

Перспективы совместного мониторинга водорода, аэроионов и радона с целью выявления аномалий перед сильными землетрясениями

Акбашев Р.Р.¹, Макаров Е.О.^{1,2}, Будилов Д.И.¹, Рындин Д.В.³

Prospects for monitoring hydrogen, air ions and radon to detect anomalies before strong earthquakes

Akbashev R.R., Makarov E.O., Budilov D.I., Ryndin D.V.

¹ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: arr@emsd.ru

² Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН, Феодосия, Россия

³ ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга», г. Петропавловск-Камчатский

В лаборатории акустического и радонового мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН реализуется комплексный мониторинг радона, аэроионов и водорода с целью повышения эффективности выявления аномалий, связанных с подготовкой сильных землетрясений. Совместный анализ этих параметров позволяет повысить достоверность выделения предвестниковых явлений.

Введение

Длительный мониторинг изменений концентрации аэроионов представляет собой относительно новый метод исследования геофизических полей, который используется для выявления аномалий, предшествующих сильным землетрясениям [1, 3-5, 9]. Существуют две основные теории, объясняющие аномалии в концентрации аэроионов в приземном слое атмосферы: теория, связывающая ионизацию с изменениями в концентрации радона перед землетрясениями [7, 8]; теория электронных носителей заряда [6].

В статье [9] представлены результаты наблюдений накануне и после землетрясения, которое произошло в Южной Напе, Калифорния, 24 августа 2014 г. И имело магнитуду $M=6$. Эти данные представлены на рис. 1. Авторы обращают внимание на то, что аномалии в вариациях аэроионов невозможно объяснить с точки зрения теорий их генерации радоном или теории электронных дырок.

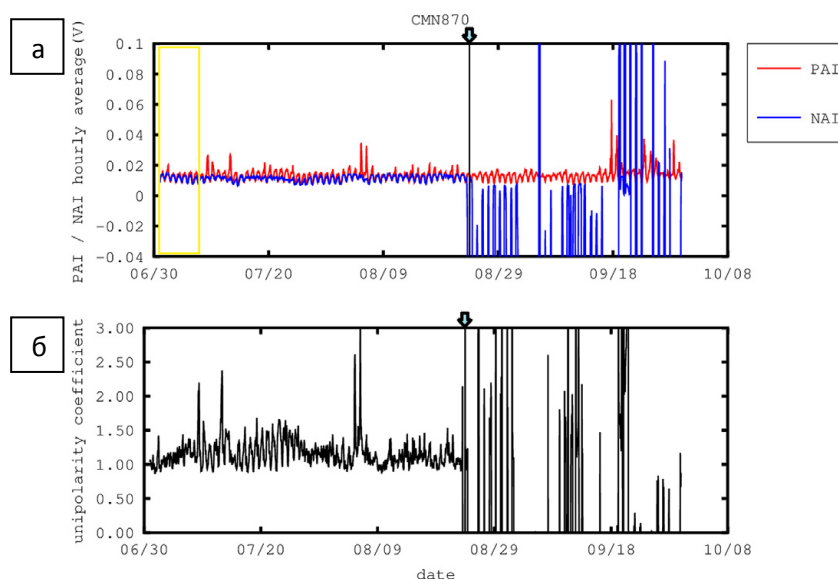


Рис. 1. Из статьи [9]. а) Временные ряды PAI и NAI за период с 01.07.2014 по 30.09.2014 для станции 870, расположенной в Бенисии, Калифорния, США. Данные были усреднены с использованием интервала в 1 час. б) Коэффициент однополярности, рассчитанный по временным рядам PAI и NAI. Вертикальная линия указывает на дату землетрясения магнитудой $M=6$ в Южной Напе, которое произошло 24 августа 2014 года.

Методика исследований

Для исследования корреляции радона и концентрации аэроионов в спокойный период и в период подготовки сильного землетрясения, на базе существующей сети мониторинга объемной активности радона (ОАР) на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне [2] с января 2025 г. начаты наблюдения за вариациями концентрации аэроионов в пункте наблюдения на сейсмостанции «Петропавловская» (далее PET) (рис. 2).

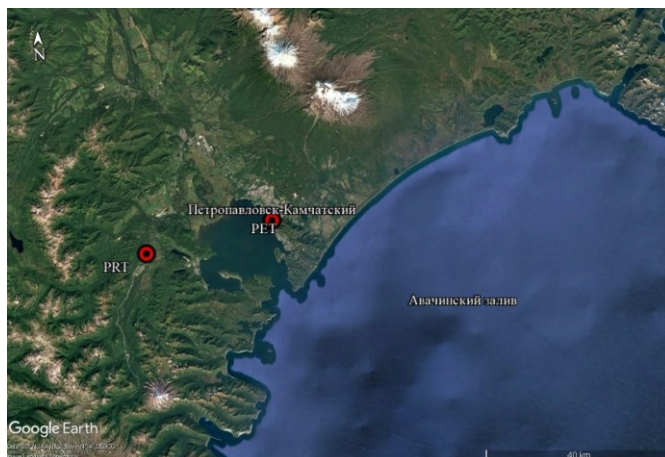


Рис. 2. Пункты наблюдения: PET – сейсмостанция «Петропавловская», PRT – «Паратунка».

Автономная станция для дистанционного мониторинга концентрации ионов состоит из модернизированного счетчика ионов «Сапфир-3М» [1, 4], источника бесперебойного питания, микрокомпьютера с доступом в сеть Интернет.

Регистрация вариаций молекулярного водорода ведется в пункте наблюдения PRT (п. Паратунка) (рис. 2), мониторинг реализован на базе датчика водорода Figaro TGS821 и дата-логгера Allmemo [2].

Получены непрерывные ряды данных в период до и после сильнейшего за 70 лет землетрясения, произошедшего 29 июля 2025 г. у побережья п-ова Камчатка.

Результаты измерений

Основным источником ионов в приземной атмосфере служит радон. Этот газ образуется в гранитных, магматических, метаморфических породах; его период полураспада составляет 3.8 суток. Следовательно, концентрация радона на поверхности выше в тех районах, где указанные породы залегают ближе к земной поверхности.

В связи с этим для наблюдений была выбрана сейсмостанция PET, которая размещена на скальном основании (сланцах). На PET значения ОАР, как правило, выше фоновых в 2-3 раза (1500-5000 Бк/м³).

По первым результатам наблюдений была произведена оценка корреляции ОАР и отрицательных ионов. Для оценки данные ионов были преобразованы в среднее значение за 30 мин., вариации ОАР сглажены скользящим средним с окном 5 значений. Эллипс построен с доверительной вероятностью 95 %, коэффициент корреляции Пирсмана составил $\rho=0.97$.

20 июля 2025 г. в 06:49 (время здесь и далее по UTC) произошло землетрясение с магнитудой 7.4, ставшее форшоком к основному землетрясению, которое произошло 29 июля 2025 г. в 23:30 с магнитудой 8.8. Рассмотрим вариации ионов за период с 1 мая по 14 августа 2025 г. (рис. 3).

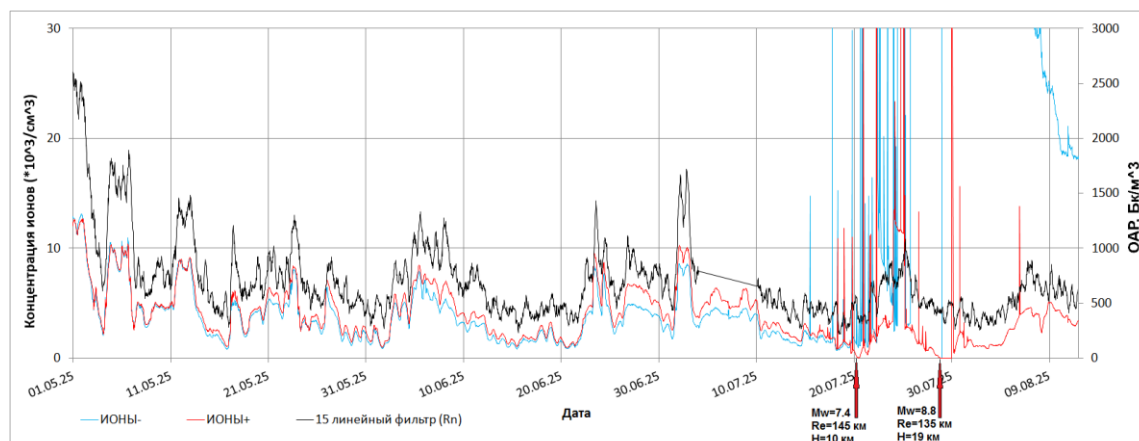


Рис. 3. Вариации аэроионов и ОАР на пункте наблюдений РЕТ за период с 01.05.2025 по 14.08.2025 гг.

На пункте наблюдений РЕТ в период до 15 июля были зафиксированы стабильные флуктуации в концентрации аэроионов обоих зарядов. С 15 июля впервые зарегистрированы импульсные сигналы в отрицательных ионах, повторные проявления которых наблюдались 18 июля. 19 июля также зарегистрированы первые импульсные сигналы в вариациях положительных ионов.

После форшока 20 июля отмечалось увеличение интенсивности импульсов в отрицательных ионах. 24 июля амплитуда вариаций отрицательных ионов превысила регистрируемый порог прибора. В вариациях положительных ионов с 24 по 25 июля зафиксировано увеличение их концентрации с $3.5 \cdot 10^3$ до $12 \cdot 10^3$ ионов/см³. Тем не менее, в период с 1 по 14 августа вариационные процессы в положительных ионах также демонстрируют визуальную повторяемость с изменениями ОАР.

С 5 августа наблюдается тенденция к снижению концентрации отрицательных ионов, что привело к их выходу на фоновые значения к 14 августа.

В рамках дальнейших исследований корреляции концентрации аэроионов и водорода на пункте наблюдений РЕТ будет реализован мониторинг молекулярного водорода. Ниже в качестве примера представлены результаты мониторинга водорода на пункте наблюдения РРТ (рис. 4). Серой заливкой выделены предваряющие форшок и основное событие бухтообразные аномалии молекулярного водорода положительной полярности. После основного события также выделяется два аномальных возмущения. Длительность возмущений составила от 4 до 12 суток. Подобные, визуально хорошо диагностируемые, аномалии наблюдались на Камчатской сети пунктов в концентрации водорода перед такими сильными сейсмическими событиями, как дуплет Симуширских землетрясений, мегаземлетрясение Тохоку 2011 г., глубокое Жупановское землетрясение [2].

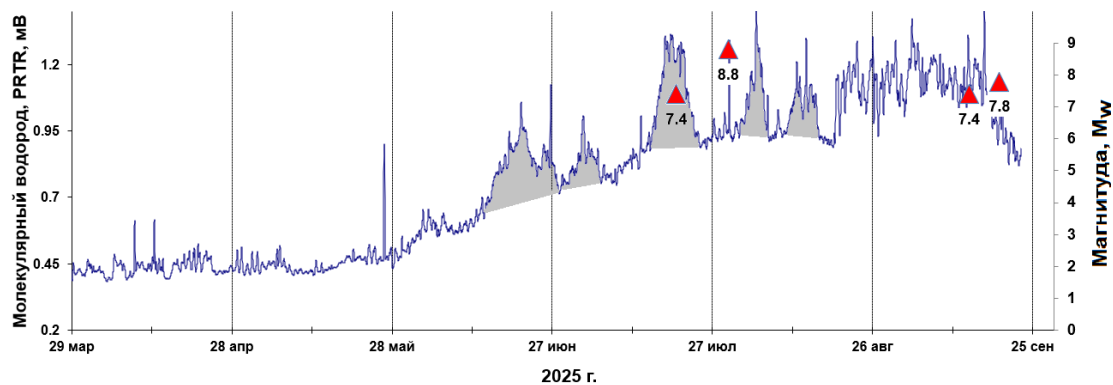


Рис. 4. Концентрация молекулярного водорода в пункте РРТ за период 29.03.2025-25.09.2025 гг. Красными треугольниками нанесены землетрясения с $M_w \geq 7.0$.

Обсуждения и выводы

Результаты наблюдений на стационарной сейсмической станции РЕТ подтверждают предположение об основном источнике аэроионов – радиоактивном распаде радона. Так, по данным наблюдений на РЕТ, между кривыми концентрации аэроионов и ОАР наблюдается высокая степень корреляции, коэффициент корреляции Пирсмана $\rho=0.97$.

Предварительный анализ данных позволил выявить закономерность: в период подготовки землетрясения наблюдается увеличение концентрации отрицательных ионов относительно положительных в вариациях ионного состава атмосферы. Этот результат согласуется с выводами исследования, опубликованного в [9]. Таким образом, в краткосрочной перспективе перед сейсмическим событием наблюдается нарушение корреляции между концентрацией радона и ионным составом воздуха. Это может указывать на активизацию дополнительного механизма генерации аэроионов. Кроме того, импульсные возмущения (рис. 1) в вариациях аэроионов, зарегистрированные на РЕТ, согласуются с результатами наблюдений аэроионов в Южной Напе, Калифорния, перед и после землетрясения с $M=6$ [9].

В этот же период на пункте наблюдения РРТ были зафиксированы аномальные изменения в уровне водорода (рис. 3). Поскольку станции РЕТ и РРТ находятся на значительном расстоянии друг от друга и расположены в разных геоморфологических условиях, в данной статье не рассматривается корреляция между вариациями аэроионов и водорода. Однако, на сейсмостанции РЕТ в январе 2026 г. был установлен датчик водорода, что позволяет планировать проведение такого исследования после получения достаточного количества данных. Представленное исследование поможет лучше понять природу возникновения аномалий в вариациях водорода и аэроионов в период подготовки сильных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26 и частично № 124030100098-0).

Список литературы

1. Безруков Л.Б., Громцева А.Ф., Заварзина В.П. и др. Наблюдение избытка положительных аэроионов в подземных полостях // Геомagnetизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 6. С. 755-768. <https://doi.org/10.1134/S0016793222060020>
2. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга. 2018. 148 с.
3. Adil M.A., Şentürk E., Pulinets S.A., Amory-Mazaudier C. A lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling phenomenon observed before M 7.7 Jamaica earthquake // Pure and Applied Geophysics. 2021. V. 178(10). P. 3869-3886. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02867-z>
4. Bezrukov L.B., Karpikov I.S., Kazalov V.V. et al. Study of the delayed pumping effect in an underground laboratory by correlation analysis of radon and air ion concentrations // Geomagn. Aeron. 2024. V. 64. P. 102-111. <https://doi.org/10.1134/S0016793223600765>
5. Freund F.T., Kulahci I.G., Cyr G. et al. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 71(17-18). P. 1824-1834. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.07.013>
6. Freund F.T., Takeuchi A., Lau B.W.S. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – a step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2006. V. 31(4-9). P. 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.027>
7. Hattori K., Wadatsumi K., Furuya R. et al. Variation of radioactive atmospheric ion concentration associated with large earthquakes // AGU Fall Meeting Abstract. December, 2008. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFM.S52A.03H>
8. Pulinets S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit // Advances in Space Research. 2014. V. 53(5). P. 709-723. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
9. Warden Sh., Bleier T., Kappler K. Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 186. P. 47-60.