

УДК 550.338

ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ АНОМАЛИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ДИНАМИКЕ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ В 1997–2001 ГГ.

© 2003 г. П. П. Фирстов, Ю. А. Филиппов, О. В. Мандрикова

Представлено академиком В.Н. Страховым 10.04.2002 г.

Поступило 16.05.2002 г.

Исследования подпочвенного радона и радона, растворенного в подземных водах, как предвестника сильных землетрясений ведутся начиная с 60-х годов прошлого столетия. Перспективность этого метода показана в обзорных работах [1–3].

В районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона в 1997–2001 гг. была создана сеть станций мониторинга подпочвенного радона [4]. Опорная станция сети была установлена в районе Паратунской геотермальной системы (ПРТ), которая структурно приурочена к одноименному грабену с мозаично-блоковой структурой верхнего яруса земной коры, что должно было повысить геохимическую чувствительность выбранного пункта к геодеформационным процессам перед сильными землетрясениями Камчатки и особенно перед землетрясениями Авачинского залива, что подтвердилось в дальнейшем. Еще одна станция располагается в зоне Паратунского грабена, а остальные станции сети располагаются в других геоструктурных элементах полигона (рис. 1).

На станции ПРТ регистрация подпочвенного Rn ведется в двух разноглубоких точках: на глубине 1 м в зоне аэрации (т. 1) и на глубине 3 м вблизи зоны полного влагонасыщения (т. 2). С ноября 1997 по декабрь 1999 г. регистрация объемной активности радона (ОА Rn) велась два раза в сутки поисковым α -радиометром РГА-01 с принудительным пробоотбором. С октября 1999 г. станции стали оснащаться радиометрами “РЕВАР”, в которых используется пассивный (без пробоот-

бора) способ измерения β -излучения продуктов распада Rn газоразрядным счетчиком Гейгера (типа СТС-6). Этот радиометр позволяет при необходимости проводить автономные (до двух месяцев) наблюдения с длительностью интервала времени накопления 30 мин. Ряды, полученные с помощью различных радиометров, приводились к одной дискретизации (два измерения в сутки), к одной размерности (ОА Rn [Бк/м³]) и “сшивались”. Влияние вариаций атмосферного давления на динамику ОА Rn учитывалось с помощью методики компенсации баровариаций по программе А.А. Любушина (мл) [5].

На рис. 2а приведены барокомпенсированные (тонкие линии) и осредненные скользящим средним в 7-суточных интервалах (жирные линии) значения ОА Rn для каждой точки. Для обеих кривых четко выражен сезонный ход, обусловленный сезонными колебаниями температуры гелиотермозоны, но его характер различен. Промерзание гелиотермозоны в зимнее время приводит к уменьшению ее проницаемости и, соответственно, изменению градиента ОА Rn с глубиной. На кривых хорошо проявляется весенний период. Как только температура воздуха принимает положительные значения и уровень грунтовых вод начинает подниматься за счет таяния снежного покрова, наблюдается уменьшение концентрации Rn на 20–25% в зоне насыщения и резкое увеличение концентрации Rn до 200% и более в зоне аэрации. Аналогичный сезонный ход в зоне аэрации наблюдался и на станциях НЛЧ и ГЛЛ, расположенных в районах гидротермальных систем (рис. 1).

В начальный период наблюдений в районе полуострова Камчатка 5 декабря 1977 г. произошло сильное Кроноцкое землетрясение с моментной магнитудой $M_{\text{NEIC}} = 7.8$ и эпицентральной дистанцией $R = 390$ км до станции ПРТ. За период наблюдений в акватории Тихого океана вблизи Авачинского залива на эпицентральной дистанции меньше 150 км от ПРТ произошло четыре ко-

*Институт вулканической геологии и геохимии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский
Институт вулканологии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский*

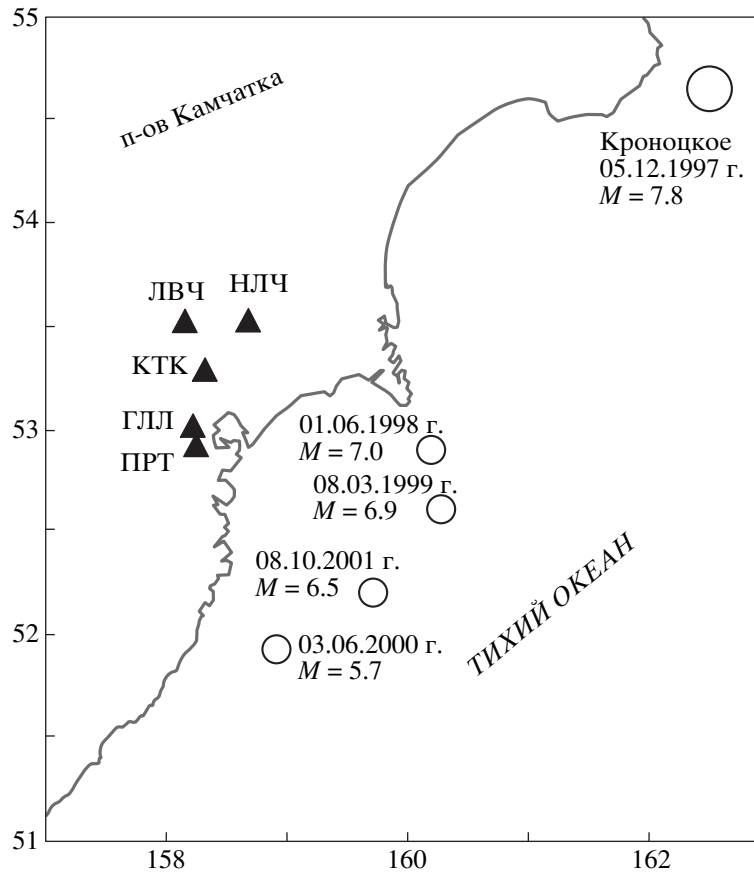


Рис. 1. Схема размещения станций мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и карта эпицентров сильных землетрясений района Авачинского залива за 01.11.1997 г.–01.03.2002 г. ПРТ – ст. Паратунка, ГЛЛ – ст. Голубая лагуна, НЛЧ – ст. Налычево, ЛВЧ – ст. Левая Авача, ИНС – здание Института вулканологии.

ровых землетрясения, три с $M_{NEIC} \geq 6.5$ и одно более слабое с $M_{NEIC} = 5.7$ (рис. 1).

Поиск среднесрочных предвестниковых аномалий (несколько месяцев) в динамике подпочвенного Rn представляет определенную сложность, так как такие аномалии затушевываются сезонным ходом и другими факторами, поэтому были использованы различные методы обработки сигнала. С целью выявления предвестниковых аномалий ряды данных ОА Rn оценивались мультипликативной моделью с учетом тренда и сезонности [6] и вычислялись остатки (ΔRn) между моделью и текущими значениями. На рис. 2б (верхняя кривая) приведен график ΔRn для т. 2 (зона насыщения), на котором стрелками отмечены начала 4 участков с характерным поведением кривой, начинающихся с минимума, после чего в течение двух месяцев наблюдается рост ΔRn со скоростью 50–80 Бк/м³ в сутки. Такое характерное поведение кривой наблюдается за 3–4 месяца перед землетрясениями района Авачинского залива с $M \geq 6.5$ и более слабым землетрясением 3 июня 2000 г. с $M = 5.7$, что связывается нами с измене-

нием напряженно-деформированного состояния горных пород в точке наблюдения под действием регионального поля напряжений.

Для т. 1 такой четкой картины не наблюдается. Это объясняется уменьшением тензочувствительности в т. 1 за счет промерзания верхнего слоя грунта в осенне-зимний период и большей зависимостью значений ОА Rn от атмосферного давления, что затушевывает влияние деформационных процессов на динамику подпочвенного радона в зоне аэрации.

Метод нейронных сетей (НС) широко используется для решения задач распознавания образов, классификации и прогнозирования [7]. С использованием нейропакета Neural Network Toolbox (расширение пакета MATLAB) были исследованы ряды ОА Rn для обеих точек станции ПРТ. На первом этапе формировалась НС, для чего вычислялись веса и смещения линейного слоя нейронов по заданным входным и выходным значениям сигнала посредством решения систем линейных уравнений методом наименьших квадратов. Затем работа НС моделировалась с целью прогнозирования сигнала по 5 предыдущим значени-

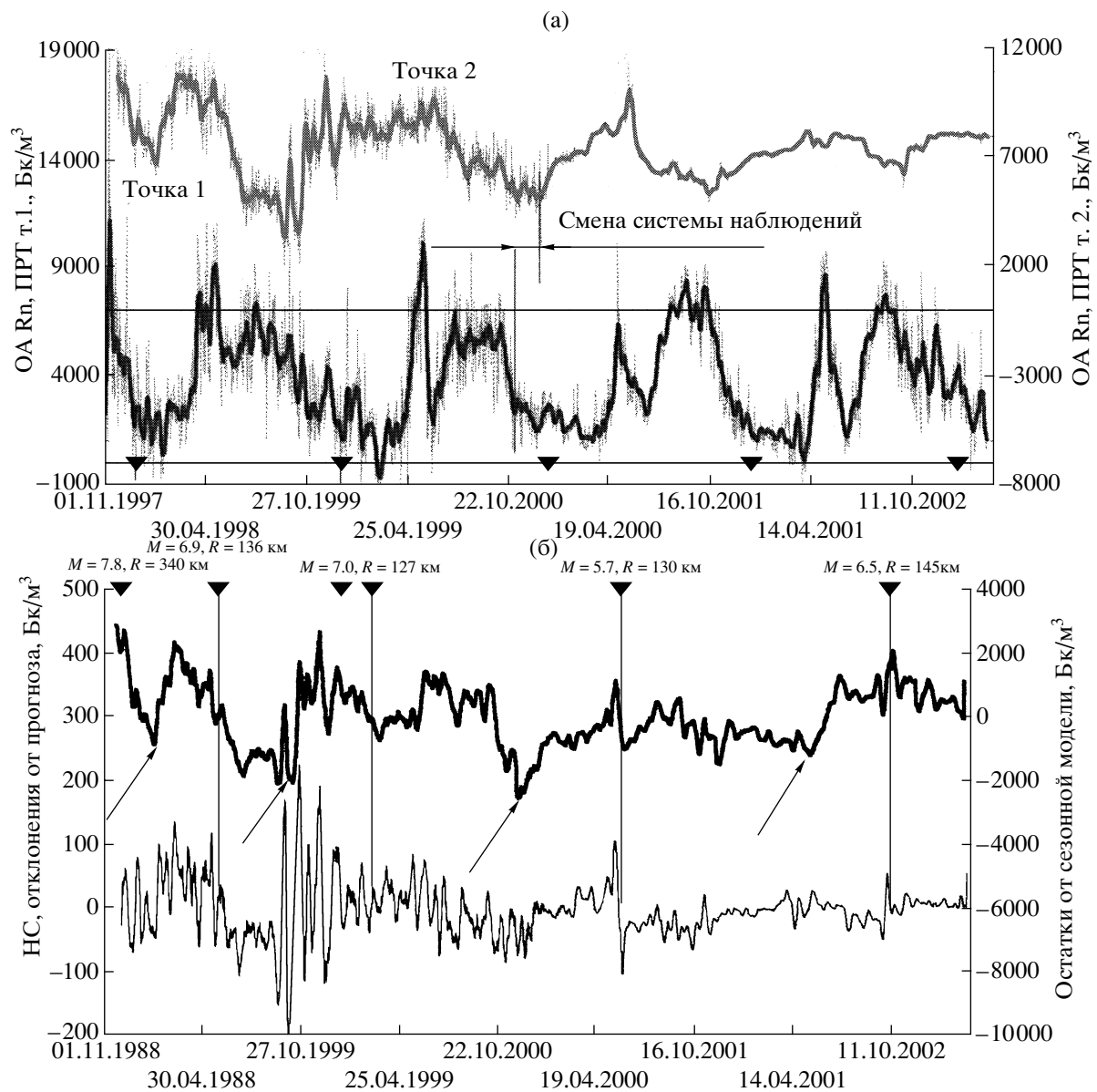


Рис. 2. а – кривые значений объемной активности Rn (тонкие линии) и осредненные скользящим средним в 5-суточных интервалах (жирные линии) в опорном пункте ПРТ: точка 1 – зона аэрации; точка 2 – зона влагонасыщения (треугольниками отмечено начало каждого года). б – остатки от мультипликативной сезонной модели (верхняя кривая) и разница между текущими и прогнозными значениями, полученными с помощью нейронной сети (стрелками отмечены моменты возникновения прогнозных аномалий, треугольниками сильные землетрясения).

ям и вычислялась разница $er = x_i - x_{пр}$, между текущими (x_i) и прогнозируемыми ($x_{пр}$) значениями ряда (рис. 2б, нижняя кривая).

Как и в мультипликативной модели, для т. 2 выделяются аномалии перед сильными землетрясениями, чего не наблюдается для т. 1. На рис. 2б (нижняя кривая) видно, что во всех 4 случаях за 3–4 месяца до землетрясения появляются колебания с периодом 10–30 суток, а также возрастает дисперсия значений er . На возможность возникновения прогнозных признаков в динамике подпоч-

венного радона, имеющих колебательную природу, указано в работе [8].

График изменения ОА Rn в точке насыщения, как показано выше, в основном отражает сезонные колебания температуры, и если отсутствуют другие возмущающие факторы, то результаты прогноза должны быть достаточно близки к реальным значениям ряда. Существенные отклонения прогнозируемых значений от реальных, по видимому, указывают на значимые изменения геодинамических процессов, влияющих на динамику подпочвенного радона в зоне насыщения.

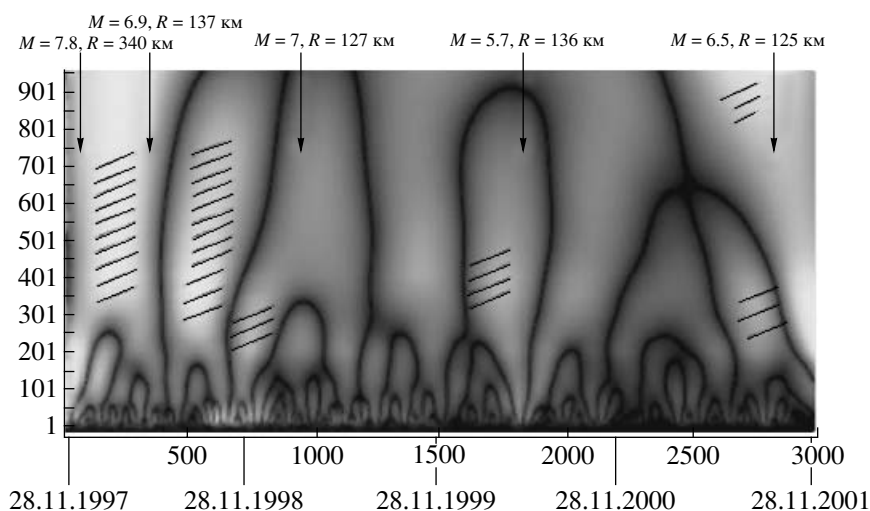


Рис. 3. График вейвлет-преобразования значений OA Rn для т. 2 на станции ПРТ (заштрихованы аномальные области).

Ряды значений OA Rn и температуры воздуха были также обработаны с помощью вейвлет-анализа с использованием дискретного вейвлета Мейера [9], который позволяет видеть разномасштабные версии сигнала на любом уровне детализации. Для т. 1 вейвлет-коэффициенты в деталях повторяют рисунок для температуры воздуха, за исключением начальной части, что, возможно, связано с подготовкой Кроноцкого землетрясения. На рис. 3 показан график вейвлет-преобразования значений OA Rn для т. 2, где вейвлет-коэффициенты $W(a, b)$ показаны в виде проекций на плоскость ab (временной масштаб, время). Светлые области соответствуют большим значениям коэффициентов, черные линии – нулевым значениям $W(a, b)$; оттенками серого цвета в каждой области выделены диапазоны значений $W(a, b)$.

Верхняя часть рис. 3 демонстрирует сезонную периодичность сигнала, а светлые области (заштрихованы) указывают на наличие аномалий. В периоды, предшествующие землетрясениям, наблюдается резкое возрастание значений вейвлет-коэффициентов на различных временных масштабах. Перед землетрясениями, произошедшими 01.06.1998 г. и 08.03.1999 г., среднее значение дисперсии вейвлет-коэффициентов в серии последовательно взятых интервалов превышает фоновое значение в 2–6 раз и соответствует масштабам 6–15 и 350–950 для первого события, 10–70 и 250–700 для второго события. Перед землетрясениями, произошедшими 03.06.2000 г. и 08.10.2001 г., среднее значение дисперсии, превышающее фоновое значение в 1.5–2.5 раза, наблюдается на масштабах 15–30 и 200–350. Во всех случаях отмечается сходная тенденция поведения вейвлет-коэффициентов на указанных масштабах. На мелких масштабах происходит рост коэффициентов за 3–1.5 недели до события, достигает

максимума, а затем за 3–5 дней до землетрясения наблюдается резкое снижение коэффициентов; на крупных масштабах период аномалии составляет от 2.5 до 5 месяцев и проявление максимума наблюдается в середине периода. Выявленные аномалии отражают повышение корреляции между составляющими сигнала и вейвлетами на соответствующих временных масштабах.

Применение трех методов обработки кривых динамики подпочвенного радона в зоне насыщения позволило в комплексе диагностировать аномалии перед сильными землетрясениями Авачинского залива с $M_w \geq 6.5$. Это позволяет говорить: 1) о результативности радонового метода в районах геотермальных систем для среднесрочного прогноза; 2) о более объективном выделении аномалий на основе комплекса методов обработки данных.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 02–05–64467.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King C.-Y. In.: Isotopic Geochemical Precursors of Earthquakes and Volcanic Eruption. Vienna, 1991. P. 22–36.
2. Войтов Г.И. // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27–38.
3. Рудаков В.П. // Геохимия. 2002. № 1. С. 56–62.
4. Фирстов П.П. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33–43.
5. Любушин А.А., мл. // Физика Земли. 1999. № 6. С. 35–45.
6. Box G., Jenkins G. Time Series Analysis. Forecasting and Control. San Francisco: Holden-day, 1970. 408 p.
7. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996. 276 с.
8. Беляев А.А. // Геохимия. 2001. № 12. С. 1355–1360.
9. Chui C.K. Approximation Theory and Functional Analysis. Boston: Acad. Press, 1991. 420 p.