ISSN 2541-8912 (Print) ISSN 2713-2161 (Online)

# ГЕРЕХОДНЫХ ЗОН



# GEOSYSTEMS of Transition Zones 2024 TOM 8 № 4

Решением Научно-экспертного совета Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации доктор геолого-минералогических наук, доцент, член редколлегии нашего журнала, Ренат Белалович Шакиров награжден медалью «За достижения в морской науке».

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» поздравляют Рената Белаловича и его коллектив с этой неординарной наградой и желают ему дальнейших успехов в морских научных исследованиях и экспертной работе на международных площадках.



УДК 550.8.04+550.343.62

© Авторы, 2024 г. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024. Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.328-342 https://www.elibrary.ru/homkeo

# Вариации концентрации подпочвенных газов и электрического поля атмосферы перед некоторыми землетрясениями Камчатки

Е. О. Макаров<sup>@</sup>, Р. Р. Акбашев, В. Е. Глухов

®E-mail: ice@emsd.ru Камчатский филиал ФИЦ ''Единая геофизическая служба РАН'', Петропавловск-Камчатский, Россия

**Резюме.** На Камчатке непрерывно действуют сети наблюдений за вариациями подпочвенных газов, электрического поля атмосферы, наклонов земной поверхности. Целью данной работы являлось сопоставление данных, полученных этими сетями, для выявления общих аномальных вариаций перед сильными землетрясениями Камчатки. В статье приводятся новые сведения о развитии аномальных вариаций в поле подпочвенных газов и электрическом поле атмосферы перед двумя сильными землетрясениями Камчатки: 16 марта 2016 г. с  $M_w = 6.6$  и Жупановским землетрясением 30 января 2016 г. с  $M_w = 7.2$ . Приведенные данные демонстрируют процессы влияния эксхаляции подпочвенного радона и его дочерних продуктов на ионизационный баланс приземного слоя атмосферы. Сделан вывод о необходимости комплексирования различных методов регистрации геофизических полей, в том числе проведения прямых измерений деформации земной коры, для успешного развития подходов к прогнозу землетрясений.

**Ключевые слова:** полуостров Камчатка, подпочвенный радон, предвестник, землетрясение, наклоны земной поверхности, электрическое поле атмосферы

# Variations in the concentration of subsoil gases and the atmospheric electric field prior to some earthquakes in Kamchatka

Evgenii O. Makarov<sup>®</sup>, Rinat R. Akbashev, Vitaliy E. Glukhov <sup>®</sup>E-mail: ice@emsd.ru Kamchatka Branch of the FRC "United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences", Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

**Abstract.** In Kamchatka, there are continuous networks of observation of variations in subsoil gases, the atmospheric electric field, and the Earth's surface tilts. The aim of the study was to compare the data obtained by these networks to identify common anomalous variations prior to some strong earthquakes in Kamchatka. The article presents new information on the development of anomalous variations in the subsoil gas field and the atmospheric electric field prior to two strong earthquakes in Kamchatka: March 16, 2016, with  $M_w = 6.6$ , and the Zhupanovo earthquake on January 30, 2016, with  $M_w = 7.2$ . The presented data demonstrate the processes of influence of the exhalation of subsoil radon and its daughter products on the ionization balance of the surface layer of the atmosphere. A conclusion was made about the necessity of integrating various methods of recording geophysical fields, including direct measurements of crustal deformation, for the successful advancement of approaches to earthquake forecasting.

Keywords: Kamchatka Peninsula, subsoil radon, precursor, earthquake, Earth's surface tilts, atmospheric electric field

Для цитирования: Макаров Е.О., Акбашев Р.Р., Глухов В.Е. Вариации концентрации подпочвенных газов и электрического поля атмосферы перед некоторыми землетрясениями Камчатки. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 328–342. https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.328-342; https://www.elibrary.ru/homkeo

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-17-00125, «Физический анализ сейсмоэлектромагнитных явлений на Камчатском геодинамическом полигоне: модернизация системы наблюдений и теоретическое моделирование»). *For citation:* Makarov E.O., Akbashev R.R., Glukhov V.E. Variations in the concentration of subsoil gases and the atmospheric electric field prior to some earthquakes in Kamchatka. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 328–342. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.328-342; https://www.elibrary.ru/homkeo

## Funding

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation (project No. 22-17-00125, "Physical analysis of seismoelectromagnetic phenomena at the Kamchatka geodynamic test site: modernization of the observation system and theoretical modeling").

### Введение

Поток радона (<sup>222</sup>Rn), образующегося в результате распада радия в земной коре, очень чувствителен к изменениям геодинамического состояния среды. За счет своей радиоактивности Rn доступен для непрерывной и достаточно простой регистрации в воздухе подпочв. Это позволяет рассматривать его в качестве индикатора изменений структуры исследуемого участка земной коры, пористости, проницаемости каналов миграции газа [1–3].

Деформационные процессы, сопровождающие развитие будущего очага сильного землетрясения, способны вызвать аномалии в поле Rn. Сведения об информативности радонового метода для поиска предваряющих землетрясения аномалий, а также сводки известных радоновых предвестников приведены в ряде работ [4, 5]. По этим данным с привлечением наблюдений за динамикой подпочвенного радона перед землетрясениями с  $M \ge 5.0$ на п-ове Камчатка в работе [3] рассчитаны зависимости параметров радоновых предвестников от магнитуды и расстояния от эпицентра до пункта наблюдения. Относительно недавно опубликована сводка [6], в которой собраны все известные радоновые предвестники до 2015 г. Теоретические обоснования возможности возникновения предвестниковых аномалий достаточно полно изложены в работе [7].

Радоновые аномалии имеют различную длительность и время упреждения до момента возникновения землетрясения [3]. В литературе сравнительно редко встречаются описания среднесрочных и долгосрочных аномальных

вариаций в поле подпочвенного радона перед сильными землетрясениями. Длительные аномалии в виде трендов изменения концентрации радона отмечены для некоторых сильных землетрясений Японии. Перед разрушительным землетрясением Идзу-Осима (Izu Oshima) 14.01.1978 г. с  $M_{\rm w} = 7.0$  на расстоянии 30 км от эпицентра в течение 2.5 мес. наблюдалась аномалия концентрации подпочвенного Rn, синхронная с вертикальными деформациями земной поверхности [8, 9]. Перед мегаземлетрясением Тохоку (Япония) 11.03.2011 г. с  $M_{\rm w} = 9.0$  в воде артезианской скважины за 4.5 мес. до события начался рост объемной активности радона (ОАР), который продолжался и после землетрясения. Общая длительность аномалии составила 8 мес. [10].

Краткосрочные предвестники землетрясений с магнитудой M > 4.5 в поле подпочвенного Rn с временем упреждения до 15 сут были зарегистрированы во многих районах мира [3, 11–13].

В динамику поля подпочвенного радона существенный вклад вносят метеорологические величины (температура воздуха, атмосферное давление, осадки). Они обусловливают значительную зашумленность исходных данных, затрудняющую выделение предвестниковых аномалий [7, 14–16].

Длительные наблюдения за поведением ОАР на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПКГП) позволяют говорить о наличии определенной связи между ОАР и сильными землетрясениями с магнитудой  $M_{\rm W} > 5.5$ , происходящими в районе Камчатки [3].

Воздействие литосферы на атмосферу является составной частью взаимодействия твердой и газообразной геосферных оболочек. Оно определяется динамикой литосферных процессов и происходит интенсивно на границе соприкосновения геосфер, где происходит эманация радона в атмосферу. При этом наблюдаются возмущения в электрическом поле атмосферы. Наиболее сильно литосферно-атмосферное воздействие проявляется в сейсмоактивных регионах на заключительной стадии подготовки землетрясений, когда усиливается деформирование пород. В работах [17, 18] показана связь высокочастотной геоакустической эмиссии и электрического поля атмосферы. Эти результаты свидетельствуют о взаимодействии геосферных оболочек, в том числе вследствие изменения потока радона на большой площади в приповерхностный слой атмосферы [19].

Данная работа продолжает исследования влияния радона и его дочерних продуктов на ионизационный баланс приземного слоя атмосферы в процессе подготовки очага сильного землетрясения. Целью работы является ретроспективный анализ данных о вариациях электрического поля атмосферы во временной окрестности двух сильных землетрясений Камчатки, перед которыми ранее выявлялись аномалии в поле подпочвенных газов; сопоставление этих данных и анализ синфазных проявлений аномальных вариаций параметров; изучение деформаций земной поверхности по доступным наклономерным данным.

# Методика исследований и применяемая аппаратура

На ПКГП с 1998 г. работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов. За время работы сети в радоновом поле выделены два типа предвестниковых аномалий для субдукционных землетрясений с  $M_{\rm W} > 5.5$  [3]. Тип А регистрируется на нескольких пунктах в виде синфазных бухт длительностью от 3 до 12 сут и отражает масштабное проявление геодеформационных процессов на последней стадии подготовки землетрясения. Именно этот тип аномалий, предваряющих землетрясения, как

предполагается, связан с прохождением в геосреде уединенных деформационных волн, возникающих за счет квазипластичного или катакластического течения горных масс на последней стадии подготовки землетрясения. Тип Б регистрируется в единственном пункте наблюдений и связывается с особым состоянием гидрогеологической системы пункта регистрации [3].

В настоящее время сеть мониторинга подпочвенных газов включает 6 пунктов (рис. 1). Она оснащена современными аппаратно-программными средствами для сбора, обработки и хранения получаемых временных рядов с передачей данных в режиме, близком к реальному времени. Условия создания пунктов и расположения датчиков единообразны: все пункты располагаются в аллювиально-делювиальных отложениях речных долин; два датчика в зоне аэрации на глубинах 1 и 2 м от дневной поверхности. Установлены датчики атмосферной температуры и давления; в двух пунктах в подпочвенном воздухе регистрируются молекулярный водород и концентрация двуокиси углерода. Анализ получаемых данных и сопоставление их с данными сейсмического мониторинга продолжаются непрерывно, что позволяет выявлять аномальные изменения потока подпочвенного радона, предваряющие землетрясения. Подробно сеть пунктов описана в работе [3].

В Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) реализована сеть пунктов наблюдения градиента потенциала электрического поля атмосферы (V'ЭПА). Для сбора, хранения и предварительной обработки данных, а также контроля работоспособности аппаратуры разработан и внедрен аппаратно-программный комплекс на базе электростатического датчика типа «ЭФ-4». Данный комплекс позволяет передавать данные близко к реальному времени [20].

В одном из пунктов сети (PRTR1), расположенном на базе геотермального стационара Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН в долине р. Паратунка, помимо ОАР в почве регистрируется β- и γ-излучение в воздухе на высотах 2.5 и 5 м (рис. 2). Данный пункт был создан с целью проведения многофакторного эксперимента по изучению процессов переноса Rn в системе «литосфера–атмосфера» [21] и оснащен комплексом для регистрации концентрации подпочвенных газов [22].

После длительного перерыва на п-ове Камчатка в 2010 г. были возобновлены наблюдения за наклонами земной поверхности. Сеть наклономерных станций позволяет следить за деформациями земной коры в районе ПКГП [23]. Целью функционирования наклономерных станций является получение дополнительных данных о медленных движениях земной поверхности, обусловленных различными геодинамическими явлениями. В первую очередь это изучение связи деформации земной поверхности с региональной сейсмичностью, а также с подготовкой и динамикой вулканических извержений.

В работе использованы данные, полученные сетью мониторинга подпочвенных газов, данные градиента потенциала электрического поля атмосферы (V'ЭПА), а также данные

Рис. 1. Схема размещения пунктов регистрации концентрации подпочвенных газов, градиента потенциала электрического поля атмосферы, наклонов земной поверхности на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и границ областей, в пределах которых процесс подготовки землетрясений соответствующих магнитуд может вызвать в поле подпочвенного радона аномалии с относительной амплитудой  $\delta_{\min} \ge 20$ за вычетом нижней границы 95%-го доверительного коридора [3]. Звездой показаны эпицентры землетрясения 30.01.2016 г. с  $M_{\rm w} = 7.2$ и 16.03.2021 г. с  $M_{\rm w} = 6.6. \ 1$  – пункт регистрации ОАР; 2 - станция наклономерных наблюдений и пункт регистрации V'ЭПА. Заштрихованная область - г. Петропавловск-Камчатский.

**Fig. 1.** Location map of the points for registration of the subsoil gas concentration, atmospheric electric field potential gradients, earth's surface tilts at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon, also boundaries of areas within which the initiation process of earthquakes of corresponding magnitudes can cause anomalies in the subsoil radon field with a relative amplitude  $\delta_{\min} \ge 20$  minus the lower boundary of the 95% confidence corridor [3]. The stars show the epicenters of the earthquakes on January 30, 2016, with  $M_{\rm w} = 7.2$ , and on March 16, 2021, with  $M_{\rm w} = 6.6$ . (1) registration point of the radon volume activity (RVA); (2) station of tilt observations and registration point of the atmospheric electric potential gradient (PG). The shaded area indicates the city of Petropavlovsk-Kamchatsky.

наклонов земной поверхности на станциях РЕТТ и IVST (рис. 1), применяющих платформенные двухосевые пузырьковые сенсоры APPLIED GEOMECHANIX 701-2А производства Applied Geomechanics Inc, USA (https:// www.jewellinstruments.com). Описание станций наклономерных наблюдений и параметры установки регистрирующей аппаратуры изложены в [23]. Использованы также данные сейсмического мониторинга, в частности параметров описываемых сейсмических событий, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», развернутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания КФ ФИЦ ЕГС РАН № 075-00682-24.

# Землетрясение 16 марта 2021 г. с *M*<sub>w</sub> = 6.6

В акватории Тихого океана в районе Кроноцкого п-ова 16 марта 2021 г. на расстоянии 350 км от пунктов мониторинга ОАР на глуби-



не 65 км произошло землетрясение с  $M_{\rm W} = 6.6$  (рис. 1). Аномалии ОАР, предварявшие это землетрясение, синфазно возникли на нескольких пунктах сети, имели бухтообразную форму положительной полярности (пункты INSR, MRZR) и отрицательной полярности (пункт PRTR) и длительность ~6–18 сут. По амплитуде они превышали аналогичные вариации, связанные с резкими изменениями атмосферного давления. Относительная амплитуда [3] составила: на двух датчиках пункта INSR 180 и 46 %, в пункте MRZR 20, в пункте PRTR – 69 % (рис. 2 а, б). Время упреждения составило ~60 сут.

В работах [3, 19, 24] показано, что перед некоторыми землетрясениями Камчатки на ПКГП регистрируются водородные аномалии, имеющие характер коротких всплесков или биполярных импульсов. В ряде случаев такие аномалии возникали во временной окрестности с радоновыми и предваряли сильные землетрясения [3]. В пункте INSR датчиком молекулярного водорода, расположенным в стволе скважины НИС-1 на глубине ~5 м от оголовка, перед землетрясением 16 марта 2021 г. были зарегистрированы два аномальных всплеска (рис. 3 в), которые превышают по амплитуде вариации, связанные с суточными колебаниями атмосферного давления в бункере и возникающие в связи с особенностями организации данного пункта наблюдений [3].

Кроме того, с применением разрабатываемой методики выделения синфазных вариаций во временных рядах ОАР методом «айгеноскопии», позволяющим выявлять моменты коллективного поведения в многомерных рядах [3], выделенная радоновая аномалия была формализована и определена как возможный предвестник сильного землетрясения (рис. 3 г). Данная методика позволяет выявлять общность поведения в многомерных рядах различных данных, сигнализируя о возникновении синфазных вариаций превышением формируемой обобщенной кривой квартиля 0.95 ед. Величина квартиля определяется методикой автоматически, исходя из параметров входных данных. Подробно методика описана в работе [3].

В работе [25] приводятся сведения о гидрогеодинамическом предвестнике рассматриваемого землетрясения. Развитие выявленного предвестника приходится на период, когда в радоновом поле начали проявляться аномальные вариации. Не исключено, что возникновение предвестников в разных геофизических полях определяется деформационным процессом в земной коре, охватывающим большую площадь и связанным с подготовкой землетрясения 16 марта 2021 г.

Сведения о двух типах деформационных волн, выявленных по результатам трехлетнего инструментального мониторинга деформаций горных пород на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне, содержатся в работе [26]. Первый тип волн выражен во временных рядах данных единичными импульсами,



Рис. 2. Схема размещения датчиков для наблюдений за концентрацией почвенных газов на пункте PRTR1. 1 – газоразрядный счетчик  $\beta$ -излучения; 2 – газоразрядный счетчик  $\gamma$ -излучения; ВМ-8 – формирователь импульсов для регистрации  $\beta/\gamma$ -излучения в составе комплекса [22], ИБП – источник бесперебойного питания.

Fig. 2. Scheme of placement of sensors for monitoring of the soil gas concentration at the PRTR1 point. (1) gas-discharge counter of  $\beta$ -radiation; (2) gas-discharge counter of  $\gamma$ -radiation; VM-8 indicates pulse generator for recording  $\beta / \gamma$ -radiation as part of the complex [22].

**GEOPHYSICS, SEISMOLOGY** 

проходящими через все точки мониторинга. Их источники находятся за пределами пунктов мониторинга и порождаются медленными смещениями по разломам. Приведен пример возникновения такого деформационного импульса, инициированного треморподобным смещением по сейсмоактивному разлому, предварявшим основное сейсмогенное смещение, возникшее 29.03.2019 г. с реализацией землетрясения энергетического класса  $K_s = 13.3$  [26].

Скорость миграции импульса составила 1.3 м/с [26]. Выделенные деформационные волны второго типа проявляются чаще, чем первого, и представлены симметричными или асимметричными импульсами с амплитудами меньше на порядок, чем у волн первого типа. Их происхождение, как предполагается в рабо-



**Рис. 3.** Динамика OAP по данным газоразрядных счетчиков (ГС) в пунктах INSR (а), MRZR и PRTR (б); концентрация молекулярного водорода в пункте INSR (в); вариации атмосферного давления и временной ряд, построенный по методу «айгеноскопии» (г), за период 1 января – 24 марта 2021 г. Момент землетрясения показан красной вертикальной линией, аномалии выделены светло-серым цветом, периоды прогноза показаны внизу светло-синими прямоугольниками.

**Fig. 3.** Dynamics of the RVA according to the data of gas-discharge counters ( $\Gamma$ C) at the INSR (a), MRZR, and PRTR points (6); the concentration of molecular hydrogen at the INSR point (B); variations in atmospheric pressure and the time series constructed using the "eigenoscopy" method (r), for the period from January 1 to March 24, 2021. The moment of the earthquake is shown by the red vertical line, anomalies are highlighted in light gray, and the forecast periods are shown below by light blue rectangles.

те [26], связано с перераспределением напряжений в разломно-блоковой структуре верхней части земной коры в пределах пунктов мониторинга, и частота их проявления существенно возрастает перед ближними землетрясениями. Скорость миграции деформационных волн второго типа за несколько дней до землетрясения резко возрастает (с ~5 до ~50 км/сут), затем снижается.

Основываясь на работах [3, 26], можно предположить, что аномальные вариации радона, зарегистрированные на ПКГП перед землетрясением 16 марта 2021 г. с  $M_{\rm w} = 6.6$ , связаны с воздействием на геосреду нескольких деформационных импульсов. Эти импульсы прошли через все точки регистрации, вызывая изменения проницаемости грунта, что привело к изменению потока радона в местах установки датчиков. Вероятная область генерации таких импульсов связана с пространственным расположением будущего очага, а возникновение в ней деформаций, подобных процессам неупругого деформирования (крип) [27, 28], указывает на заключительную стадию подготовки землетрясения. Достаточно длительные времена аномалии (до 18 сут) и упреждения также указывают, что процессы заключительной стадии подготовки этого землетрясения были растянуты во времени и, вероятно, связаны с крипом горных пород.

Развитие аномалий сопровождалось изменением направления движения наклонов, зарегистрированных наклономерными станциями (рис. 1, рис. 4).

До момента возникновения землетрясения ход наклонов на векторных диаграммах (рис. 4) показан синим цветом, после – зеленым. Красным цветом выделены участки, которые соответствуют временным периодам возникновения аномалий в поле ОАР (на рис. 3). Перед землетрясением приоритетным являлось движение для станции PETT в юго-западном направлении, для станции IVST – практически строго на север (отклонение по азимуту 20°), параллельно простиранию глубоководного желоба. На обеих кривых наблюдается осложнение движения с резкими изменениями направлений наклонов перед землетрясением. При этом на кривой РЕТТ такое изменение совпадает по времени с развитием аномалий ОАР на сети пунктов. Можно предположить, что такие вариации наклонов, предваряющие землетрясение 16 марта 2021 г., связаны с деформационными импульсами, которые возникли в районе будущего очага в результате крипа горных пород и распространялись вдоль глубоководного желоба и наиболее крупных разломов, к которым приурочены пункты мониторинга ОАР.

После землетрясения движение наклонов вновь стабилизировалось, но направления изменились. Для станции РЕТТ ход наклонов продолжился в юго-восточном направлении в сторону глубоководного желоба, а для станции IVST сменился на юго-западное. Полученный результат является уникальным. Он демонстрирует большие возможности комплексирования двух методов мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния среды, связанных с подготовкой очагов сильных землетрясений. Использование векторных диаграмм хода наклонов дает существенно больше информации о происходящих в земной коре деформационных процессах, что позволяет, с опорой на эту информацию, повысить надежность выделения предваряющих землетрясения аномалий в различных геофизических полях.

Анализ и сопоставление данных V'ЭПА с вариациями подпочвенного радона позволили выявить совпадающие по времени аномальные вариации параметров, возникшие за ~13 ч перед землетрясением 16 марта 2021 г.

На рис. 5 приведены кривые ОАР на пунктах MRZR и PRTR1,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения на пункте PRTR1, градиент потенциала электрического поля атмосферы в пункте PETT и метеопараметры за период 12–19 марта 2021 г. На кривых отчетливо визуально выделяются аномальные вариации длительностью ~30 ч в ОАР (MRZR, PRTR1), ~24 ч в  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучении. На кривой V'ЭПА аномальная вариация хорошо просматривается сразу после сейсмического события и длится ~2 ч. До землетрясения в электрическом поле наблюдаются резкий короткий отрицательный импульс и два осложненных биполярных импульса, выделенных в результате сопоставления с данными радоновых наблюдений. Электрическое поле приземного слоя атмосферы очень чутко реагирует на изменения метеорологических параметров. Это хорошо видно на кривой V'ЭПА, где выделен синим цветом отклик поля на циклоническую активность, выраженную снегопадом и ветром. Как видно из рис. 5 д, резкие изменения атмосферного давления и температуры воздуха на ПКГП в период, когда были выделены аномалии, отсутствовали. Падение давления незначительно и не могло вызывать отклик в ОАР. Кривая осадков за указанный период в области предполагаемой аномалии (рис. 5 е) свидетельствует о выпадении около 2 мм снега. Такое количество осадков не оказывает воздействия на вариации подпочвенных газов, как было отмечено в работе [3], однако могло вызывать реакцию в V'ЭПА. Эффективной методики оценки или математического подхода к устранению влияния метеопроцессов на записи вариаций электрического поля атмосферы не существует, однако в некоторых отдельных случаях выделение аномалий, в сопоставлении с данными радоновых наблюдений, становится возможным. Требуется дальнейший ретроспективный анализ большего числа случаев возникновения аномалий в V'ЭПА и поле подпочвенного радона перед сильными сейсмическими событиями Камчатки.

В пункте PRTR1 на двух высотах над землей располагаются датчики β-, у-излучения. На высоте 2.5 м число β-импульсов в минуту превышает аналогичное излучение на высоте 5 м, что связано с эксхаляцией и распадом радона и его дочерних продуктов. На высоте 5 м число у-импульсов начинает преобладать над ү-импульсами на высоте 2.5 м, что может быть связано с радиоактивностью космических лучей или иными причинами. Этими датчиками в 2011 г. были зарегистрированы аномалии, связанные с захватом циклоном радиоактивных аэрозолей техногенного происхождения в районе атомной станции Фукусима (Япония) [29], что свидетельствует о высокой чувствительности созданной системы регистрации.

В период 12–19 марта 2021 г. в потоке β- и γ-излучения выделяются аномальные вариации. Одновременно с этим на датчике, расположенном на глубине 1.5 м (см. рис. 2), наблюдается сначала незначительное увеличе-



**Рис. 4.** Векторные диаграммы наклонов на станциях РЕТТ (а) и IVST (б), зарегистрированные перед землетрясением 16 марта 2021 г. с  $M_w = 6.6$  (ЗТ (6.6)). Черной стрелкой показано направление движения станции. Описание цветных участков кривой приведено в тексте.

Fig. 4. Vector diagrams of tilts at the PETT (a) and IVST (6) stations recorded prior to the earthquake of March 16, 2021, with  $M_w = 6.6$  (3T (6.6)). Black arrow shows the direction of station movement. Descriptions of the colored sections of the curve are given in the text.



**Рис. 5.** Динамика ОАР в пунктах MRZR, PRTR1 (а), γ- и β-излучения в пункте PRTR1 (б, в), двуокиси углерода в пункте INSR и V'ЭПА в пункте РЕТТ (г), вариации атмосферного давления и температуры (д), осадков (е) за период 12–19 марта 2021 г. Момент землетрясения обозначен черной вертикальной линией, аномалии выделены светло-серым цветом. Постсейсмические вариации в концентрации двуокиси углерода и V'ЭПА отмечены черными стрелками. Синим цветом на кривой V'ЭПА показан отклик на циклоническую активность.

**Fig. 5.** Dynamics of the RVA at the MRZR and PRTR1 points (a),  $\gamma$  and  $\beta$  radiation at PRTR1 (6, B), carbon dioxide at INSR and PG at PETT (r), variations in atmospheric pressure and temperature ( $\alpha$ ), and in precipitation (e) for the period March 12–19, 2021. The moment of the earthquake is shown by a black vertical line; anomalies are highlighted in light gray. Post-seismic variations in carbon dioxide concentration and PG are shown by black arrows. The blue color on the PG curve shows the response to cyclonic activity.

ние OAP, а затем бухтообразное уменьшение, что может говорить об увеличении проницаемости породы вследствие деформационного импульса растяжения в данном районе. Вероятно, под воздействием этого процесса увеличился поток радона из зоны аэрации верхнего слоя грунта в атмосферу, что и было зарегистрировано датчиками на высотах 2.5 и 5 м.

Обращает на себя внимание увеличение концентрации двуокиси углерода (рис. 5 г) в пункте INSR, организованном на базе скважины НИС-1. Ранее в этом пункте наблюдались аномальные постсеймические эффекты после Жупановского землетрясения с  $M_w = 7.2$  [3]. Вероятно, незначительные изменения проницаемости верхнего слоя рыхлых отложений в зоне аэрации, где располагается датчик, возникшие в результате воздействия сейсмических волн, привели к изменению потока двуокиси углерода, что и было зарегистрировано. Последующее за землетрясением перераспределение напряжений земной коры также могло привести к такому результату.

В данных V'ЭПА зафиксирован короткий аномальный биполярный всплеск практически сразу после землетрясения (рис. 5 г), который свидетельствует об изменении электрического поля атмосферы. Это изменение, возможно, было вызвано ионизацией вследствие выделения некоторого количества избыточного радона на большой площади в районе пункта PRTR в результате изменения проницаемости верхнего слоя отложений. В показателях датчиков радона появление незначительного избыточного его объема не отразилось, поскольку они расположены в накопительных емкостях и вследствие этого регистрируют лишь локальные изменения потока, а также инерционны, так как регистрация осуществляется по излучению дочерних продуктов распада радона.

Следует отметить, что аномалии в потоке β- и γ-излучения начались ранее, чем осадки (рис. 5 в, г, е), и так же ранее закончились, что подтверждает их связь с вариациями радона в подпочвенном воздухе, возникшими вследствие геодинамических процессов при подготовке и реализации очага землетрясения 16 марта 2021 г.

# Жупановское землетрясение 30 января 2016 г. с *M*<sub>w</sub> = 7.2

Жупановское землетрясение (ЖЗ) с  $M_{\rm w} = 7.2$ , глубиной очага ~170 км и эпицентром в ~100 км к северу от Петропавловска-Камчатского (рис. 1) произошло 30.01.2016 г. Предвестниковые аномалии перед ЖЗ зафиксированы по данным мониторинга вариаций уровня воды в скважинах, наблюдения за электромагнитным ОНЧ-излучением, мониторинга вариаций геоакустической эмиссии в глубокой скважине, комплексного анализа сейсмологических данных, мониторинга вариаций параметров приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума, вариаций отношения скоростей сейсмических волн  $V_{\rm p}/V_{\rm s}$ [30]. На сети пунктов мониторинга на ПКГП в динамике подпочвенных газов перед и после этого землетрясения был обнаружен ряд уникальных эффектов [3, 31].

В динамике молекулярного водорода была зарегистрирована аномалия на двух датчиках  $H_2$  (TGS82 и ВСГ-02), которые располагались в стволе скважины на глубине 5 и 9 м от оголовка. Аномалия представляла собой квазипрямоугольный импульс длительностью ~6 сут и относительной амплитудой  $\delta \approx 73.5$  % и хорошо визуально диагностировалась в реальном времени при стандартной методике обработки получаемых данных (рис. 6 б). Вступление аномалии на датчиках  $H_2$  было зарегистрировано в 4:30 20.01.2016 г. Аномалии развивались ~14 ч с последующим выходом на плато длительностью 4.5 сут.

На графиках ОАР перед ЖЗ в зоне аэрации в пунктах КRKR, PRTR1 и INSR в период 01.01–10.02.2016 г. синфазно выделяется бухтообразное отрицательное возмущение (рис. 6), которое синфазно проявилось в концентрации H<sub>2</sub>. Относительная амплитуда аномалий составила:  $\delta_{\text{КRKR}} = -17 \%$ ,  $\delta_{\text{рRTR1}} = -80 \%$ ,  $\delta_{\text{INSR}} = -37 \%$ , а время упреждения  $t_{\text{упр}} = 10$  сут. На динамику подпочвенного Rn в зоне аэрации существенное влияние оказывают вариации атмосферного давления. Как видно на рис. 6 б, связь аномалии с атмосферным давлением не отмечается.

При сопоставлении данных V'ЭПА с вариациями подпочвенного радона выявлено в электрическом поле атмосферы аномальное возмущение, возникшее за ~5 сут. перед ЖЗ. Максимальные значения напряжения поля превысили динамический диапазон регистрирующей аппаратуры.

Вероятно, уменьшение стока радона в нижний слой атмосферы на большой площади земной поверхности привело к изменению ионизационного баланса и увеличению напряжения электрического поля. Временная задержка между аномалиями ОАР и V'ЭПА составила 4.8 сут. Датчики ОАР располагаются на глубинах ~2–4 м от дневной поверхности, что позволяет оценить скорость миграции радона. Она составила от  $0.5 \cdot 10^{-3}$  до  $1.0 \cdot 10^{-3}$  см/с. Эти значения близки к сделанным ранее оценкам скорости миграции радона к поверхности в пунктах INSR (v =  $2.1 \cdot 10^{-3}$  см/с) и PRTR (v =  $1.7 \cdot 10^{-3}$  см/с) [3], что подтверждает предположение о связи аномалии V'ЭПА с уменьшением потока радона перед ЖЗ.



**Рис. 6.** Осредненные скользящим средним в 2.5-часовом окне кривые ОАР в зоне аэрации в пунктах KRKR, PRTR1 и INSR (a), концентрация водорода и атмосферное давление в пункте INSR (б), V'ЭПА в пункте PETT за период с 1 января по 10 февраля 2016 г. (в). Предвестниковые аномалии выделены серым и штриховкой.

**Fig. 6.** The RVA curves in the aeration zone at the KRKR, PRTR1, and INSR points, averaged by the moving average in a 2.5-hour window (a), the hydrogen concentration and atmospheric pressure at the INSR point (6), and PG at the PETT point for the period from January to February 10, 2016 (B). Precursor anomalies are highlighted in gray and shaded.

# Заключение

Влияние радона и его дочерних продуктов на ионизационный баланс приземного слоя атмосферы определяется интенсивностью эксхаляции подпочвенного радона и метеорологическими условиями (конвекция, турбулентность и стратификация приземного слоя атмосферы). Поиск короткопериодных вариаций электрического поля атмосферы, связанных с активизацией деформационных процессов, осложнен погодными условиями. Эффективной методики оценки или компенсации влияния метеопроцессов на записи вариаций электрического поля атмосферы не существует, однако в некоторых отдельных случаях выделение аномалий, в сопоставлении с данными радоновых наблюдений, становится возможным. Эти случаи, как правило, связаны с такими погодными условиями в пункте наблюдения, при которых действие локальных источников образования объемных электрических зарядов минимально (скорость ветра менее 6 м/с, отсутствие облачности и сильных магнитных возмущений). Периоды хорошей погоды для Камчатского региона, как правило, отвечают характеру антициклональной атмосферной циркуляции, что отмечается безоблачной погодой и удалением от пункта регистрации активных генераторов электрического поля атмосферы за счет вертикального переноса воздушных масс к поверхности Земли. Такие условия обеспечивают наибольшее влияние эксхаляции радона с поверхности Земли на электрическое поле атмосферы.

Обнаруженные ретроспективно аномальные возмущения в электрическом поле атмосферы, совпадающие по времени с вариациями подпочвенных газов и потока γ/β- импульсов и предваряющие землетрясения 16 марта 2021 г. и Жупановское землетрясение 30 января 2016 г., можно рассматривать как свидетельство воздействия верхнего слоя земной коры на приземную атмосферу во время подготовки и реализации данных событий.

Использование данных о наклонах земной поверхности дает существенно больше информации о происходящих в земной коре деформационных процессах, что позволяет, с опорой на эту информацию, повысить надежность выделения предваряющих землетрясения аномалий в различных геофизических полях.

Крайне важным для экспертной оценки и выделения предваряющих землетрясения аномалий в динамике подпочвенных газов, на фоне изменений, связанных с другими процессами, является обнаружение синфазных вариаций на нескольких пунктах регистрации. Необходимо также комплексирование различных методов регистрации геофизических полей, в том числе прямых измерений деформации земной коры, и выделение реперных точек коллективного аномального поведения в рядах данных при их сопоставлении, что позволит развивать методы прогноза землетрясений и дополнительно обосновывать заключения о сейсмической опасности.

## Список литературы

- 1. Рудаков В.П. **2009.** Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Науч. мир, 175 с.
- 2. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014.** Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 349 с.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. 2018. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 148 с.
- Hauksson E. 1981. Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis. J. of Geophysical Research: Solid Earth, 86: 9397–9410. https://doi.org/10.1029/ jb086ib10p09397
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A. 2009. Systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008
- Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. 2015. Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. J. of Earth Science and Climatic Change, 6(6): 000282. https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000282
- Immè G., Morelli D. 2012. Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis-statistical studies, observations and planning*, p. 143–160. https://doi.org/10.5772/29917
- Wakita H. 1981. Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. https://doi.org/10.1029/ME004p0527
- 9. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behaviour as an earthquake precursor. *Current Science*, 9(86): 1288–1292.

- Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. 2011. Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Taiwan-Japan Intern. Workshop on hydrological and geochemical research for earthquake prediction, October 25, Taiwan. National Cheng Kung University, Tainan, p. 29–35.
- İnan S., Akgu T., Cemil S., et al. 2008. Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. J. of Geophysical Research: Solid Earth, 113: B03401. https://doi.org/10.1029/2007jb005206
- Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahcı F. 2009. Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1(279): 159–164. https://doi. org/10.1007/s10967-007-7211-2
- Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. 2019. Исследование информативности объемной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 4(44): 73–83. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83; EDN: IMOXJB
- Piersanti A., Cannelli V., Galli G. 2016. The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. https://doi. org/10.5194/se-7-1303-2016
- Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. 2018. Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028). https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5
- Паровик Р.И. 2014. Математические модели классической теории эманационного метода. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 128 с.
- Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Мищенко М.А., Шевцов Б.М. 2010. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом процессе. Доклады Академии наук, 431(2): 242–245.
- Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. 2014. Анализ проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и электрическим полем в атмосфере у поверхности земли. Вулканология и сейсмология, 3: 53–64. DOI: 10.7868/ S0203030614030055; EDN: SFAJLB
- Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В. 2006. Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле, 1(7): 102–109.
- 20. Akbashev R.R., Firstov P.P., Budilov D.I., Zavodevkin I.A. **2022.** Monitoring the potential gradient

of the electric field the atmosphere on the Kamchatka Peninsula and on the Paramushir Island (Kuril Islands). *AIP Conference Proceedings, CAMSTech-II 2021*, 080013. https://doi.org/10.1063/5.0092738

- 21. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. 2009. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера–атмосфера». Аппаратура и новости радиационных измерений, 4: 55–60.
- 22. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н. 2012. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки. Сейсмические приборы, 48(2): 5–14. EDN: RAHAYB
- 23. Глухов В.Е., Макаров Е.О., Болдина С.В. 2023. Аппаратурно-программный комплекс сети наклономерных наблюдений за деформационными процессами на полуострове Камчатка. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 44(3): 157–172. https:// doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-157-172
- 24. Фирстов П.П., Широков В.А. 2005. Динамика молекулярного водорода и её связь с геодеформационными процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999–2003 гг. *Геохимия*, 11: 1151–1160. EDN: HSCWCX
- 25. Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А. 2022. Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка. Геодинамика и тектонофизика, 13(2): 0594. https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2-0594
- Борняков С.А., Салко Д.В., Шагун А.Н., Добрынина А.А., Усынин Л.А. 2019. Медленные деформационные волны как возможный предвестник сейсмической опасности. *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 267–276. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.267-276
- Dieterich J.H. 2007. 4-04 Applications of rate- and state-dependent friction to models of fault-slip and earthquake occurrence. *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, 4(107): 93–110. https://doi.org/10.1016/ B978-0-444-53802-4.00075-0
- 28. Ohnaka M. **2013.** *The physics of rock failure and earth-quakes.* Cambridge Univ. Press, 270 p.
- 29. Nagorskiy P.M., Cherepnev M.S., Firstov P.P., Makarov E.O. **2014.** Consistency of component variations of ionizing radiation and atmospheric-electric values. In: *XV Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, USA*, 4.
- 30. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А., Митюш-

кина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сенюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В. **2016.** Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ , I = 6 (Камчатка). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 29(1): 5–16. EDN: VSNTCB

 Болдина С.В., Копылова Г.Н. 2017. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., Мw=7.2, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 863–880. https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0321

# References

- 1. Rudakov V.P. **2009.** [*Emanation monitoring of the geoenvironments and processes*]. M.: Nauch. Mir, 175 p. (In Russ.).
- 2. Adushkin V.V., Spivak A.A. 2014. [*Physical fields in near-surface geophysics*]. M.: GEOS, 349 p. (In Russ.).
- 3. Firstov P.P., Makarov E.O. **2018.** [*Dynamics of subsoil radon in Kamchatka and strong earthquakes*]. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamGU im. Vitusa Beringa, 148 p. (In Russ.).
- Hauksson E. 1981. Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis. J. of Geophysical Research: Solid Earth, 86: 9397–9410. https://doi.org/10.1029/ jb086ib10p09397
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A. 2009. Systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. https://doi.org/10.1016/j. tecto.2009.06.008
- Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. 2015. Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. J. of Earth Science and Climatic Change, 6(6): 000282. https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000282
- Immè G., Morelli D. 2012. Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning*, p. 143–160. https://doi.org/10.5772/29917
- Wakita H. 1981. Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. https://doi.org/10.1029/ME004p0527
- 9. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behaviour as an earthquake precursor. *Current Science*, 9(86): 1288–1292.
- Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. 2011. Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Taiwan-Japan Intern: Workshop on hydrological and geochemical research for earthquake prediction, October 25, Taiwan. National Cheng Kung University, Tainan, p. 29–35.

- Inan S., Akgu T., Cemil S. 2008. Geochemical monitoring in the Marmara region (NWTurkey): A search for precursors of seismic activity. J. of Geophysical Research, 113: B03401. https://doi.org/10.1029/2007JB005206
- Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahcı F. 2009. Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical* and Nuclear Chemistry, 1(279): 159–164. https://doi. org/10.1007/s10967-007-7211-2
- Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. 2019. Investigation of informative value of volume radon activity in soil during both the stress build up and tectonic earthquakes in the South Kuril Region. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 4(44): 73–83. (In Russ.). https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83
- Piersanti A., Cannelli V., Galli G. 2016. The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. https://doi. org/10.5194/se-7-1303-2016
- Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. 2018. Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028). https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5
- 16. Parovik R.I. **2014.** [*Mathematical models of the classical theory of the emanation method*]. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamGU im. Vitusa Beringa, 128 p. (In Russ.).
- 17. Marapulets Yu.V., Rulenko O.P., Mishchenko M.A., Shevtsov B.M. **2010.** [Relationship of high-frequency geoacoustic emission and electric field in the atmosphere in seismotectonic process]. *Doklady Akademii nauk*, 431(2): 242–245. (In Russ.).
- Rulenko O.P., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A. 2014. An analysis of the relationships between highfrequency geoacoustic emissions and the electrical field in the atmosphere near the ground surface. *Journal of Volcanology and Seismology*, 8(3): 183–193. https://doi.org/10.1134/s0742046314030051
- Firstov P.P., Cherneva N.V., Ponomarev E.A., Buzevich A.V. 2006. Subsoil radon and electric field intensity in the atmosphere in case of Petropavlovsk-Kamchatsky Geodynamic Chain in 1998–2003. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences, 1(7): 102–109. (In Russ.).
- Akbashev R.R., Firstov P.P., Budilov D.I., Zavodevkin I.A. 2022. Monitoring the potential gradient of the electric field the atmosphere on the Kamchatka Peninsula and on the Paramushir Island (Kuril Islands). *AIP Conference Proceedings, CAMSTech-II 2021*, 080013. https://doi.org/10.1063/5.0092738
- Yakovleva V.S., Karataev V.D., Vukolov A.V. Ippolitov I.I., Kabanov M.V., Nagorskii P.M., Smirnov S.V., Firstov P.P., Parovik R.I. 2009. [Meth-

odology of a multi-factor experiment on the processes of radon transfer in "lithosphere–atmosphere" system]. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, 4: 55–60. (In Russ.).

- Makarov E.O., Firstov P.P., Voloshin V.N. 2013. Hardware complex for recording soil gas concentrations and searching for precursor anomalies before strong earthquakes in South Kamchatka. *Seismic Instruments*, 49: 46–52. https://doi.org/10.3103/s0747923913010064
- Glukhov V.E., Makarov E.O., Boldina S.V. 2023. Hardware and software complex of the tilt-measuring observations network of deformation processes on the Kamchatka Peninsula. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin of KRAESC. Physical and Mathematical Siences*, 44(3): 157–172. (In Russ.). https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-157-172
- 24. Firstov P.P., Shirokov V.A. **2005.** Dynamics of molecular hydrogen and its relation to deformational processes at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Test Site: evidence from observations in 1999–2003. *Geochemistry International*, 43(11): 1056–1064.
- Boldina S.V., Kopylova G.N., Kobzev V.A. 2022. Study of seismic effects on changes in groundwater pressure: Equipment and some well observation results for the Kamchatka Peninsula. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(2): 0594. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2022-13-2-0594
- 26. Bornyakov S.A., Salko D.V., Shagun A.N., Dobrynina A.A., Usynin L.A. 2019. The slow deformation waves as a possible precursor of seismic hazard. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(3):

### Об авторах

Сотрудники Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН):

Макаров Евгений Олегович (https://orcid.org/0000-0002-0462-3657), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустического и радонового мониторинга, ice@emsd.ru

Акбашев Ринат Рафикович (https://orcid.org/0000-0002-0737-9610), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории дегазации литосферы, arr@emsd.ru

Глухов Виталий Евгеньевич (https://orcid.org/0009-0003-7098-6469), инженер, лаборатория исследований и мониторинга сильных землетрясений, glukhov v@emsd.ru

Поступила 25.10.2024 Принята к публикации 27.11.2024 267-276. (In Russ.). https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.267-276

- Dieterich J.H. 2007. 4-04 Applications of rate- and state-dependent friction to models of fault-slip and earthquake occurrence. *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, 4(107): 93–110. https://doi.org/10.1016/ B978-0-444-53802-4.00075-0
- 28. Ohnaka M. **2013.** *The physics of rock failure and earth-quakes.* Cambridge Univ. Press, 270 p.
- Nagorskiy P.M., Cherepnev M.S., Firstov P.P., Makarov E.O. 2014. Consistency of component variations of ionizing radiation and atmospheric-electric values. In: XV Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, USA, 4.
- 30. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Ivanova E.I., Matveenko E.A., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A., Pavlov V.M., Raevskaya A.A., Saltykov V.A., Senyukov S.L., Serafimova Yu.K., Skorkina A.A., Titkov N.N., Cebrov D.V. **2016.** The January 30<sup>th</sup>, 2016 earthquake with  $K_{\rm s} = 15.7$ ,  $M_{\rm w} = 7.2$ , I = 6 in the Zhupanovsky region (Kamchatka). Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences, 29(1): 5–16. (In Russ.).
- Boldina S.V., Kopylova G.N. 2017. Effects of the January 30, 2016, M<sub>w</sub> = 7.2 Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YU Z-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 863–880. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0321

### About the Authors

Employees of the Kamchatka Branch of the Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (KB FRC UGS RAS):

**Makarov, Evgenii O.** (https://orcid.org/0000-0002-0462-3657), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Laboratory of acoustic and radon monitoring, ice@emsd.ru

Akbashev, Rinat R. (https://orcid.org/0000-0002-0737-9610), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Researcher, Laboratory of lithosphere degassing, arr@emsd.ru

**Glukhov, Vitalii E.** (https://orcid.org/0009-0003-7098-6469), Engineer, Laboratory of strong earthquake research and monitoring, glukhov v@emsd.ru

> Received 25 October 2024 Accepted 27 November 2024