizicheskie issledovaniya v epitsentral'noi oblasti Katav-Ivanovskogo zemletryaseniya (05.09.2018, M5.8)* [Geophysical study in the epicentral area of the Katav-Ivanovsk earthquake (05.09.2018, M5.8)]. *Litosfera*, 2020, no. 20 (3), pp. 4320–448. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-432-448>. (in Russian)
8. Tevelev, A.I.V., Tevelev, Ark.V., Khotylev, A.O., Prudnikov, I.A., et al. *Tektonicheskaya obstanovka v raione Katav-Ivanovskogo zemletryaseniya v sentyabre 2018 g. (Yuzhnyi Ural)* [Tectonic situation in the area of Katav-Ivanovsk earthquake in September 2018 (the Southern Urals)]. *Vestnik MGU, Ser. 4. Geologiya*, 2019, no. 2, pp. 23–29. (in Russian)
9. Utkin, V.I., Belousova, A.A., Tyagunov, D.S., Balandin, D.V. *Issledovanie geodinamiki Severnogo i Srednego Urala po dannym GPS* [The study of geodynamics in the Northern and Middle Urals by GPS data]. *Doklady Akademii nauk*, 2010, vol. 431, no. 2, pp. 246–251. (in Russian)
10. Shchapov, V.A. *Geotermicheskie issledovaniya Urala* [Geothermal studies in the Urals]. Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation, Yekaterinburg, 2006, 216 p. (in Russian)
11. Albarello, D. Short-term earthquake prediction and preparation. *DPC-INGV-S3 Project, Final report*. 2013. 31 p.
12. 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, vol. 16, no. 1, pp. 1–17.
13. King, C.Y. Radon monitoring for earthquake prediction in China. *Earthquake Prediction Research*, 1985, vol. 3, no. 1, pp. 47–68.
14. Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y. et al. Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 88, no. 1, pp. 101–106.
15. Omori, Y., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Kawada, Y. et al. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 2007, no. 7, pp. 629–635.
16. 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, vol. 66, no. 10, pp. 1523–1530.
17. Walia, V., Lin, S.J., Hong, W.L., Fu, C.C. et al. Continuous temporal soil-gas composition variations for earthquake precursory studies along Hsincheng and Hsinhua faults in Taiwan. *Radiation Measurements*, 2009, vol. 44, no. 9–10, pp. 934–939.